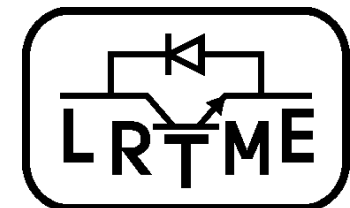
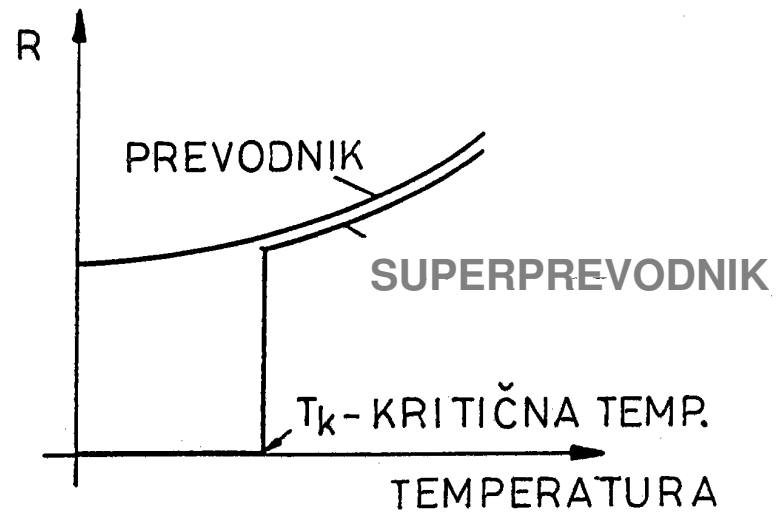


Št. leto 2012/2013

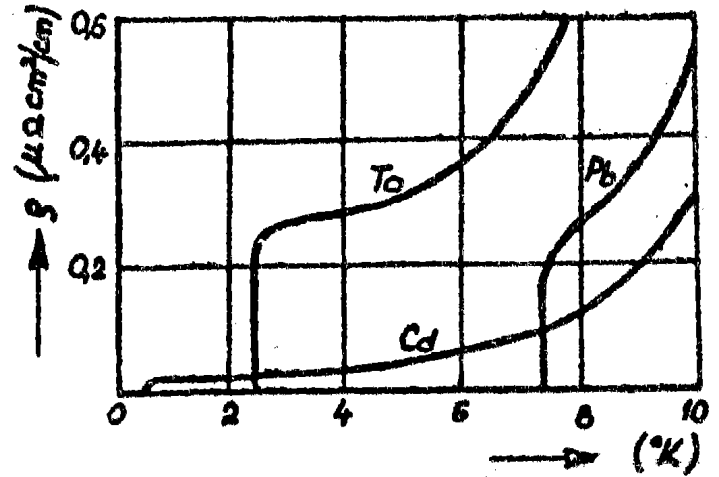
# Superprevodni materiali



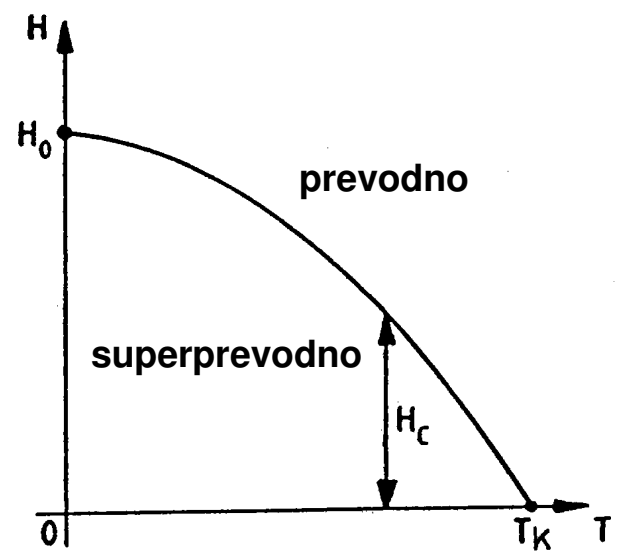
# Superprevodnost



Potek električne upornosti v bližini absolutne ničle pri prevodnikih in superprevodnikih

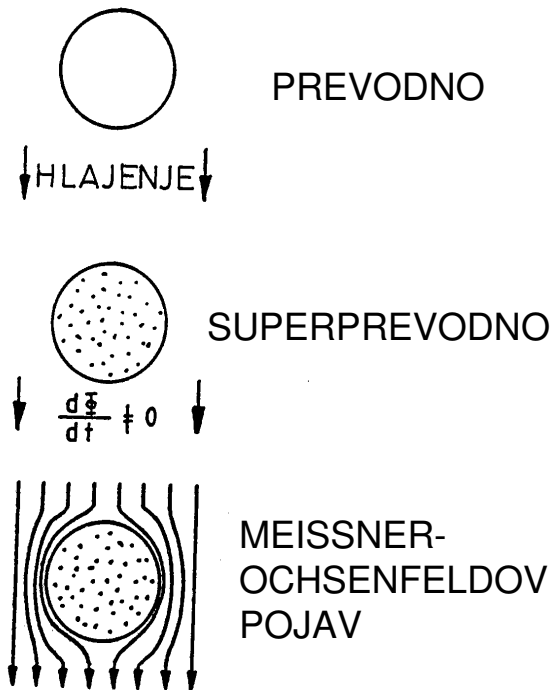


$$H_C = H_0 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_C} \right)^2 \right]$$

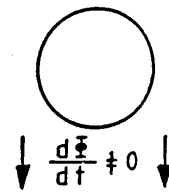


Kovina	$T_K$ [°K]	$H_0$ [A/cm]	$B_0 = \mu_0 H_0$ [Vs/m <sup>2</sup> ]
Al	1,18	79	0,0099
Cd	0,54	24	0,0030
Ga	1,09	40	0,0050
Hg ( $\alpha$ )	4,15	328	0,0412
Hg ( $\beta$ )	3,95	270	0,0339
In	3,40	233	0,0293
Ir	0,14	15	0,0019
Mo	0,92	78	0,0098
Nb	9,46	1575	0,1979
Pb	7,19	639	0,0803
Sn	3,72	246	0,0309
Ta	4,48	660	0,0829
Th	1,37	130	0,0163
Ti	0,39	16	0,0020
Tl	2,39	136	0,0171
V	5,30	1050	0,1300
W	0,0154	0,92	0,0001
Zn	0,92	40	0,0050

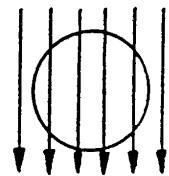
Zlitina	$T_K$ [°K]
Nb - Zr	9 - 11
Nb - Ti	8 - 10
Nb - Ti - Zr	8 - 10
Nb - Ti - Ta	8 - 10
Nb <sub>3</sub> - Sn	18,3
V <sub>3</sub> - Ga	14,5



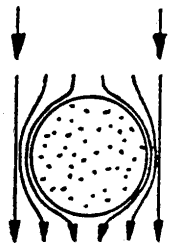
Ohlajanje superprevodnika brez zunanjega magnetnega polja



PREVODNO



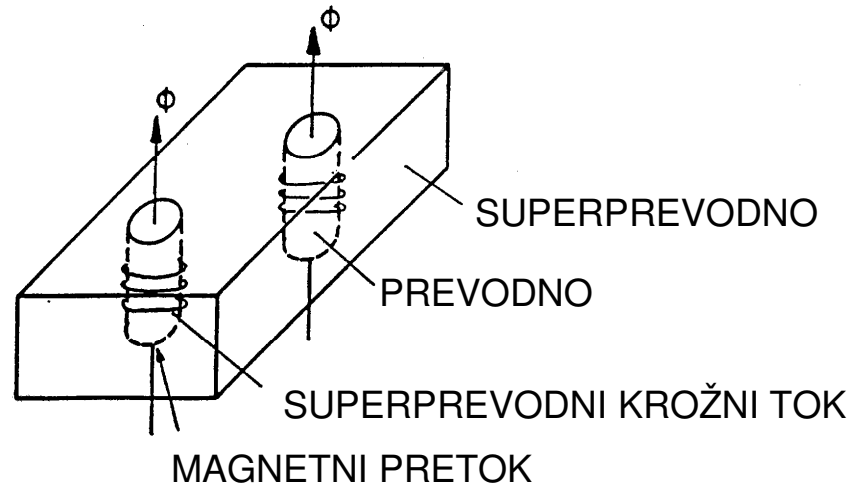
SUPERPREVODNO



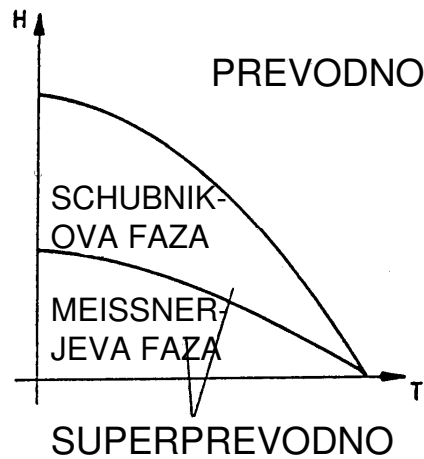
MEISSNER-  
OCHSENFELDOV  
POJAV

Postavitev prevodnika v magnetno polje in ohlajanje do superprevodnega stanja

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$



Prevodni kanali pri superprevodnikih druge vrste



$H - T$  karakteristika pri superprevodnikih druge vrste



# Klasična razlaga superprevodnosti

Ena od fenomenološko-empiričnih teorij superprevodnosti se naslanja na Newton-ov zakon o delovanju sil,

$$m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = -e \cdot \vec{E}$$

ki v povezavi z izrazom o gostoti toka:

$$\vec{i} = -e \cdot n \cdot \vec{v}$$

da naslednjo enačbo:

$$A \cdot \frac{d\vec{i}}{dt} = \vec{E}$$

$A$  je okrajšava za:  $A = \frac{m}{n \cdot e^2}$ ,  $m$  je masa elektronov [kg],  $n$  je *gostota nabojev na enoto prostornine* [ $m^{-3}$ ] in  $e$  je vrednost naboja elektrona [As].

Če enačbo vstavimo v drugo Maxwellovo enačbo:

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

potem dobimo:

$$\Lambda \cdot \text{rot} \frac{d\vec{i}}{dt} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

Tako je F. H. London prišel do dveh enačb, ki opisujeta lastnosti superprevodnosti:

$$\Lambda \cdot \frac{d\vec{i}}{dt} = \vec{E}$$

1. Londonova enačba

$$\Lambda \cdot \text{rot}\vec{i}_s = -\vec{B}$$

2. Londonova enačba

Prva Londonova enačba pravi, da superprevodni tok  $i_s$  lahko teče ustaljeno tudi brez prisotnosti električnega polja.

Druga Londonova enačba pa zajema Meissner-Ochsenfeld-ov pojav in opisuje izriv magnetnih silnic iz superprevodnika.

Analiza druge enačbe pokaže, da gostota magnetnega pretoka v superprevodniku pada od površine, kjer je enaka  $B_s$ , proti notranjosti po enačbi:

$$B(x) = B_s \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

kjer je  $\lambda = \sqrt{\frac{\Lambda}{\mu_0}}$

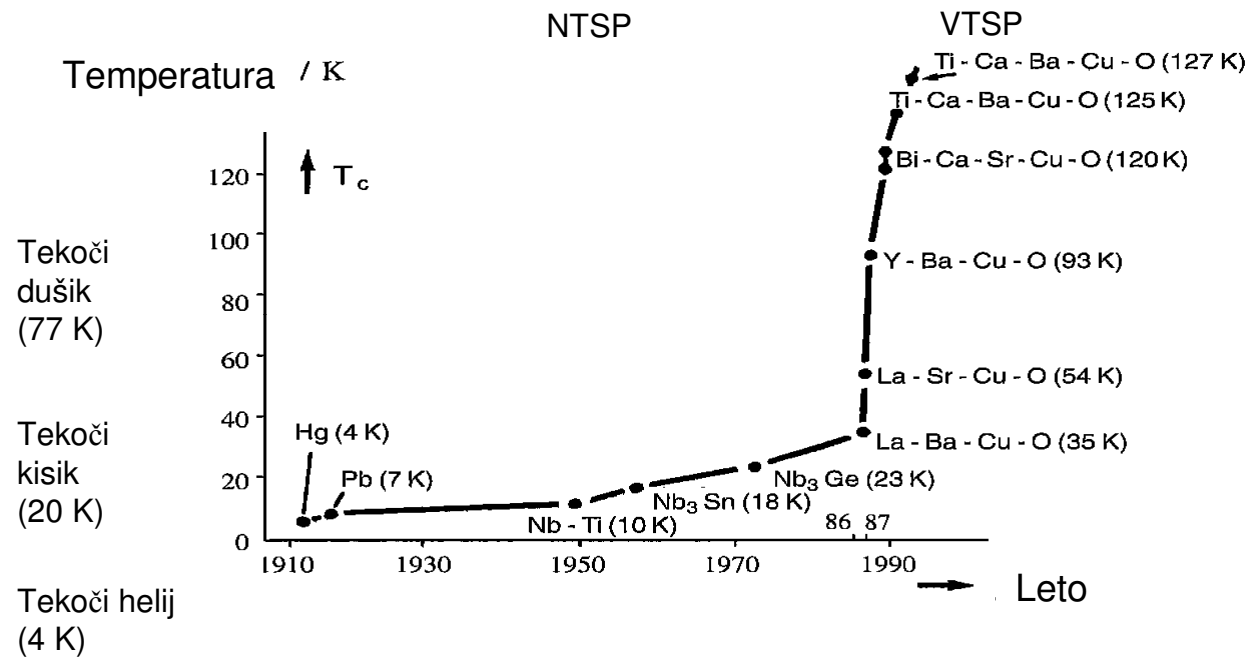
## Bardeen-Cooperjeva razlaga superprevodnosti

Poleg pravkar omenjene razlage pa so različni avtorji razvili nove teorije. Teorijo, ki izhaja iz kvantne mehanike, so razvili **Bardeen**, **Cooper** in **Schrieffer** (BCS).

Teorija je osnovana na dejstvu, da se pri dovolj nizki temperaturi vzpostavijo privlačne sile med prevodnimi elektroni, pri čemer tvorijo ti. Cooperjeve pare.

Njihov skupni spin je enak nič. Vsi Cooperjevi pari zavzamejo eno kvantnomehansko stanje (k.m. stanje). Ker se vsi nahajajo v enem k.m. stanju, ne prihaja do izmenjave energije, in električni tok, ki ga prenašajo v vodniku, ne čuti nobene električne upornosti.

# Razvoj superprevodnih materialov



# Današnji superprevodni materiali

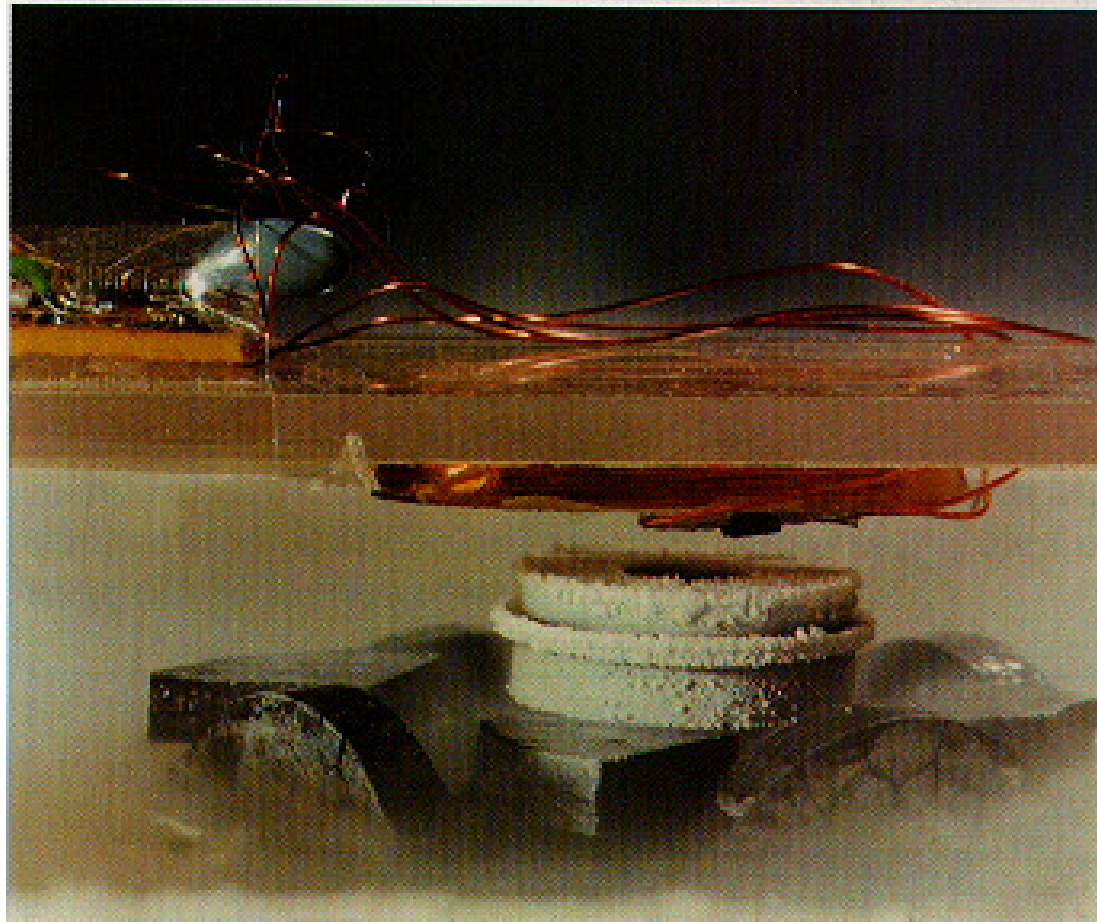
Dva tipa superprevodnih materialov se uporabljata v močnostni elektrotehniki:

**YBCO** — itrij barij bakrov oksid -  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

**BSCCO** — bizmut stroncij kalcij bakrov oksid. Najbolj znani sta izvedbi:  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_7$  in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$

Te materiale imenujemo tudi oksidna keramika

# Izriv magnetnega polja iz superprevodnika



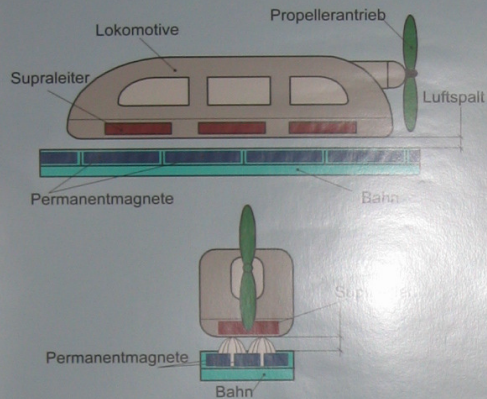
# Model lebdeče železnice s superprevodnimi materiali in trajnimi magneti



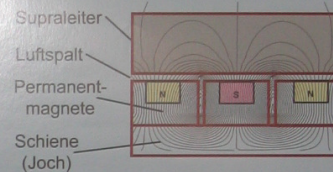


# Elektrische Energiesysteme

## Supraleitende Magnetschwebbahn



- Kern: Hochtemperatursupraleiter (HTSL)
- Sprungtemperatur von 93°K (-180°C)
- „Eingefrorenes“ Magnetfeld im HTSL
- Permanentmagnetschiene
- Schwebende Lokomotive
- Exakte Führung in einem festen Abstand von der Schiene.

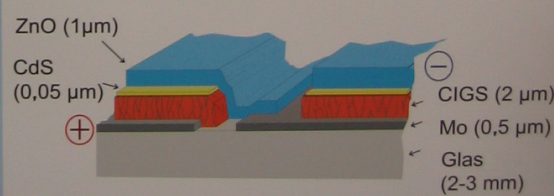


## Solargenerator mit Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) Dünnschichtmodulen



- Material- und Prozessentwicklung am *ipe* seit 1975
  - Basistechnologie Entwicklung am ZSW seit 1993
  - Pilotfertigung bei Würth Solar Marbach seit 2000
- Solarmodul 60 cm x 120 cm (60-80 Watt peak)

Verschaltung einzelner Zellen im Modul



Princip delovanja  
železnice z uporabo  
superprevodnih  
materialov in trajnih  
magnetov



Universität Stuttgart

Institut für Energieübertragung  
Hochspannungstechnik

### Modell einer supraleitenden Magnetschwebebahn

Der Kern einer supraleitenden Schwebebahn ist ein keramischer Hochtemperatursupraleiter (YBCO), der bei einer Temperatur unterhalb von 93 °K (-180°C) widerstandslos elektrischen Strom leitet und magnetische Felder einfrieren kann.

Die Wechselwirkung zwischen dem Supraleiter und der Permanentmagnetschiene lässt die Lokomotive schweben und fahren zugleich. Magnetische Kräfte und das Profil der Schiene sorgen für die exakte Führung in einem festen Abstand von der Schiene.

Die Lok mit dem Supraleiter wird im Feld der Magnetschiene (Abstand 1-6 mm) mit flüssigem Stickstoff gefühlt. Dadurch kühlt sie so stark ab, dass der Supraleiter in ihr aktiviert wird und der Pinningeffekt auftritt. Je geringer der Abstand zur Magnetschiene beim Einfrieren ist, desto stabiler ist der Pinningprozeß.

Der Pinningeffekt sorgt für das stabile Schweben des Supraleiters im Magnetfeld der Permanentmagnetschiene. Einmal angeschoben, fährt die Lok so lange wie die Temperatur niedrig genug ist.

- Opis modela lebdeče železnice z uporabo superprevodnih materialov

# Primeri uporabe

- **Superprevodni kabli:**

minimalna gostota toka je  $100 \text{ kA/cm}^2$

YBCO materiali:  $100 \text{ kA/cm}^2$  pri  $B = 4 \text{ T}$

- **Električni stroji:**

Vojaški program ZDA: sinhrnoski stroj moči 25 MW

- **Elektronski merilni sistemi:**

Osciloskopi: frekv. Območje:  $0 - 70 \text{ GHz}$ ,

rise time: 5 ps,

občutljivost  $1 \mu\text{V}$