



Univerza v Mariboru

---

Fakulteta za elektrotehniko,  
računalništvo in informatiko

# Magnetni nano-materiali; karakterizacija in uporaba magnetnih tekočin za medicinske namene



doc. dr. Miloš BEKOVIĆ

Laboratorij za aplikativno elektromagnetiko

[milos.bekovic@um.si](mailto:milos.bekovic@um.si)

1. Predstavitev laboratorija
2. Karakterizacija magnetnih materialov
3. Magnetne tekočine
4. Potencialna uporaba tekočin v medicinske namene
5. Karakterizacija magnetnih tekočin
6. Zaključek

## Laboratorij za aplikativno elektromagnetiko

**Vodja laboratorija:** red. prof. dr. Mladen Trlep

Laboratorij za aplikativno elektromagnetiko pokriva v svojem pedagoškem delu področja: **elektrotehničnih materialov**, **magnetnih meritev**, **električnih pogonov**, **numeričnih metod**, projektiranja elektromagnetnih naprav s CAD orodji ter **teoretske in aplikativne elektromagnetike**.

Raziskovalno delo laboratorija se prepleta s pedagoškim in je usmerjeno predvsem v razvoj in uporabo numeričnih metod za reševanje poljubnih elektromagnetnih problemov, **v razvoj in uporabo merilnih metod za magnetne** in izolacijske materiale ter razvoj programskih rešitev za CAD elektromagnetnih naprav in sistemov.



M. Trlep



A. Hamler



M. Beković



M. Jesenik

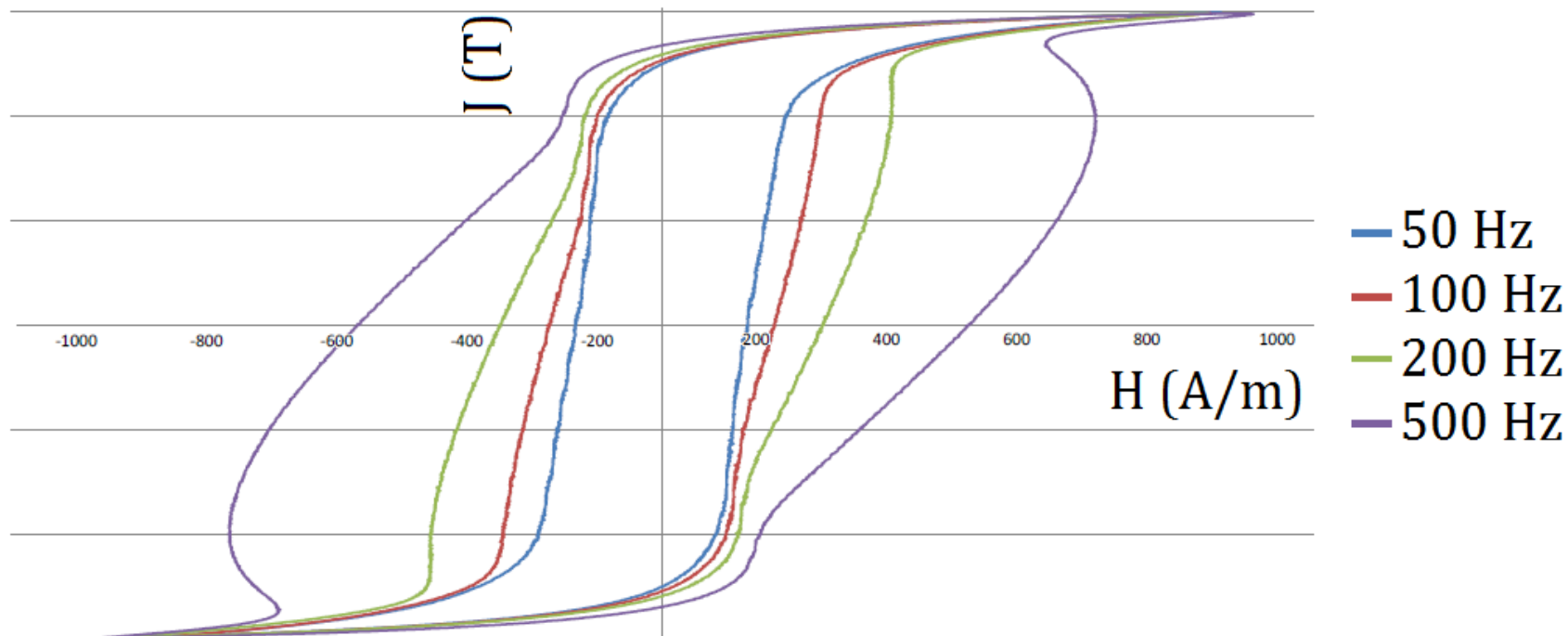


V. Goričan



M. Trbušič

CILJ, dinamične histerezne zanke



Dinamične histerezne zanke neorientirane pločevine M600-50A za primer maksimalnega vzburjanja pri različnih frekvencah

Običajna pot pri feromagnetnih materialih, UM-FERI-LAE

Merilni jarem za trajne magnete

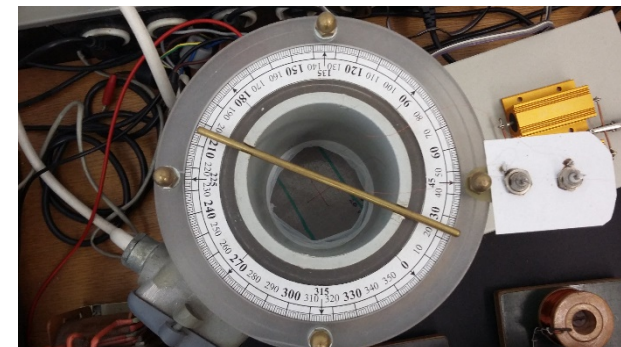


Standard IEC 404-3

Epstein-ov jarem



Okrogli rotacijski enoploščni merilnik



Enoploščni merilniki SST



1. Ni standarda (IEC)



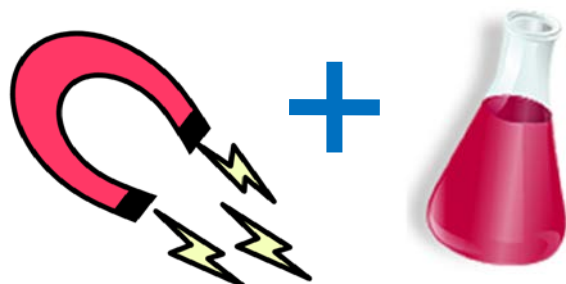
2. Ni merilnika (SST, )



3. Magnetno zelo šibki materiali  
(superparamagnetni)  $\chi = 1 \sim 2$

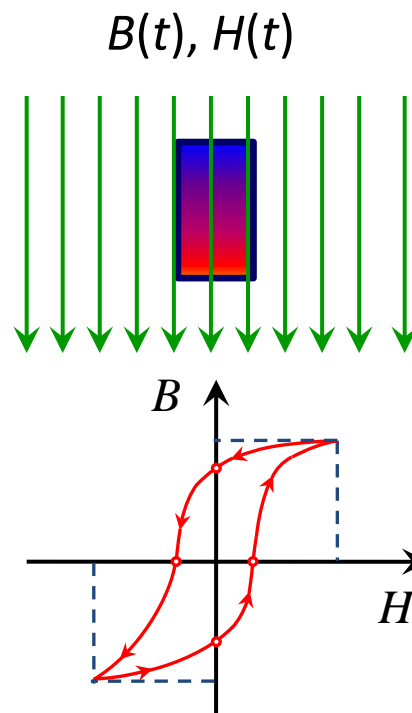
naslov: Magnetni nano-materiali; karakterizacija in uporaba magnetnih tekočin v medicinske namene

a) magnetne tekočine



b) magnetne izgube

*Izmenično magnetno polje*



c) karakterizacija

Merilna naprava → CILJ 1

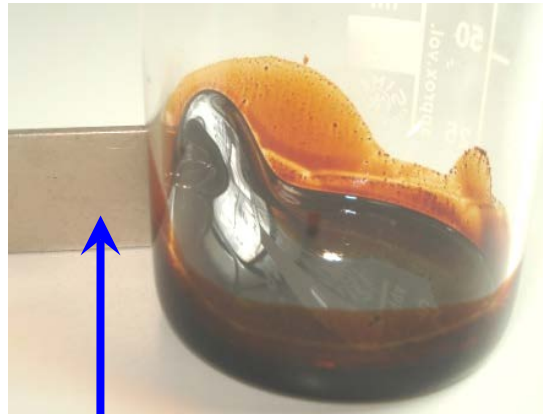
Merilni postopek → CILJ 2

Magnetne tekočine so:

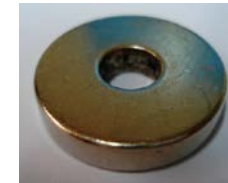
- **stabilne** koloidne disperzije super-paramagnetnih delcev,
- **prevlečeni** s tankim slojem površinsko aktivne snovi (surfaktanta), ki preprečuje njihovo aglomeracijo,
- **Brownovo** gibanje pa vzdržuje delce trajno suspendirane.



Magnetna tekočina

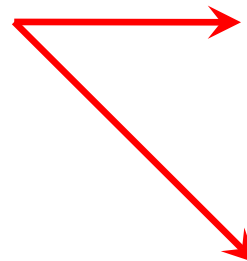


Trajni magnet





Osnovni dve komponenti

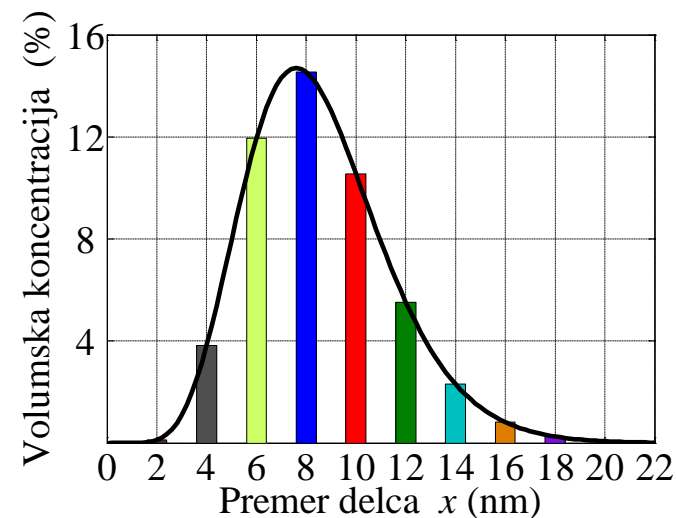
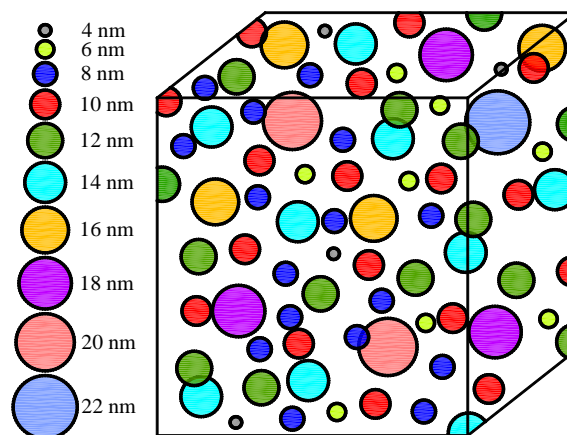
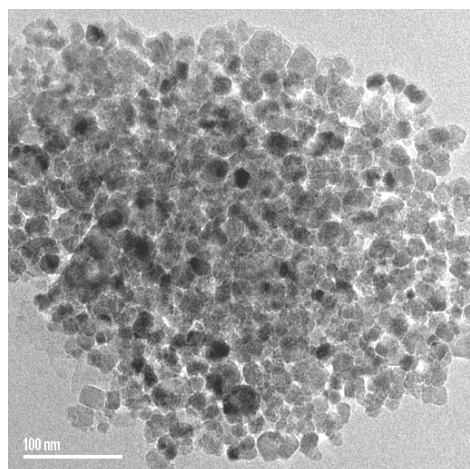


I. Magnetni nano delci  
(magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  in maghemit  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )

II Nosilna tekočina  
(voda, kerozin, olje, ...)



TEM HITACHI





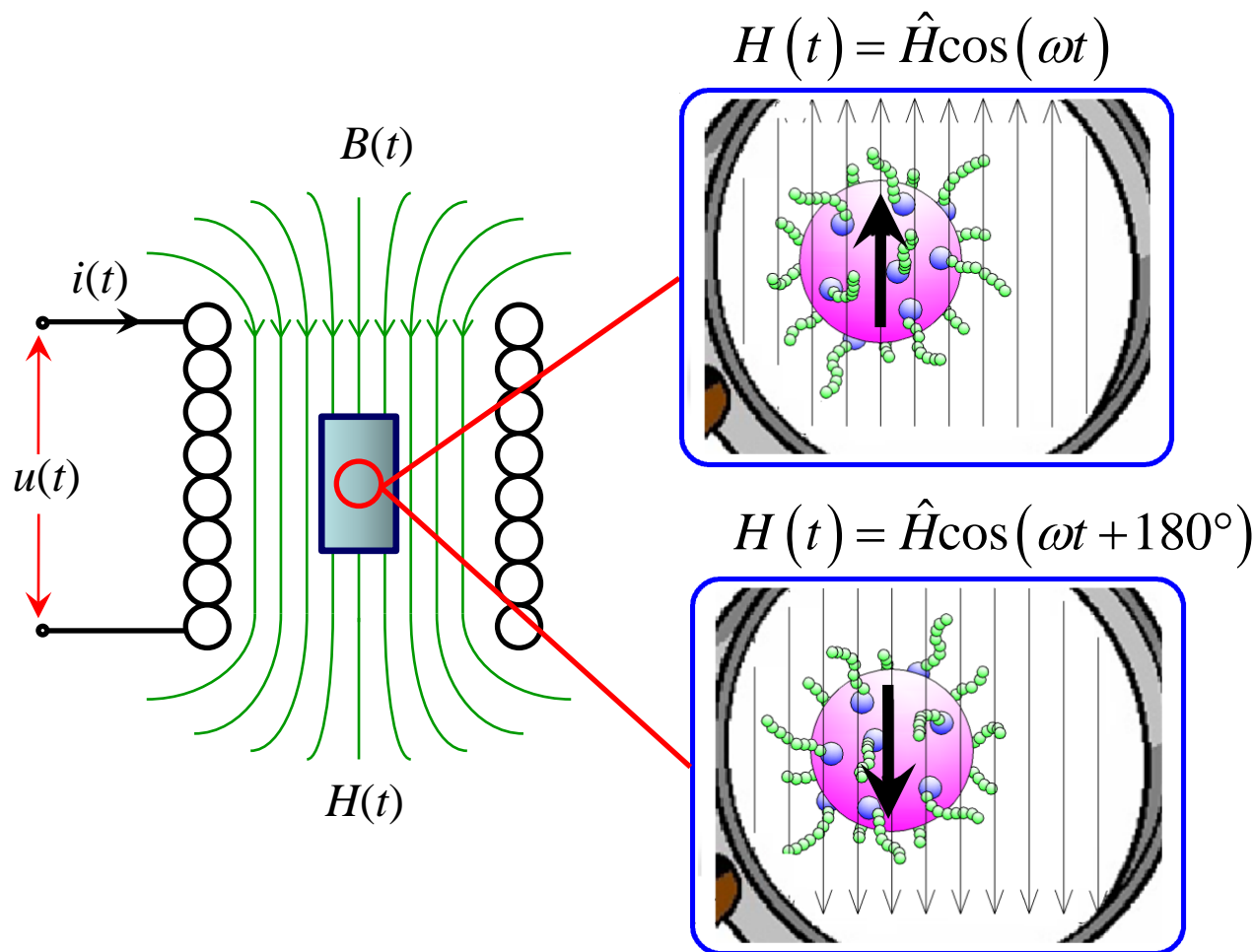
Material pod vplivom magnetnega polja  
Prevodni kovinski material



*INTENZIVNOST  
SEGREVANJA*

- *Jakost polja*
- *Frekvenca polja*
- *Čas*
- *Upornost*
- *Susceptibilnost,*
- *...*

$$T = f(H, f, t, R, \chi, \dots)$$



Brownova relaksacija

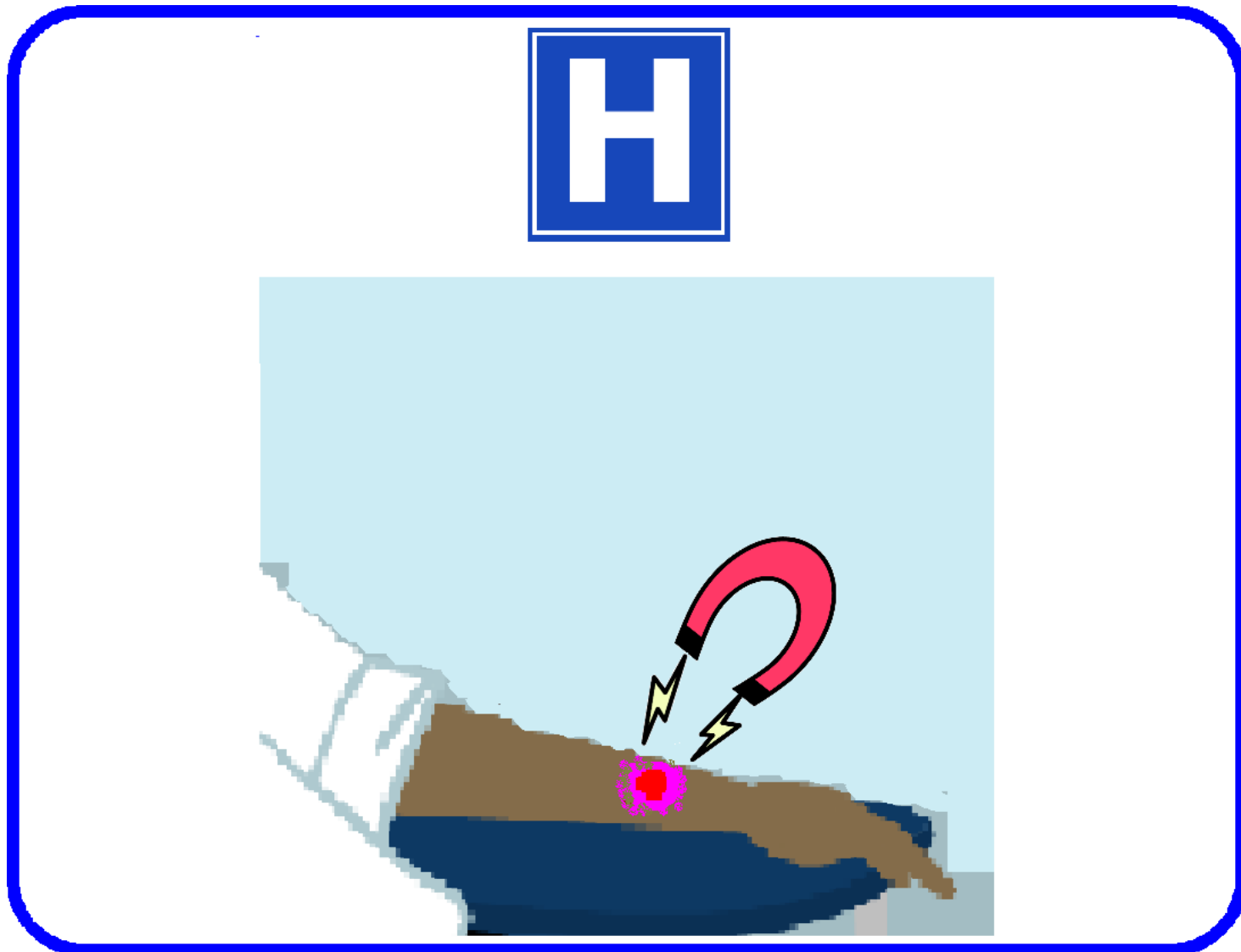
$$\tau_B = \frac{4\pi R_H^3 \eta}{k_B T}$$

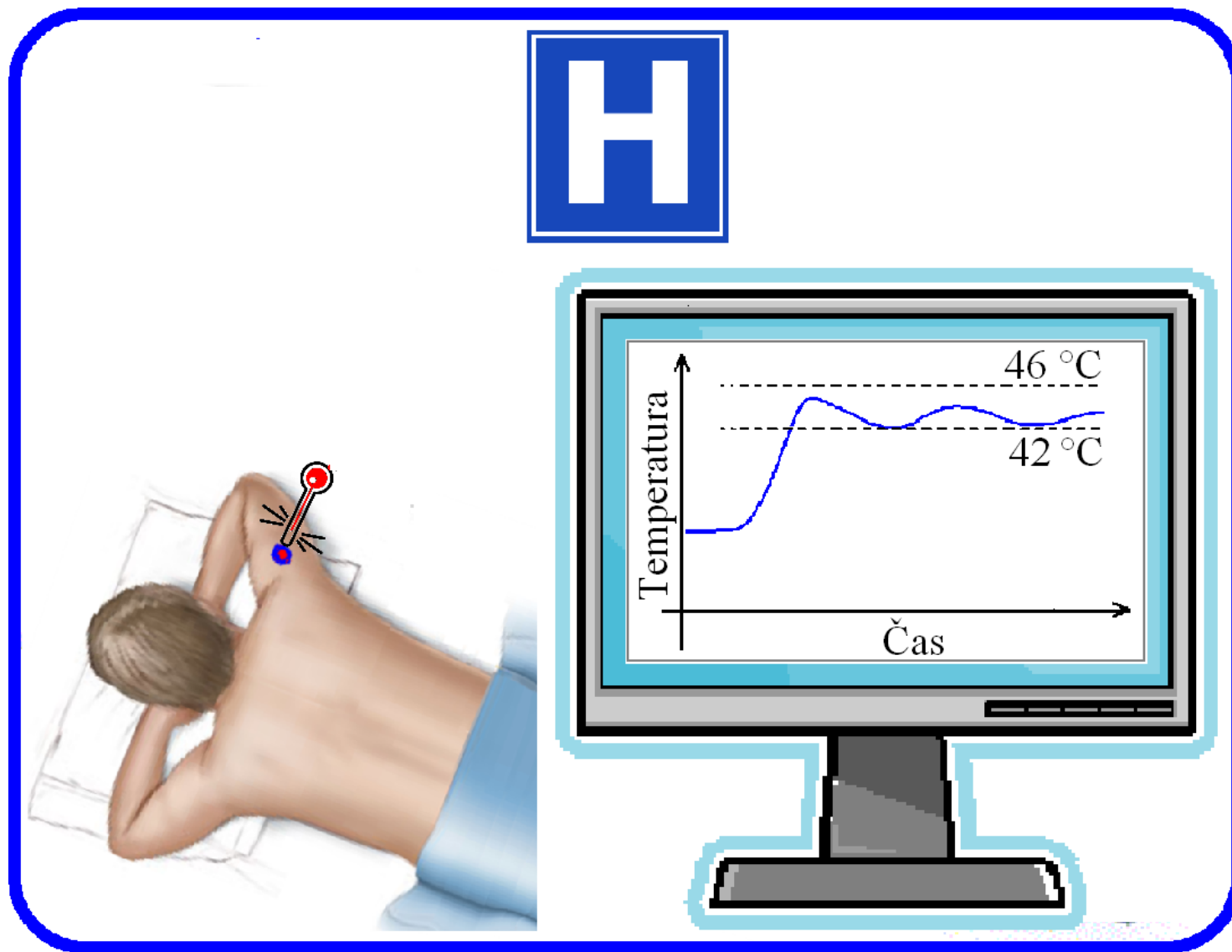
Néelova relaksacija

$$\tau_N = \tau_0 \exp\left(\frac{KV}{k_B T}\right)$$



Posledica izgub v  
izmeničnem mag.  
polju je  
segrevanje tekočine.





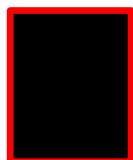
ŽELJA; določitev moči gretja W/g

c) karakterizacija

Merilna  
naprava



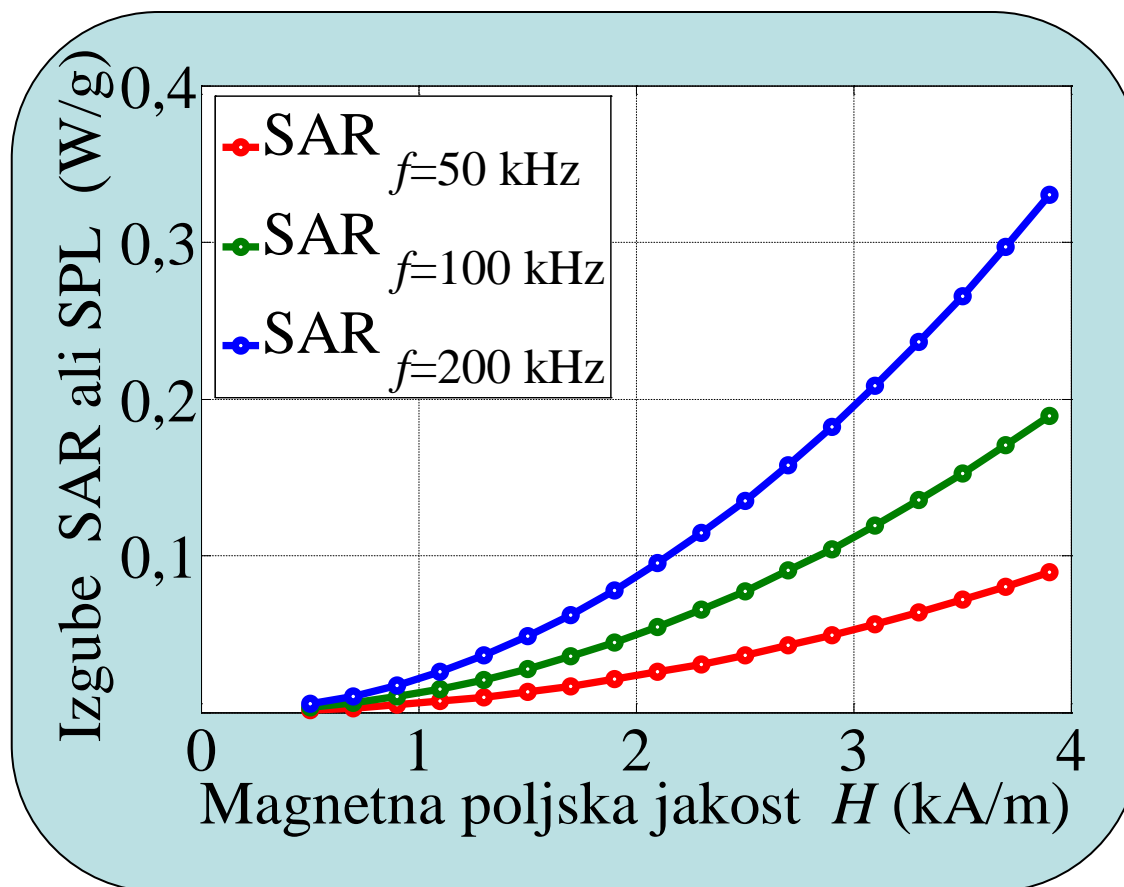
CILJ 1



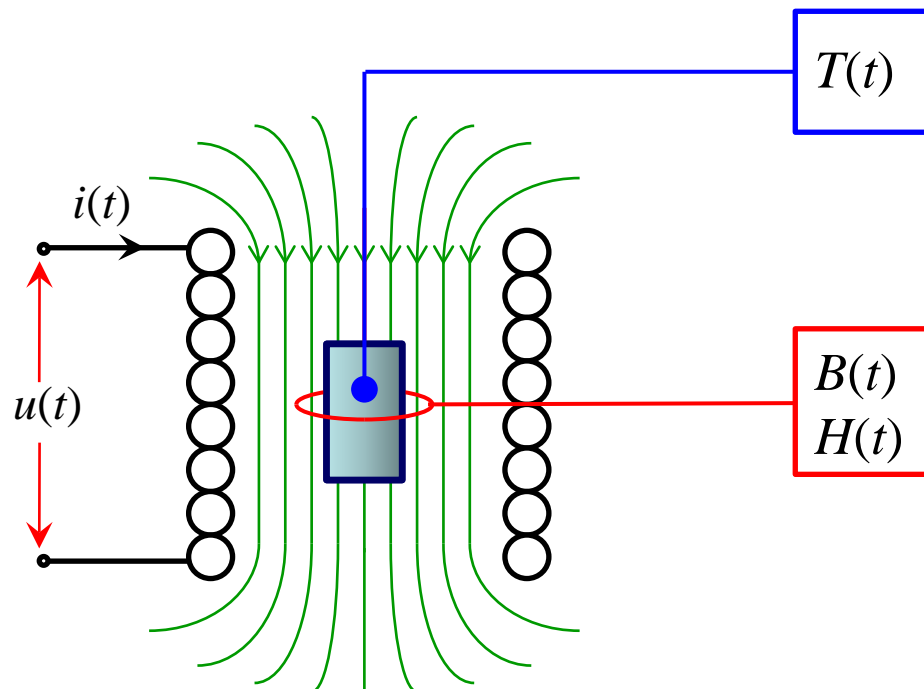
Merilni  
postopek



CILJ 2



Merilni sistem – od ideje do rešitve.



### Specific Absorption Rate

$$\text{SAR} = \frac{C_{\text{tek}}}{m_{\text{Fe}}} \left( \frac{\Delta T}{\Delta t} \right)_{t=0} \quad \left( \frac{\text{W}}{\text{g}_{\text{Fe}}} \right)$$

### Specific Power Loss

$$\text{SPL} = \frac{f}{\rho_{\text{tek}}} \int_0^T H(t) \frac{dB(t)}{dt} dt \quad \left( \frac{\text{W}}{\text{g}} \right)$$

### Relaksacijski čas ter izgube;

$$\tau = \frac{\tau_B \tau_N}{\tau_B + \tau_N} \quad \Rightarrow \quad P = \pi \mu_0 \chi_0 H^2 f \frac{2\pi f \tau}{1 + (2\pi f \tau)^2}$$

### Kompleksna susceptibilnost ter izgube;

$$\tan \delta = \frac{\chi''(\omega)}{1 + \chi'(\omega)} \quad \Rightarrow \quad P = \pi \mu_0 H^2 f \chi''$$

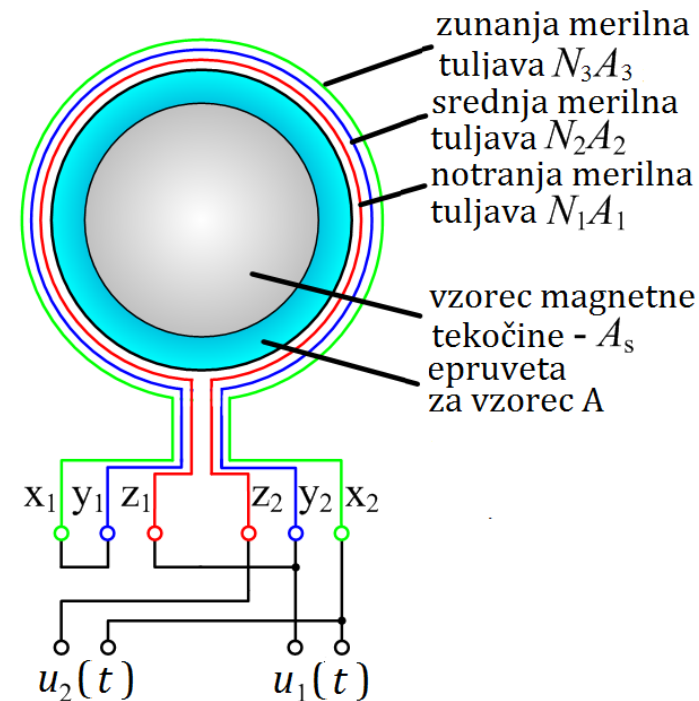
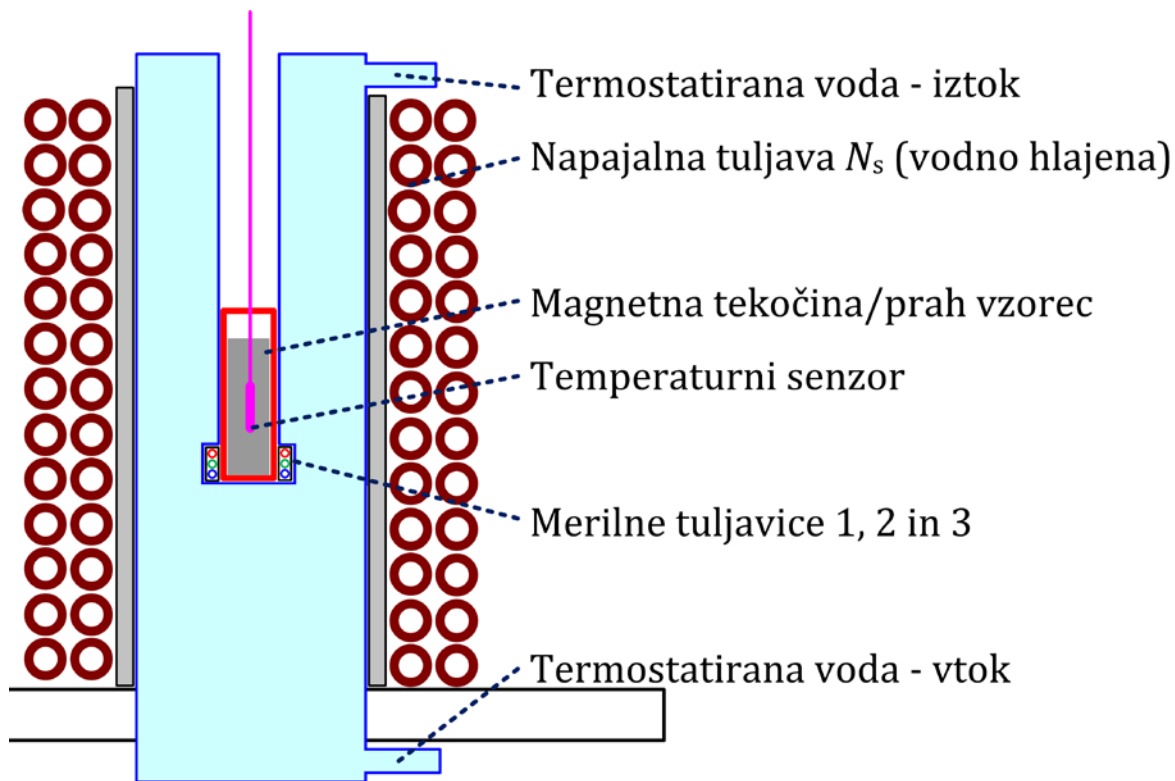
*A Brief History of Time - Stephen Hawking*

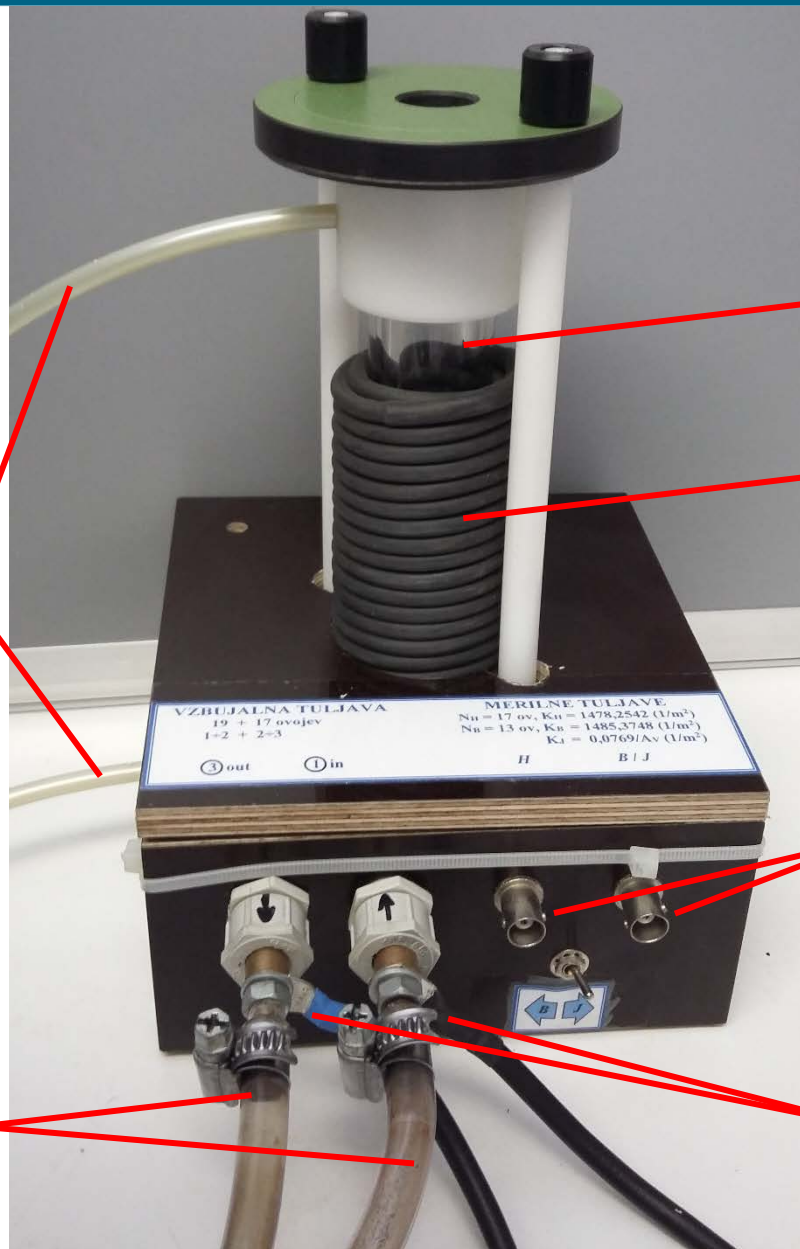
*Someone told me that each equation I included in the book would halve the sales.*





Merilni sistem – od ideje do rešitve.





Termostatska kopel

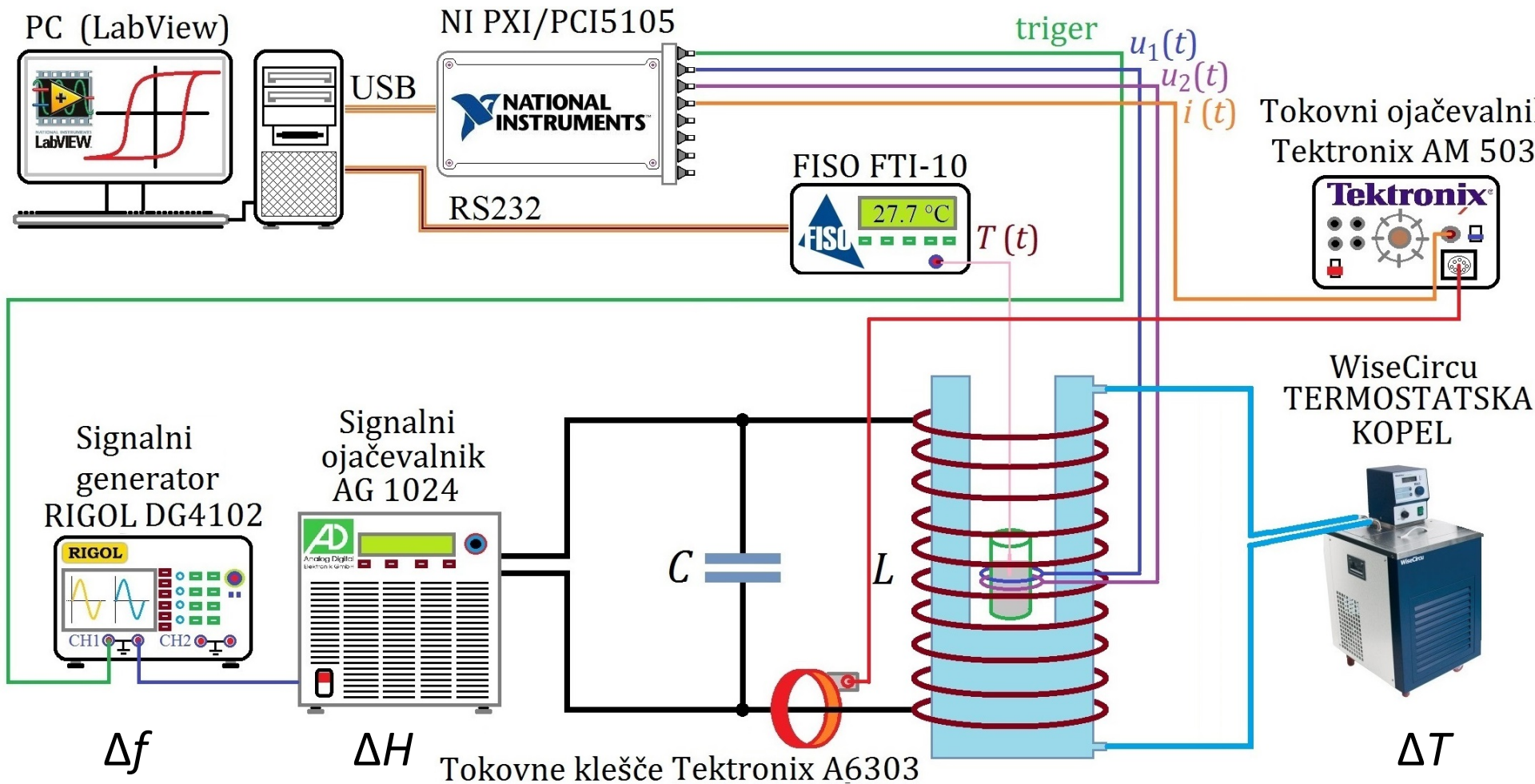
Napajalna tuljava

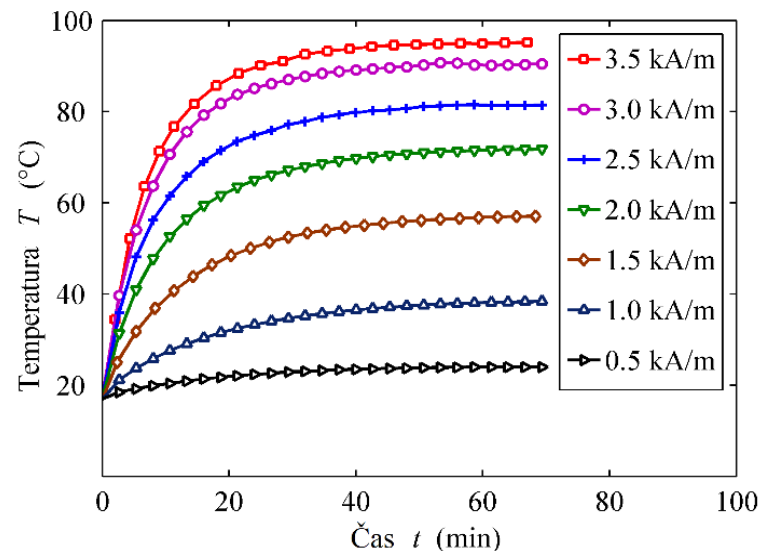
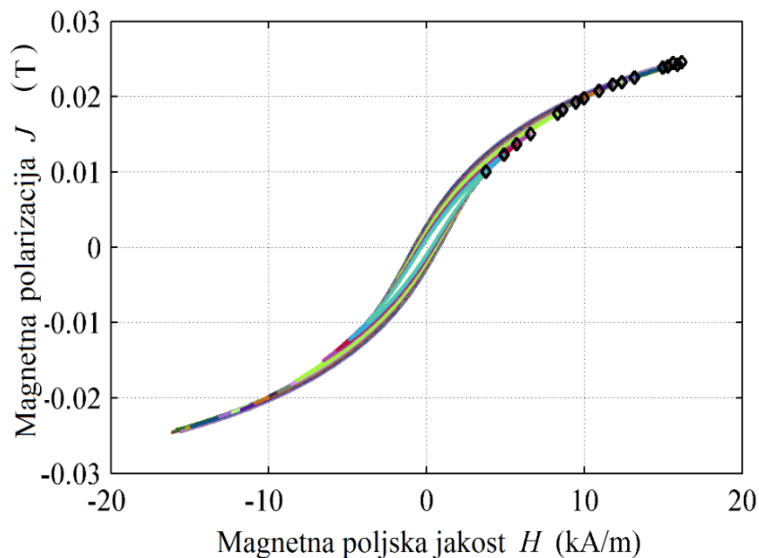
Meritev  $H(t)$  ter  $J(t)$

El. Napajanje  
napajalna tuljava

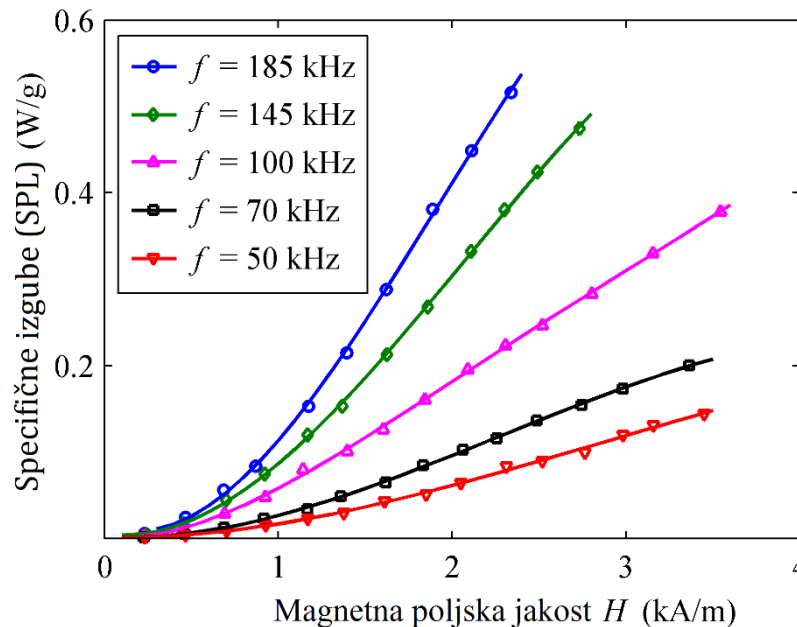
Termostatorana voda  
– iztok  
– vtok

Hladilna voda –  
napajalna tuljava





**ŽELJA; določitev  
moči gretja W/g**



**ČILJ; določena  
moči gretja W/g**

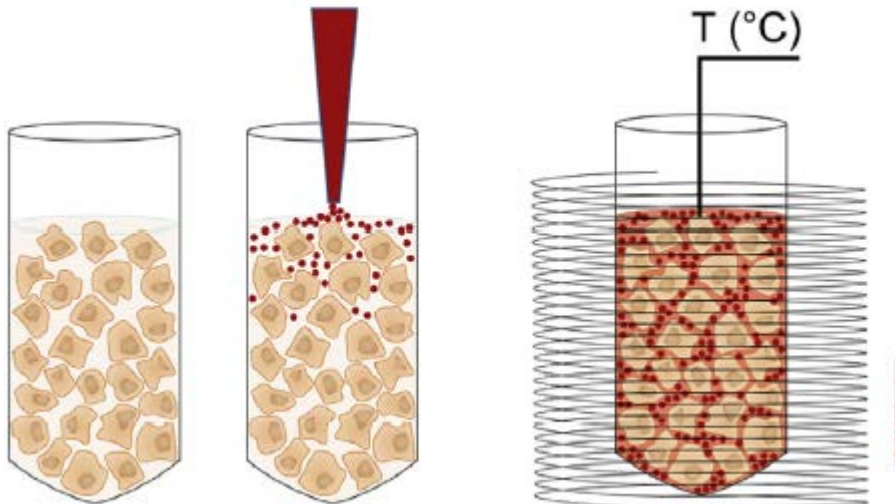
## Realni preizkusi – segrevanje magnetne tekočine v tkivu



### Magnetic hyperthermia efficiency in the cellular environment for different nanoparticle designs



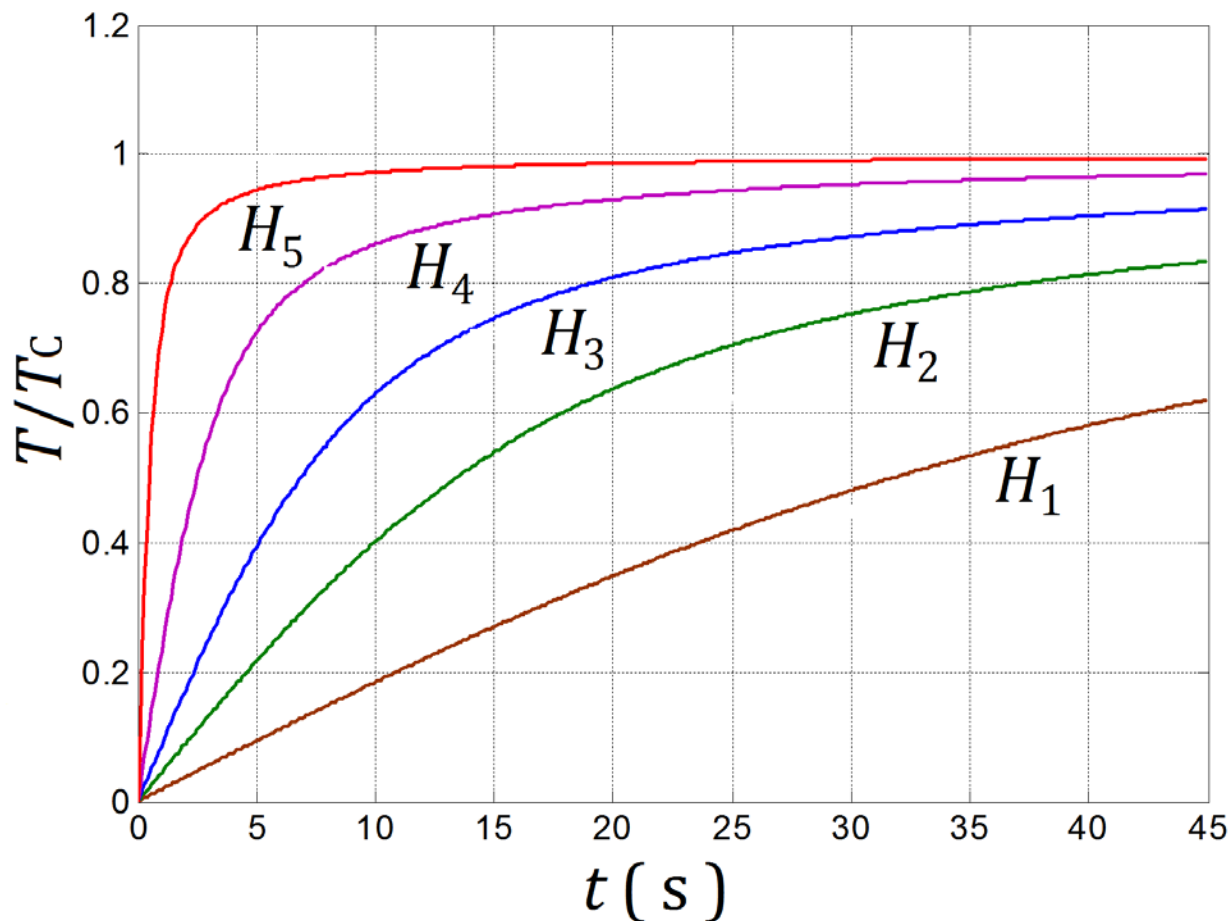
Riccardo Di Corato<sup>a</sup>, Ana Espinosa<sup>a</sup>, Lenaic Lartigue<sup>a</sup>, Mickael Tharaud<sup>b</sup>, Sophie Chat<sup>c</sup>,  
Teresa Pellegrino<sup>d</sup>, Christine Ménager<sup>e</sup>, Florence Gazeau<sup>a</sup>, Claire Wilhelm<sup>a,\*</sup>



**FERI-LAE  
MF-UL-  
IJS – K7**

Samoregulacija (Hipertermija 42 ~46 °C)

Ustvariti material, ki ima točno definiran  $T_C$ , s tem bo segrevanje doseglo samo-regulacijski učinek pri  $T_C$  ne glede na amplitudo polja!



**FERI - LAE  
 FKKT - LAK**

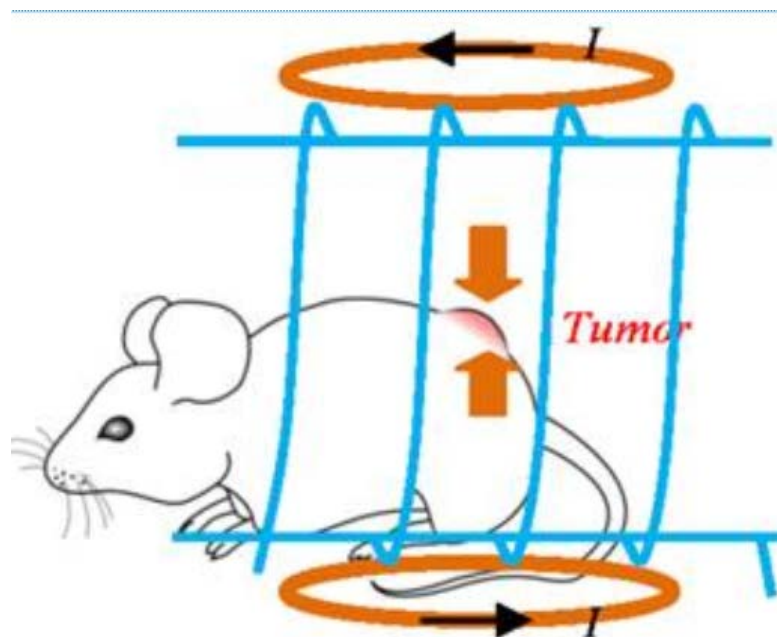
*Theranostics* 2012; 2(1):113-121. doi:10.7150/thno.3854

[PDF](#)

Research Paper

## Magnetic Nanoparticle-Based Hyperthermia for Head & Neck Cancer in Mouse Models

Qun Zhao<sup>1,2</sup> , Luning Wang<sup>1,2</sup>, Rui Cheng<sup>3</sup>, Leidong Mao<sup>3</sup>, Robert D. Arnold<sup>4</sup>, Elizabeth W. Howerth<sup>5</sup>, Zhuo G. Chen<sup>7</sup>, Simon Platt<sup>6</sup>





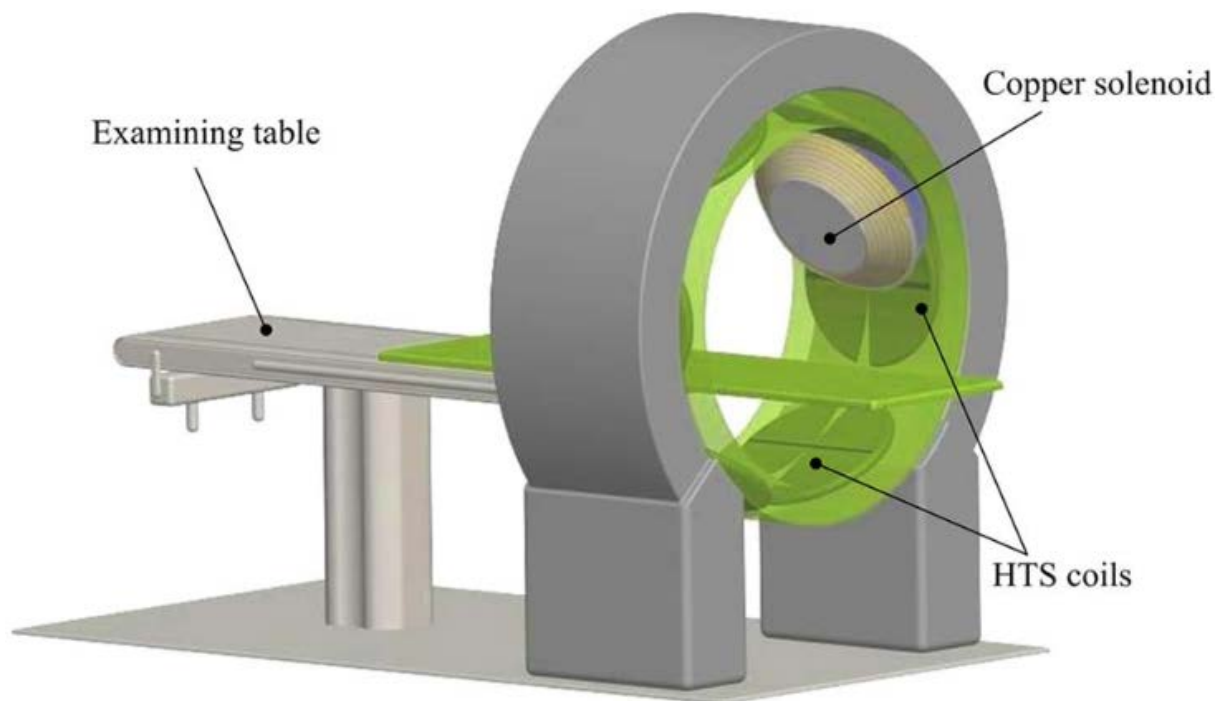
Realni preizkusi – načrtovanje sistema za izvajanje zdravljenja

IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 23, NO. 3, JUNE 2013

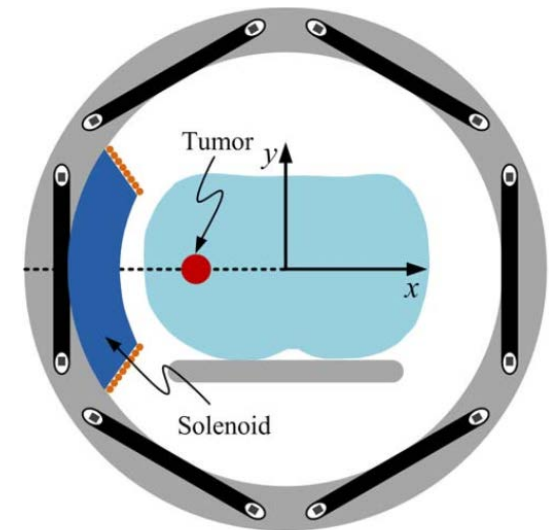
4400104

# A Novel Targeted Magnetic Fluid Hyperthermia System Using HTS Coil Array for Tumor Treatment

Linni Jian, *Member, IEEE*, Yujun Shi, Jianing Liang, *Member, IEEE*, Cheng Liu, and Guoqing Xu



Realni parametri polja,  
 $H, f$ .



Hvala za pozornost  
ter lep  
 $\cdot 10^{-9}$  dan  
še naprej!