



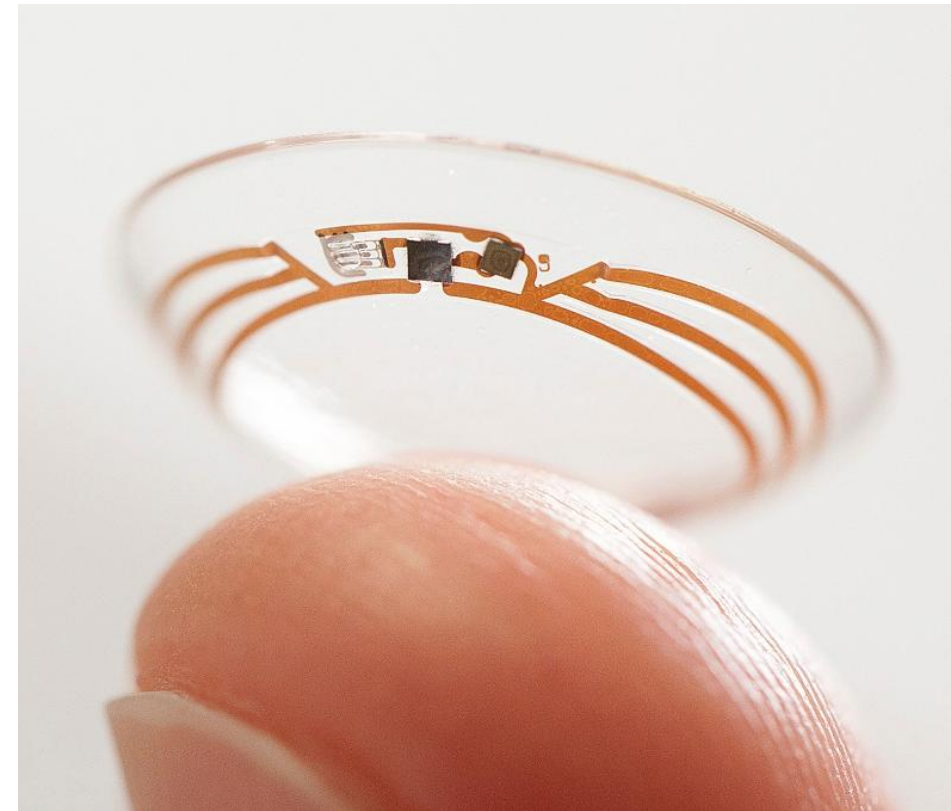
UNIVERZA
V LJUBLJANI

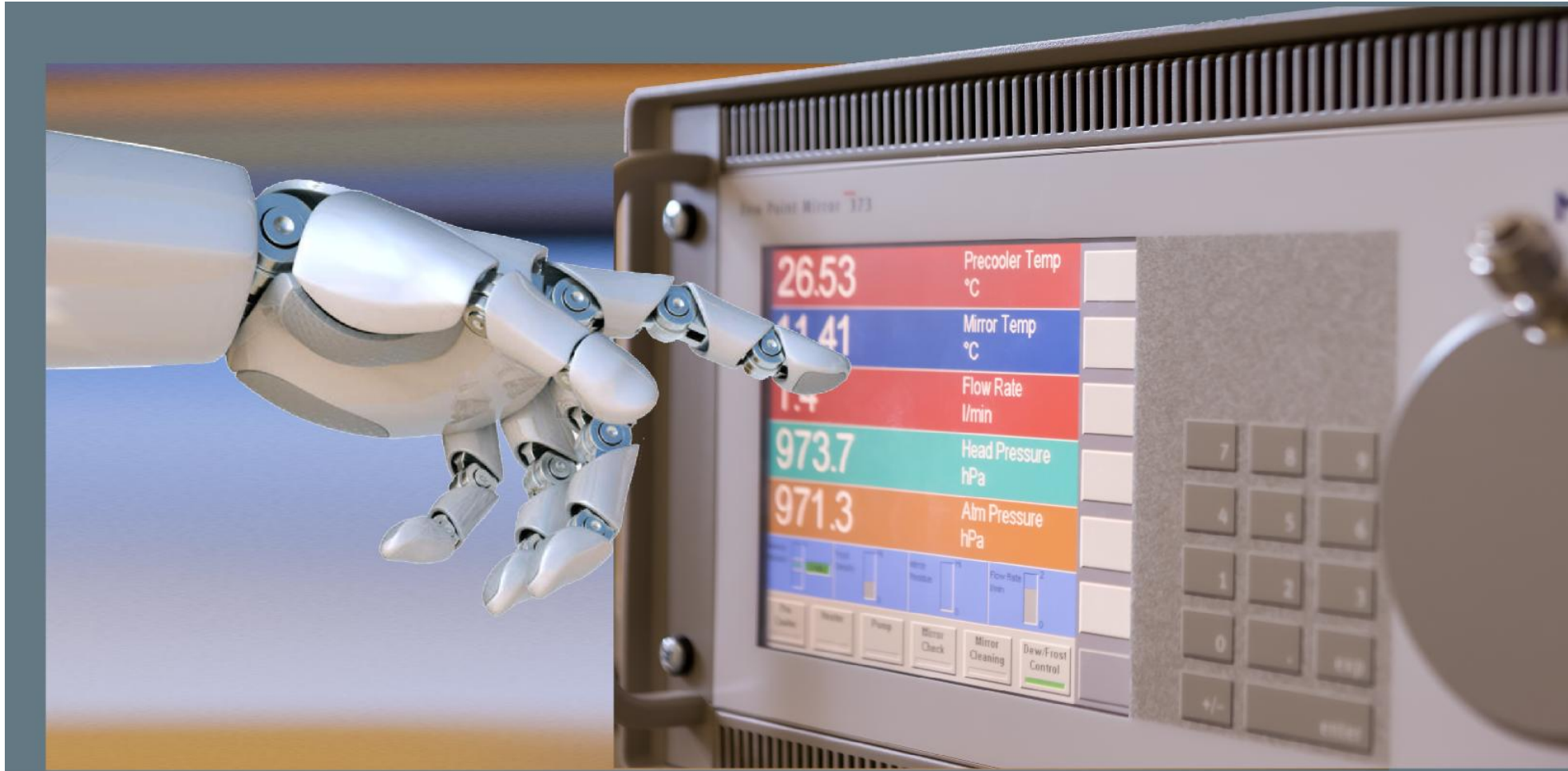
Kako točno meriti človeka skozi interdisciplinarno meroslovje

Gregor Geršak

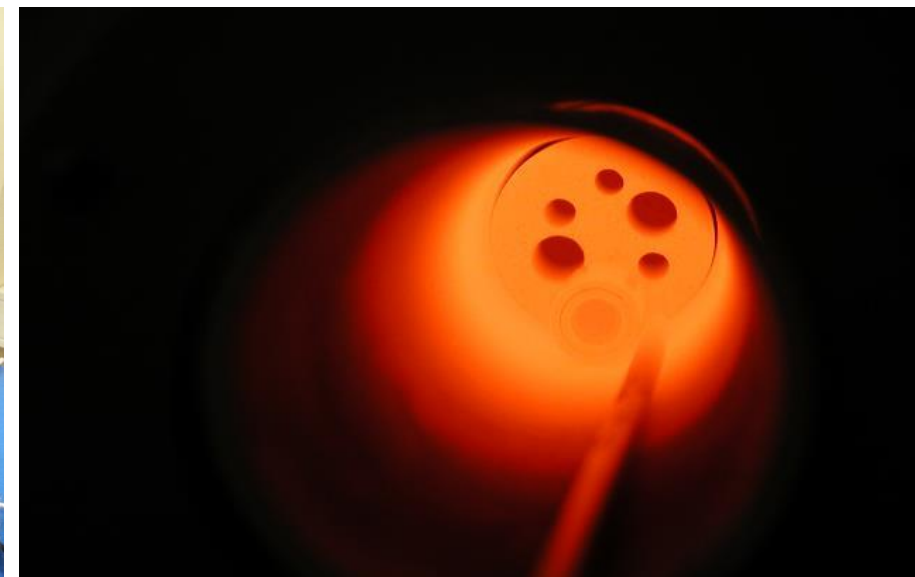
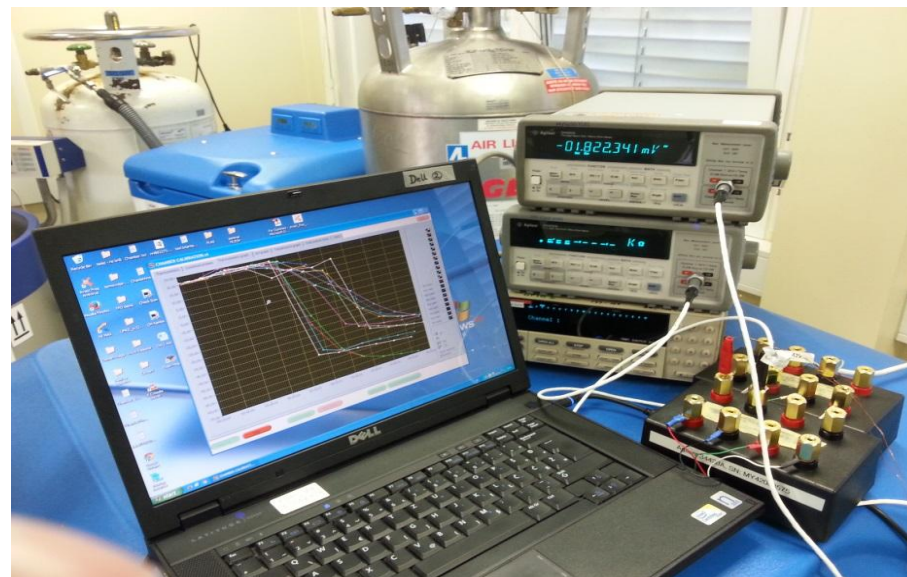
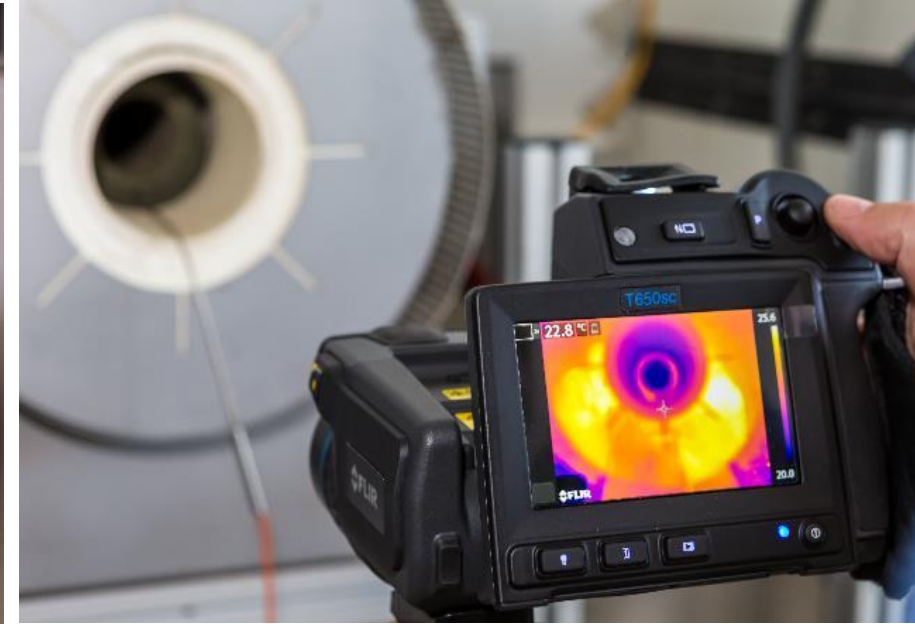
Laboratorij za metrologijo in kakovost
Fakulteta za elektrotehniko

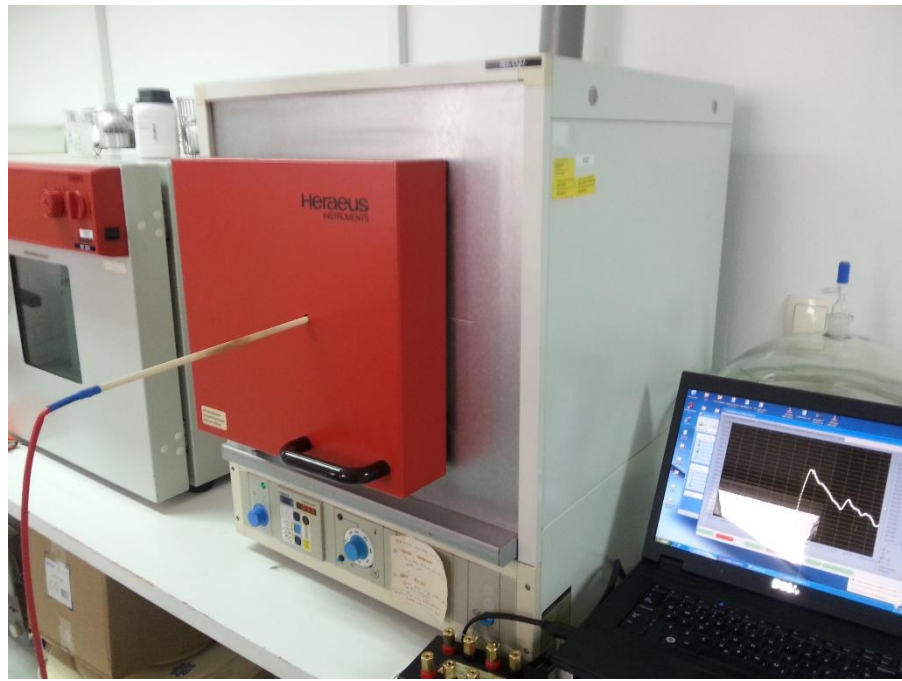
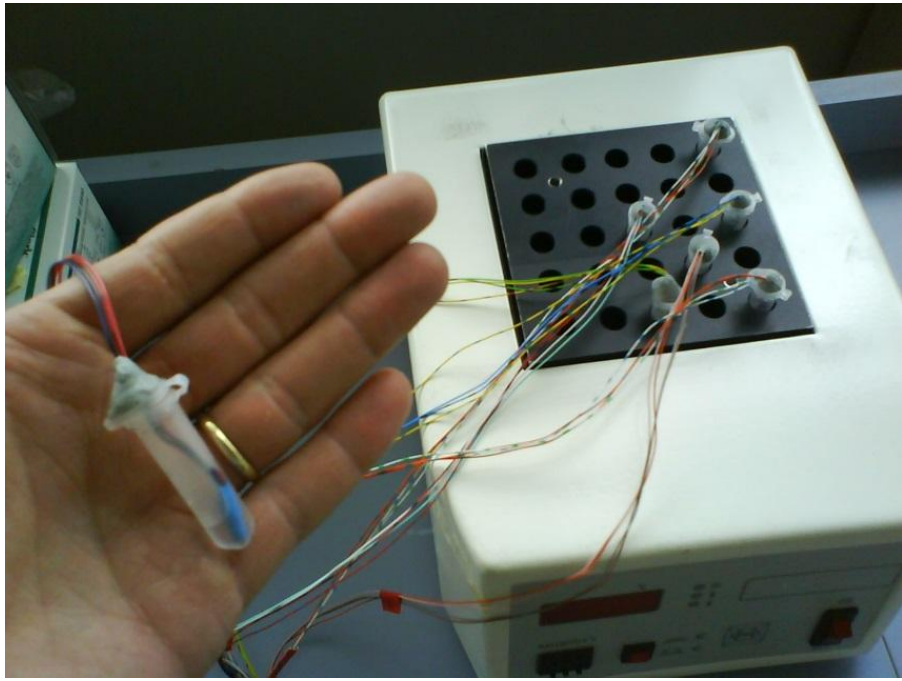
Med generacijami in tehnologijo : tradicija in
prihodnost meroslovja, Portorož, 19.3.2026





Nosilec
nacionalnega
etalona
za temperaturo
in relativno
vlažnost

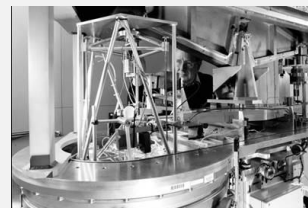
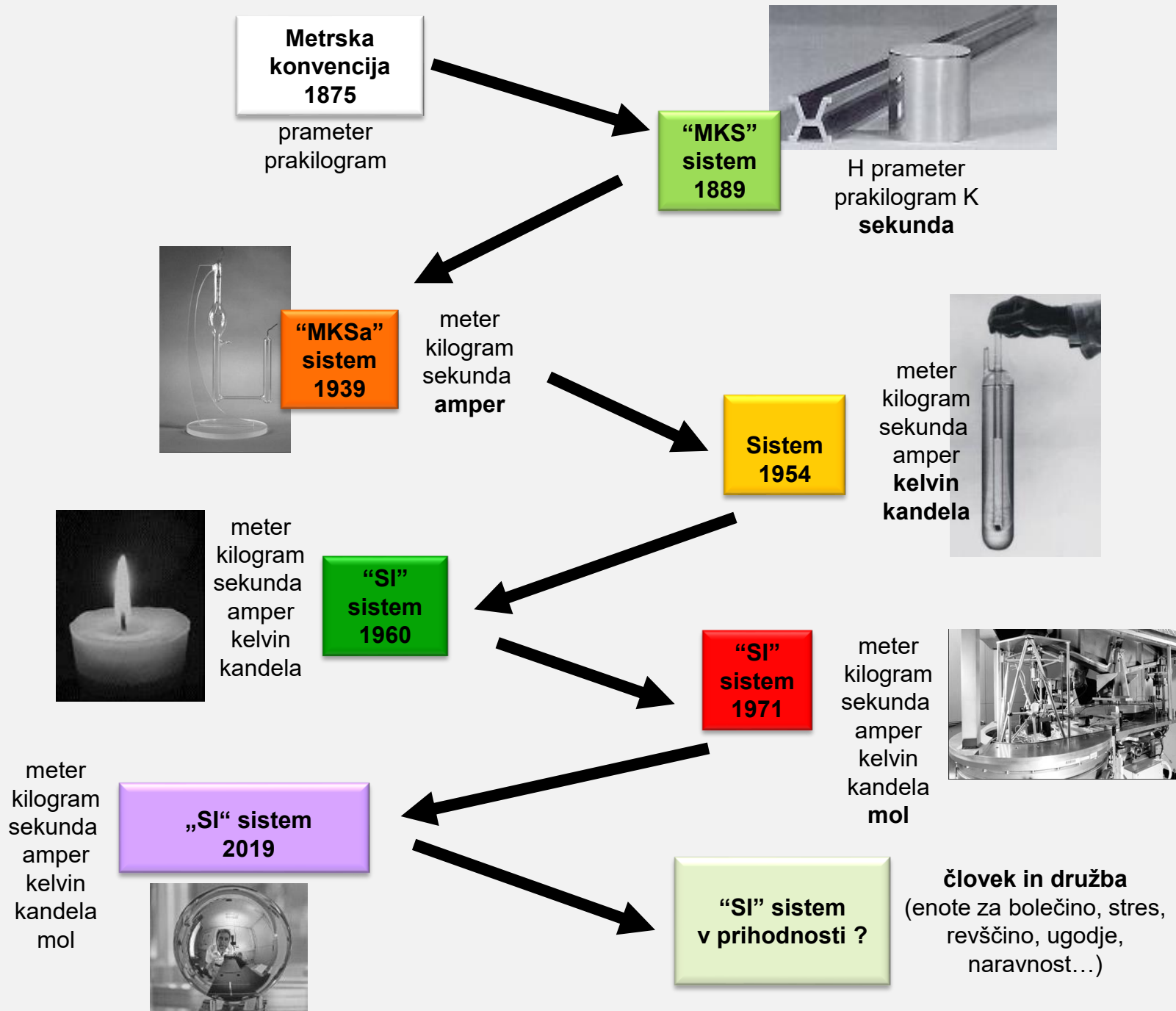




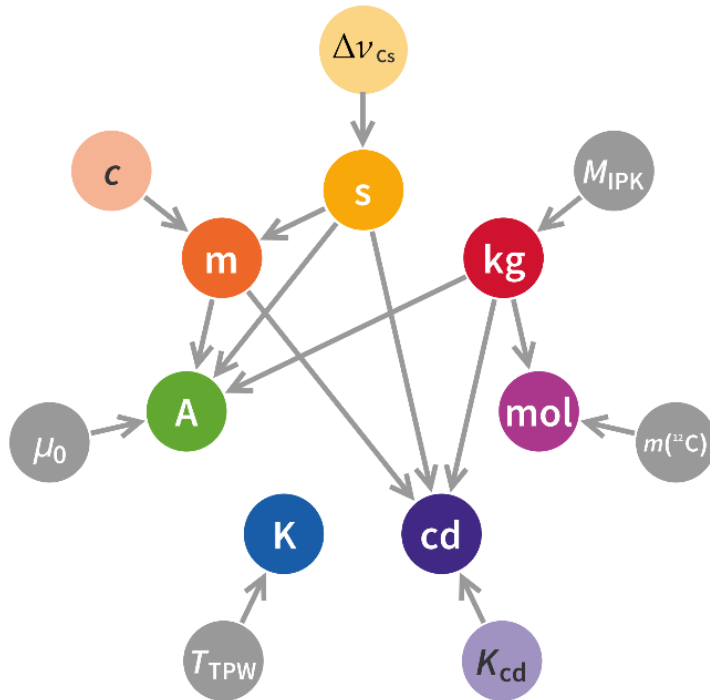
Vsebina

- Človek v SI sistemu enot
- Sledljiva merjenja v medicini
- Primeri merjenj v aplikativni fiziologiji



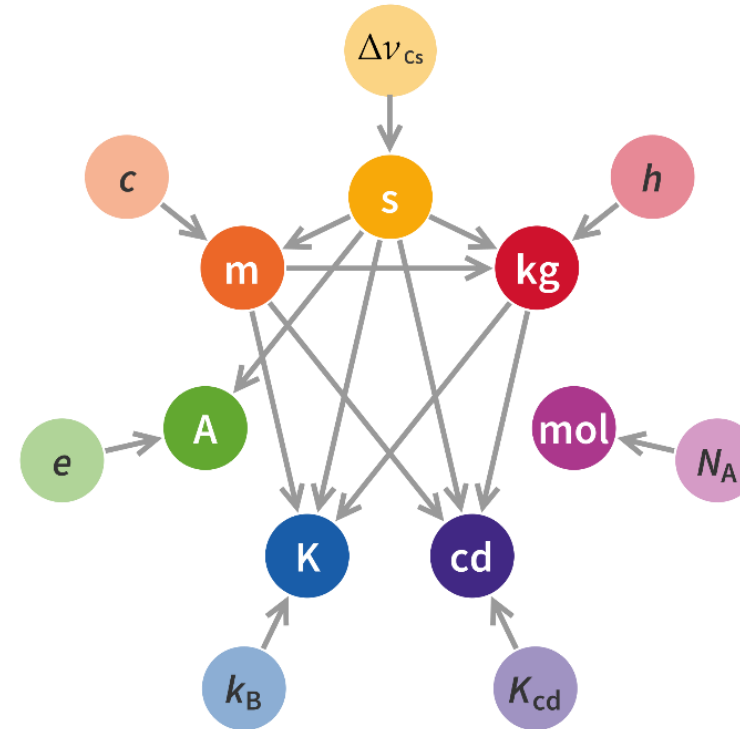


pred 2019



konstanta	vrednost	Relativna standardna negotovost
h	$6,626070150(69) \times 10^{-34} \text{ Js}$	$1,0 \times 10^{-8}$
e	$1,6021766341(83) \times 10^{-19} \text{ C}$	$5,2 \times 10^{-9}$
k	$1,38064903(51) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	$3,7 \times 10^{-7}$
N_A	$6,022140758(62) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$1,0 \times 10^{-8}$

po 2019



konstanta	vrednost	Relativna standardna negotovost
h	$6,62607015 \times 10^{-34} \text{ Js}$	0
e	$1,602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$	0
k	$1,380649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	0
N_A	$6,02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	0

Sodobna metrologija temelji na fizikalnih konstantah



Definicija sekunde

The second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the **caesium frequency $\Delta\nu_{\text{Cs}}$** , the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium-133 atom, to be 9192631770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s^{-1} .

Definicija metra

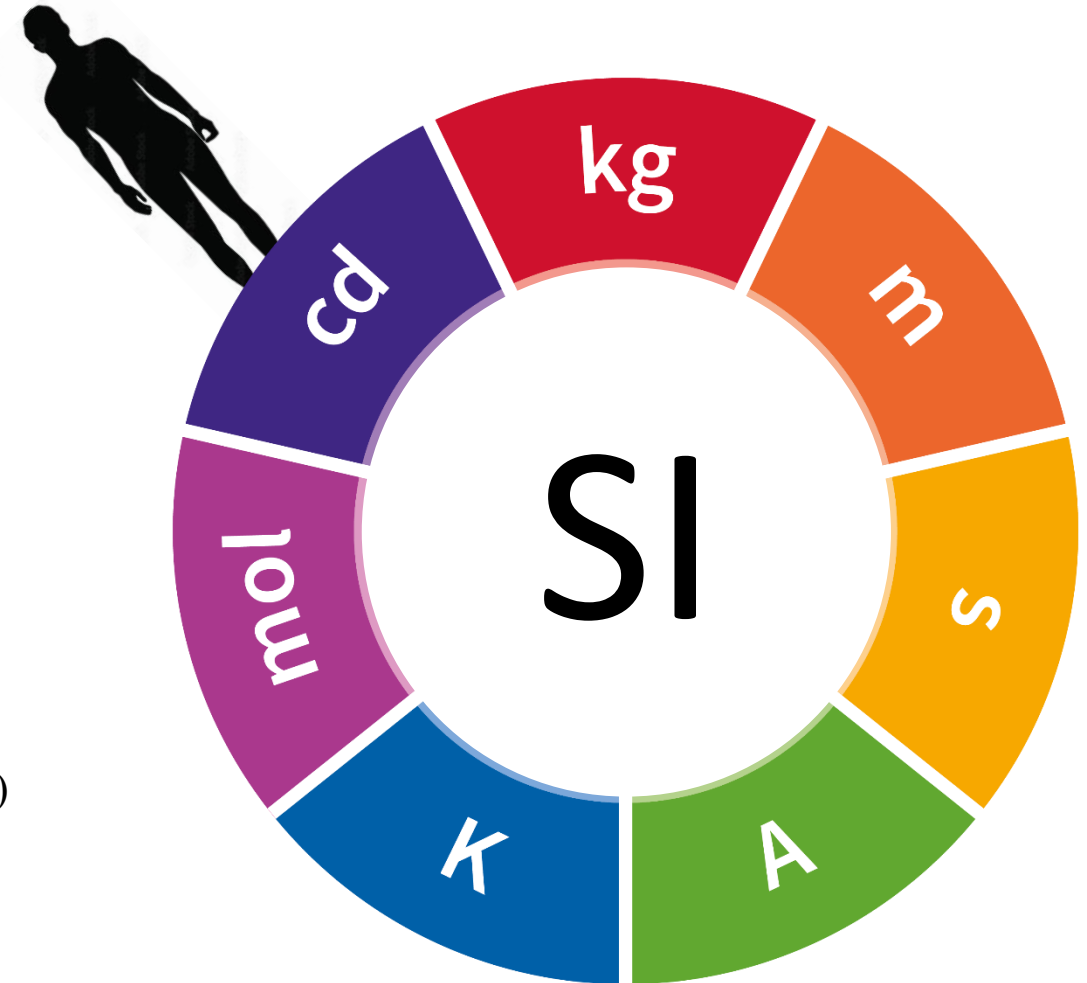
The metre, symbol m, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the **speed of light in vacuum c** to be 299792458 when expressed in the unit $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, where the second is defined in terms of the caesium frequency $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Definicija kilograma

The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the **Planck constant h** to be $6.62607015 \times 10^{-34}$ when expressed in the unit $\text{J}\cdot\text{s}$, which is equal to $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, where the metre and the second are defined in terms of c and $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Definicija kelvina

The kelvin, symbol K, is the SI unit of thermodynamic temperature. It is defined by taking the fixed numerical value of the **Boltzmann constant k** to be 1.380649×10^{-23} when expressed in the unit $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$, which is equal to $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h , c and $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.



Units for quantities that describe biological effects in (BIPM, 2006) states “Units for quantities that describe biological effects are often difficult to relate to units of the SI because they typically involve weighting factors that may not be precisely known or defined, and which may be both energy and frequency dependent.”

Definicija kandelega

Kandela, cd, je SI enota svetilnosti v določeni smeri. Kandela je svetilnost vira, ki oddaja monokromatsko sevanje frekvence 540×10^{12} Hz in ima sevalno jakost v tej smeri $1/683$ W/sr.

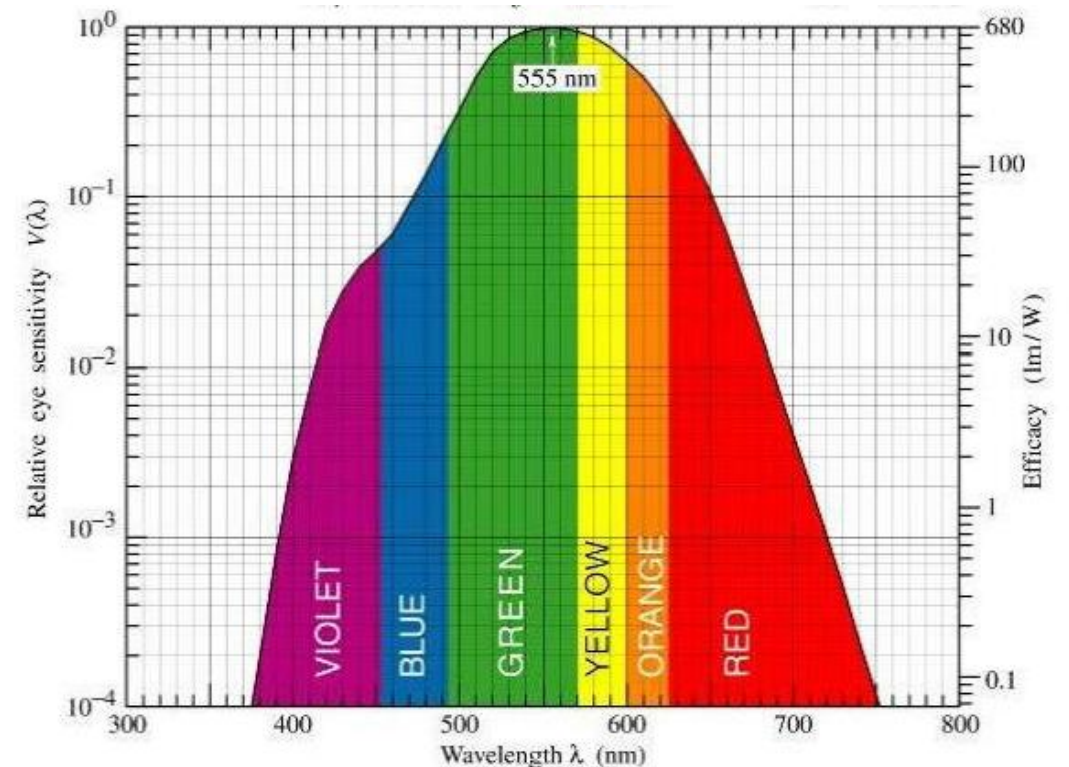
Definirana je tako, da fiksno številčno vrednost svetlobne učinkovitosti monokromatskega sevanja frekvence 540×10^{12} Hz, Kcd, vzamemo kot 683, ko je izražena v enoti $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$, kar je enako $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ ali $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$, kjer so kilogram, meter in sekunda definirani v smislu h, c in $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

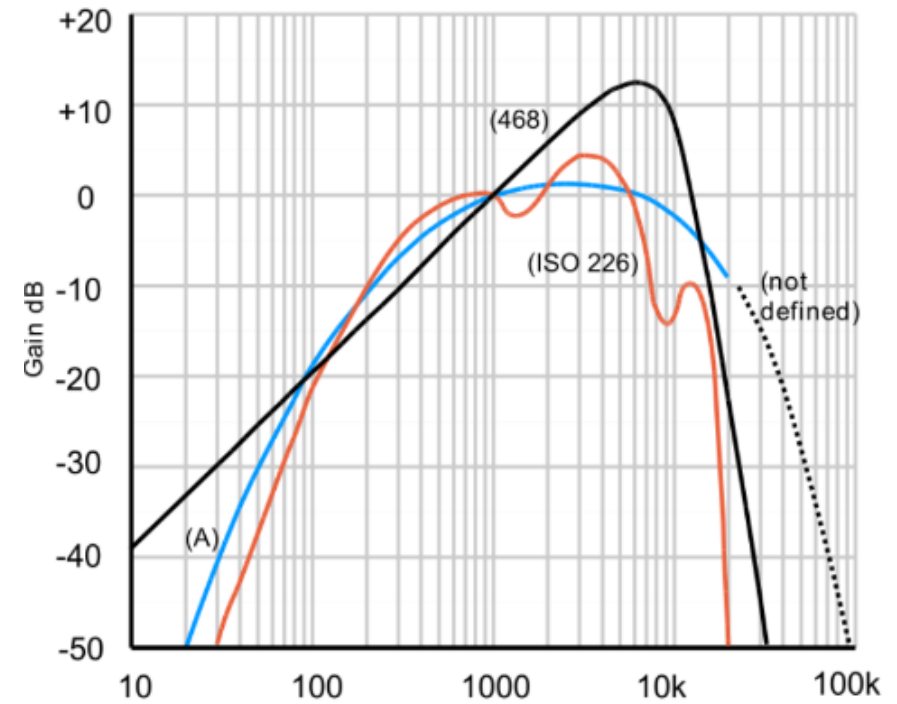
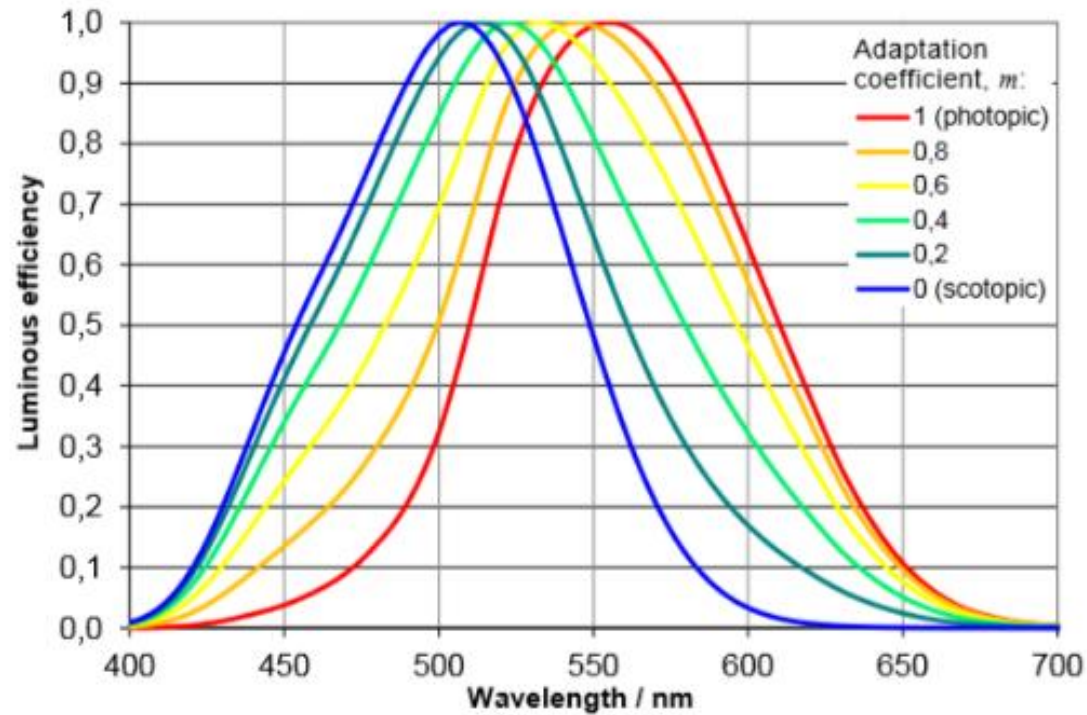


fotometrija - radiometrija

$V(\lambda)$ - spektralna občutljivost človeškega očesa

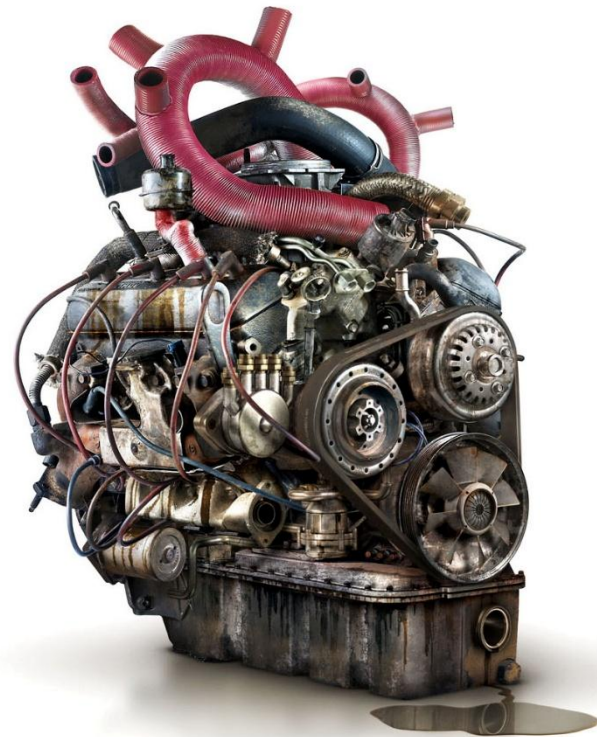
International Commission on Illumination – CIE:
Preiskovancem so prikazali **monokromatsko svetlobo**. Primerjali so jo z referenčno svetlobo (običajno pri **555 nm**, kjer je oko najbolj občutljivo). Udeleženec je nastavljal jakost, dokler ni zaznal **enake svetlosti**.





Utežene funkcije, ki opisujejo tipično človeško zaznavo svetlobe in zvoka.

Ali metrologija vključuje človeka?



Biomedicinski merilni instrumenti

Merijo parametre:

- Fizikalni (telesna masa, telesna temperatura)
- Kemijski (pH krvi , število eritrocitov, koncentracija hemoglobina, nasičenost krvi s kisikom)
- Fiziološki
 - Kardiovaskularni parametri (frekvenca srčnega utripa, krvni tlak, pretok krvi)
 - respiratorni parametri (amplituda dihanja, frekvenca dihanja)
 - Drugo (prevodnost kože, premer zenice, EEG, EMG, EOG)

Posebnosti metrologije medicinskih naprav



Primarnih etalonov (referenčnih ljudi) ni.

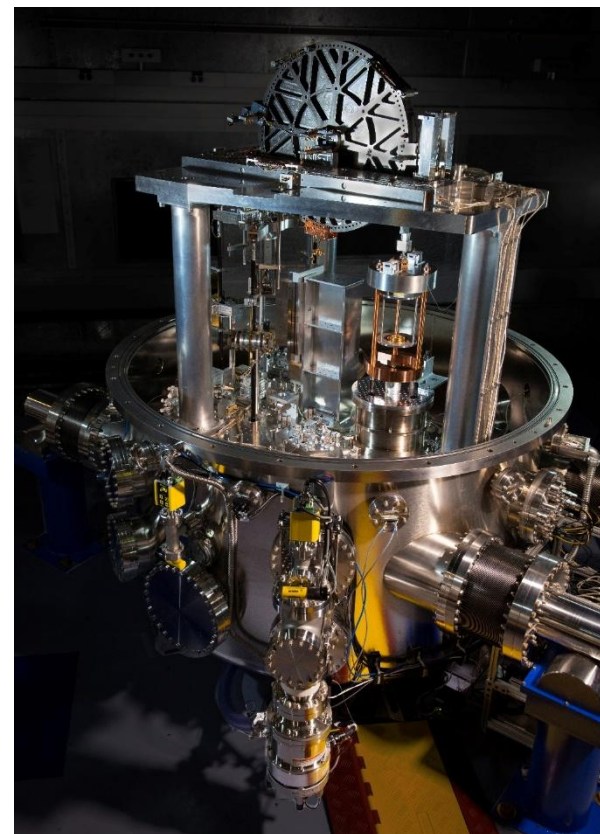
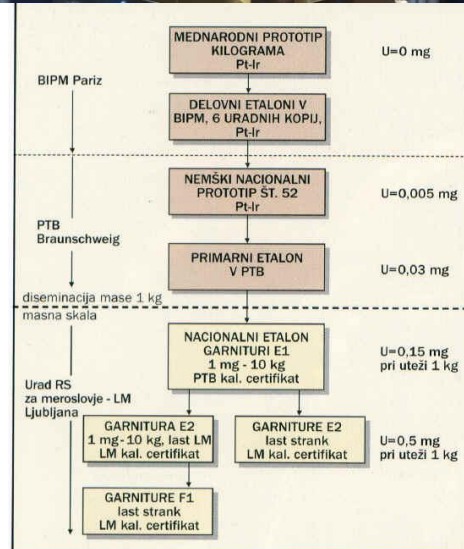
Ljudje niso etaloni, in sicer zaradi intra-individualnih in inter-individualnih razlik.

Naravna variabilnost merjenih parametrov.

Sledljivost medicinskih naprav z merilno funkcijo

SLEDLJIVOST V FIZIKI, KEMIJI	SLEDLJIVOST V MEDICINI		
	Tip I	Tip II	Tip III
Primarni etalon	Primarni etalon	Baza fizioloških testnih signalov	Ena, klinično validirana naprava
Referenčni etalon	Referenčni etalon	Testna naprava (sledljiva na primarne etalone)	Prenosniški etalon (sledljiv na primarne etalone)
Delovni etalon	Delovni etalon		
Merilna naprava	Merilna naprava	Merilna naprava	Merilna naprava

Sledljivost fizikalnih veličin



Sledljivost Tipa I

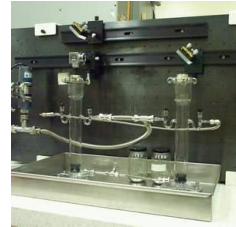
Tip I

Primarni etalon

Referenčni etalon

Delovni etalon

Merilna naprava



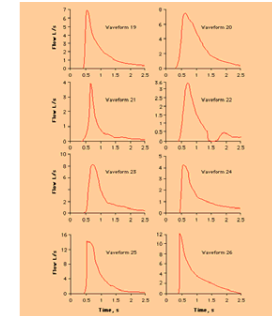
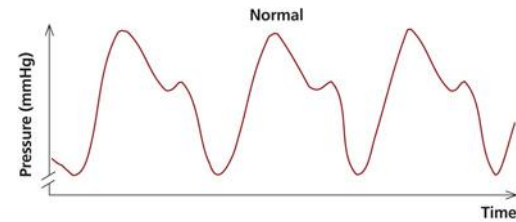
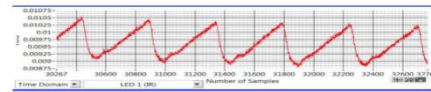
Sledljivost Tipa II

Tip II

Baza fizioloških
testnih signalov

Testna naprava
(sledljiva na
primarne etalone)

Merilna naprava



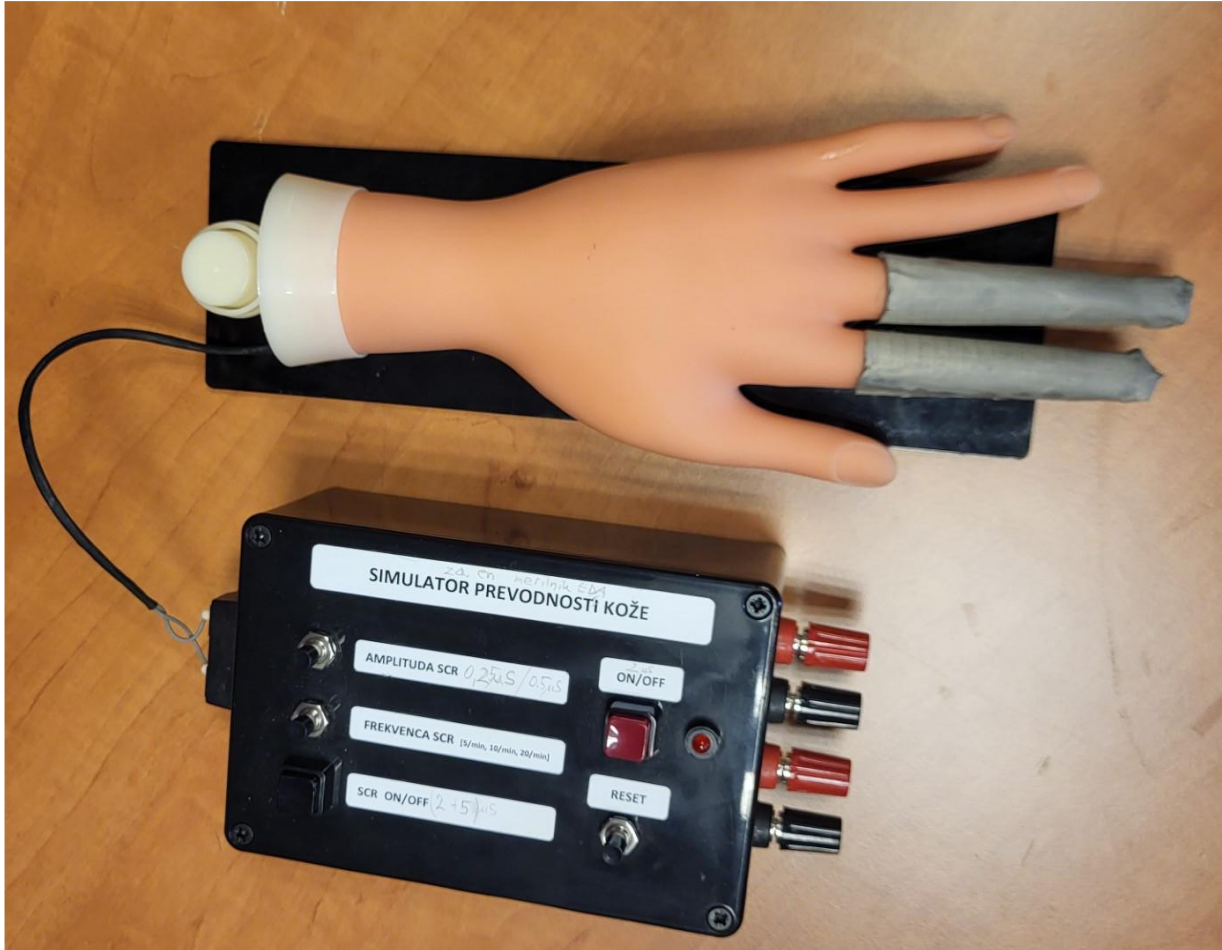
oksimeter (SpO2)

oscilometrični merilnik
krvnega tlaka

Testni generator –
kalibrana črpalka

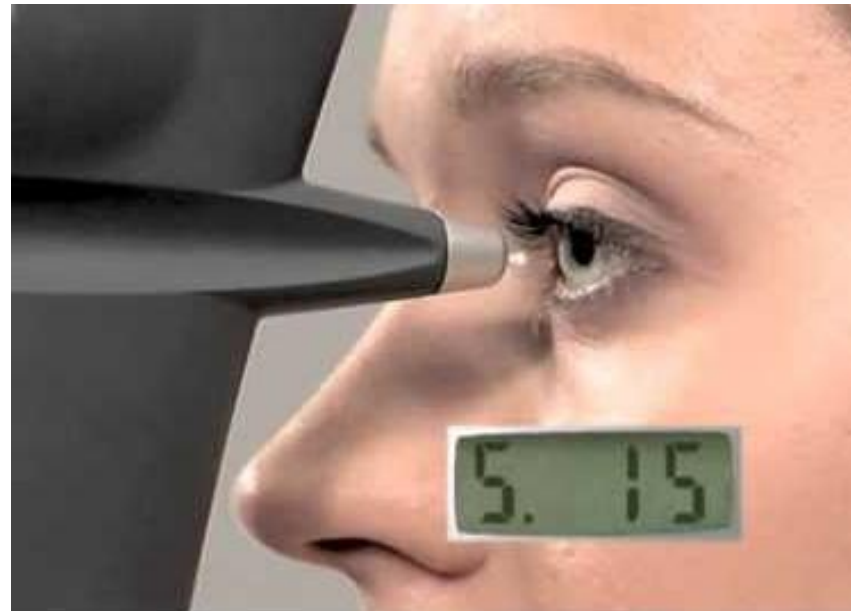


spirometer



Sledljivost Tipa III

Tip III
Ena, klinično validirana naprava
Prenosniški etalon (sledljiv na primarne etalone)
Merilna naprava



Prenosniški etalon – avtomatska loputa, klinično testirana na 150 očeh



Tonometer (air puff)

Interdisciplinarno meroslovje

Soft metrology

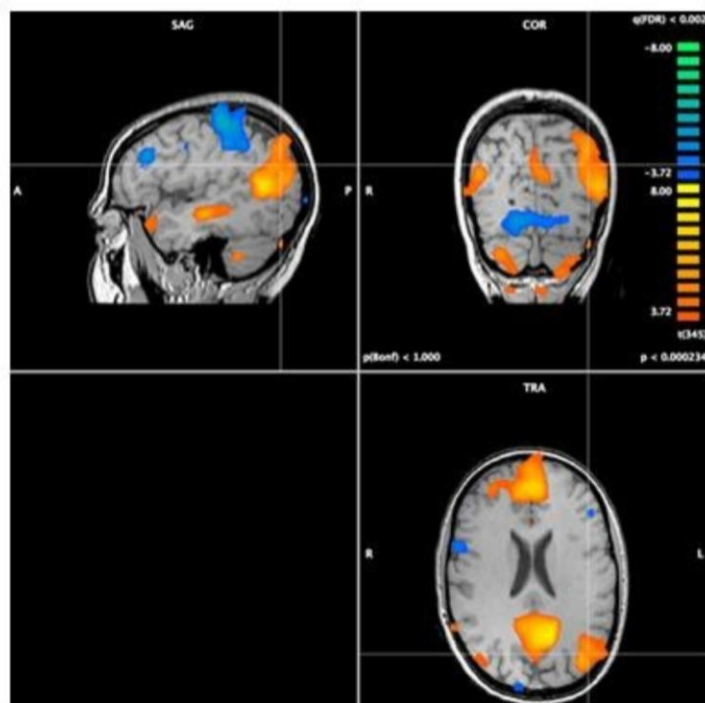
Sensory metrology

Perception-based metrology

Psihofiziologija

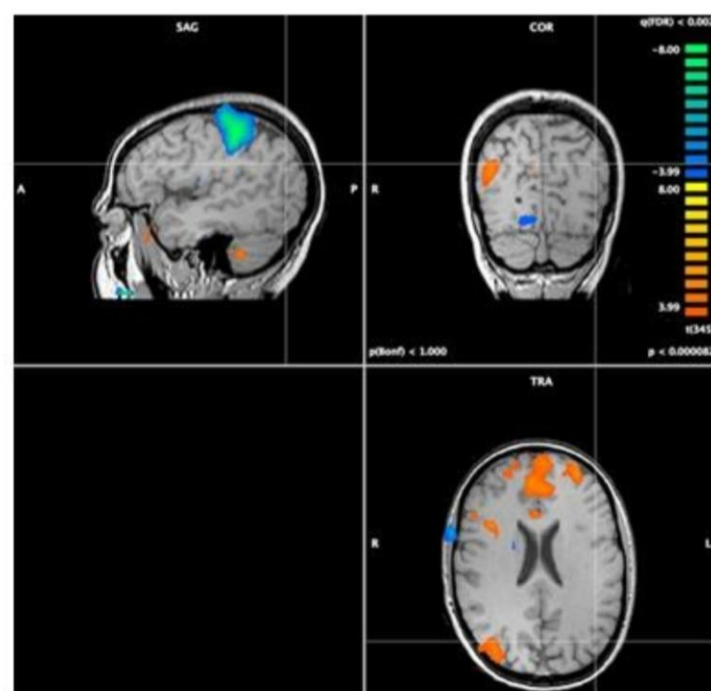


Ali je ta tekstura lepa ?



Čustva - rumeno

Ali je ta tekstura naravna ?



Industrija

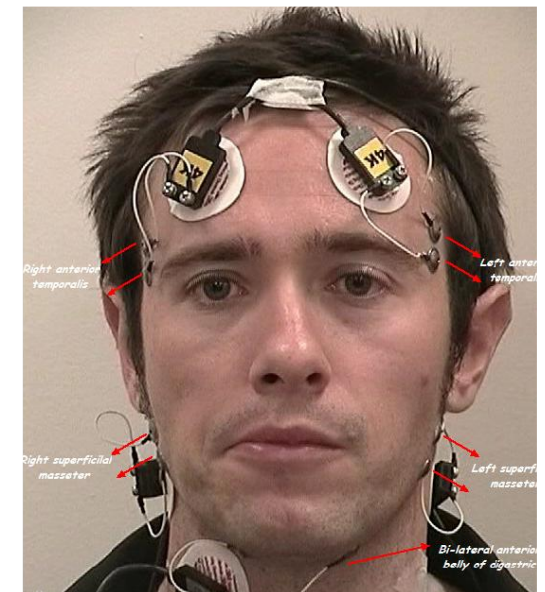
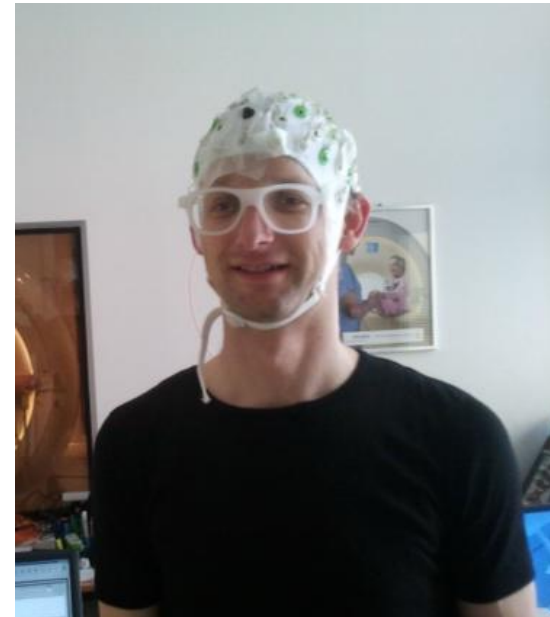
poleg fizikalno-kemičnih lastnosti izdelkov jo zanima tudi subjektivna zaznava le-teh v očeh človeka (kupca)

- avtomobilska industrija (BMW, Fiat, VW)
- proizvajalci pohištva in gradbenega materiala (Ikea)
- izdelovalci specifičnih vonjav (Mercedes Benz, Jaguar)
- oblikovalci zvoka (Porsche, Zippo)
- prehranska industrija (Getorade, McDonald's)



Merjenje človeka

- Fizikalni parametri
(premikanje, poraba energije, HF...)
- Psihofiziologija
(EDA, HR, BP, EMG, dihanje, zenica, IRT...)
- Nevrofiziologija
(EEG, fMRI, MEG, fNIRS...)



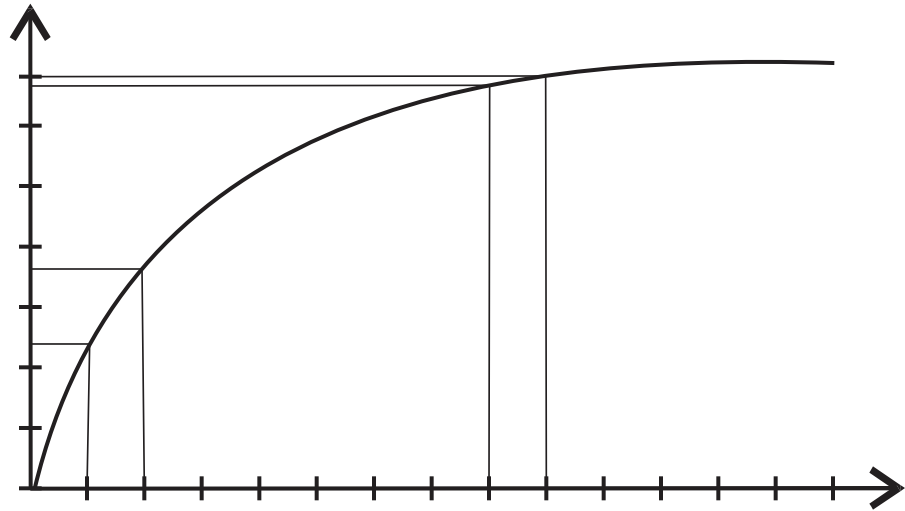
Človek kot merilni instrument

- merjenje kakovosti zraka v prostoru,
- merjenje občutka ugodja zaradi dotikanja različnih tekstur površin, merjenje naravnosti materialov,
- merjenje pomirjevalnega učinka glasbe itd



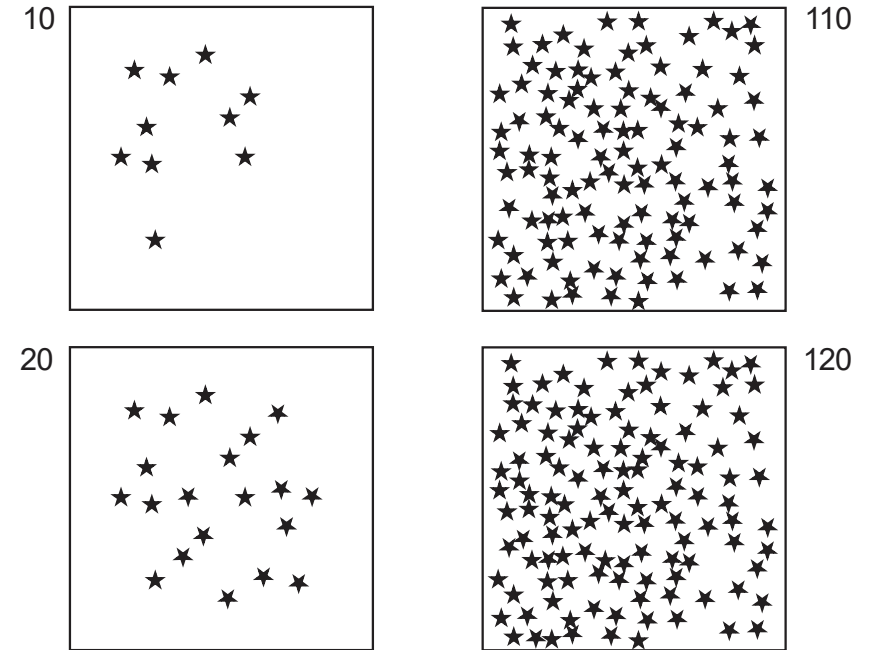
Človeška čutila

percepcija

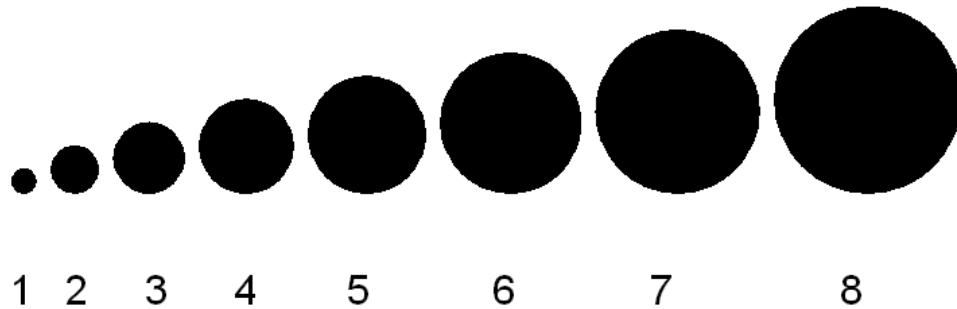


stimulus

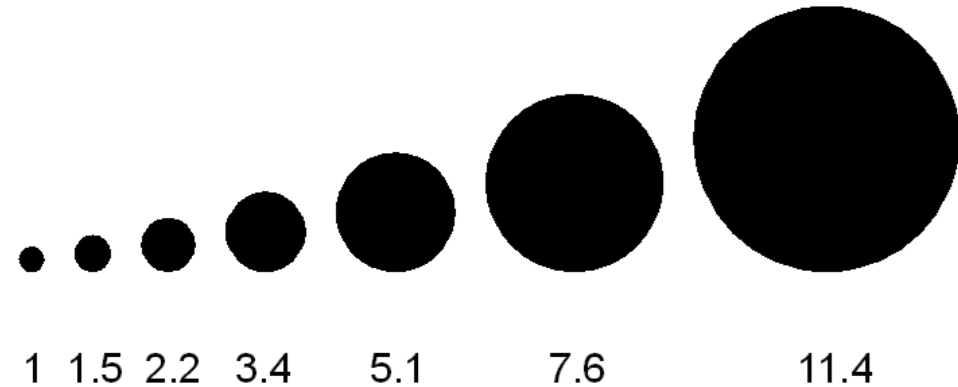
(Fechner)



Človeška čutila



Premer krogov raste linearno
(vsak je za 1 večji od prejšnjega).

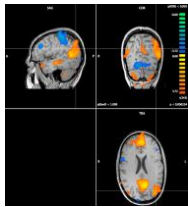


Premer krogov raste nelinearno
(vsak je 50 % večji od prejšnjega).

Naša percepcija rasti kroga je, da na levi začnejo rasti hitro in nato upočasnijo. Razlika med 1 in 2 se zdi večja kot med 7 in 8. Krogi na desni dajejo vtis, da nenehno rastejo.

Primeri senzoričnih merjenj, kjer je bilo potrebno meroslovje

Merjenje občutkov med opazovanjem vzorcev



slika aktivnosti možganov



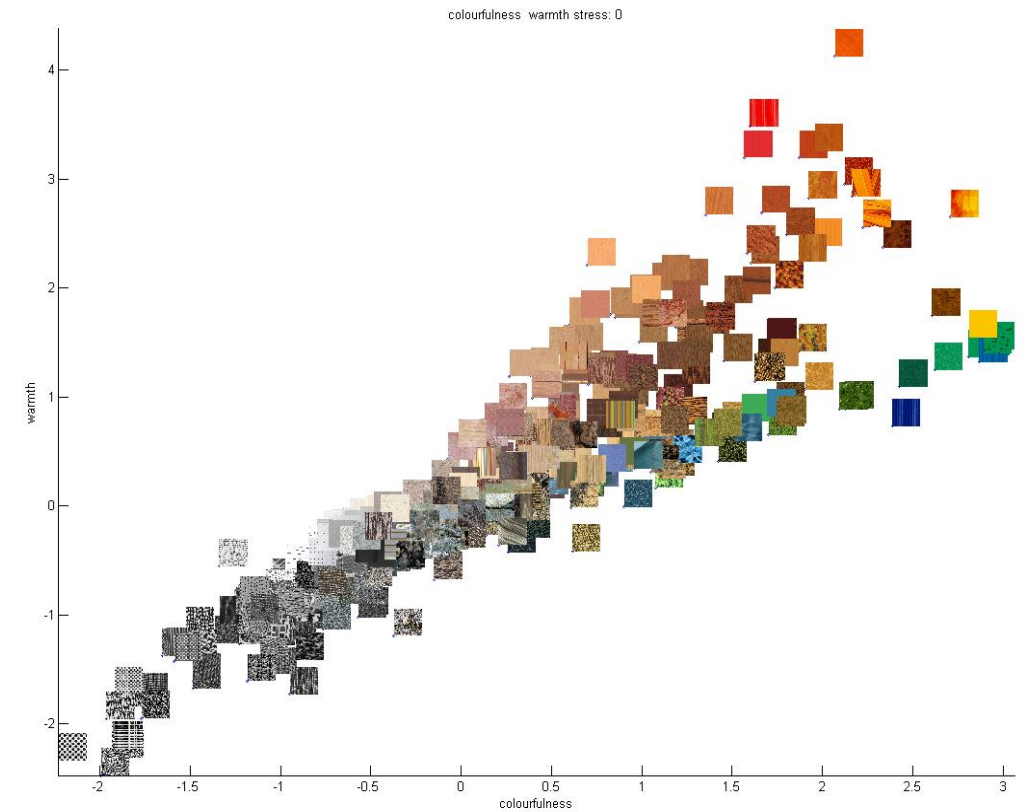
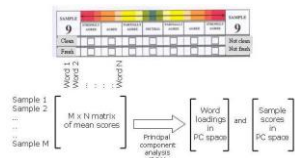
lastnosti vzorca



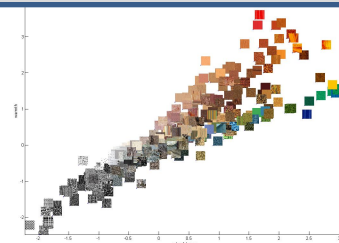
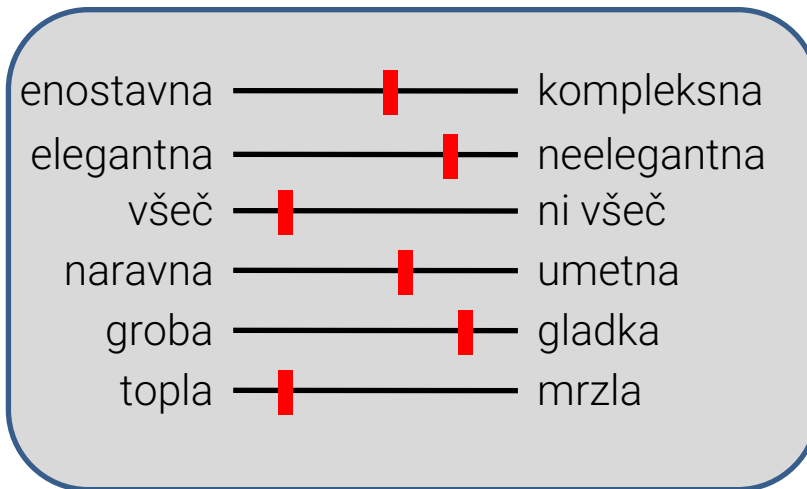
obrazne mišice



vprašalniki



Ustvarjanje teksture za določene občutke



Merjenje stresa z EDA

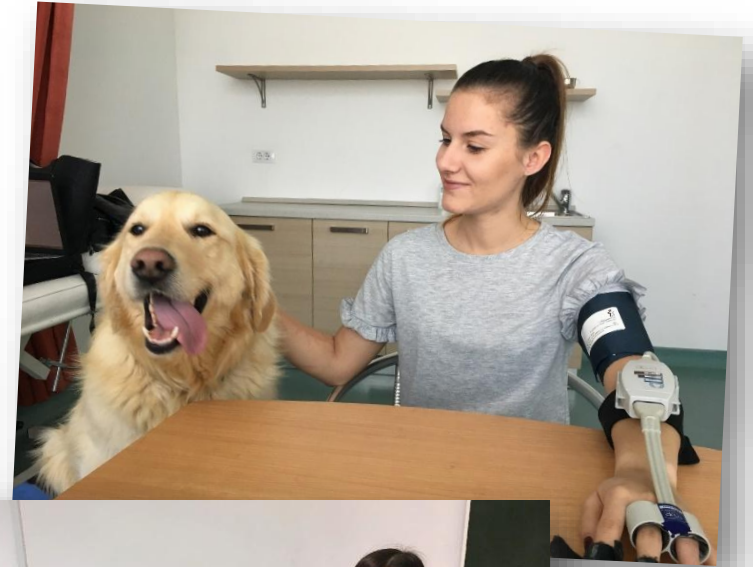


Vpliv posturalnih perturbacij na stresni odziv

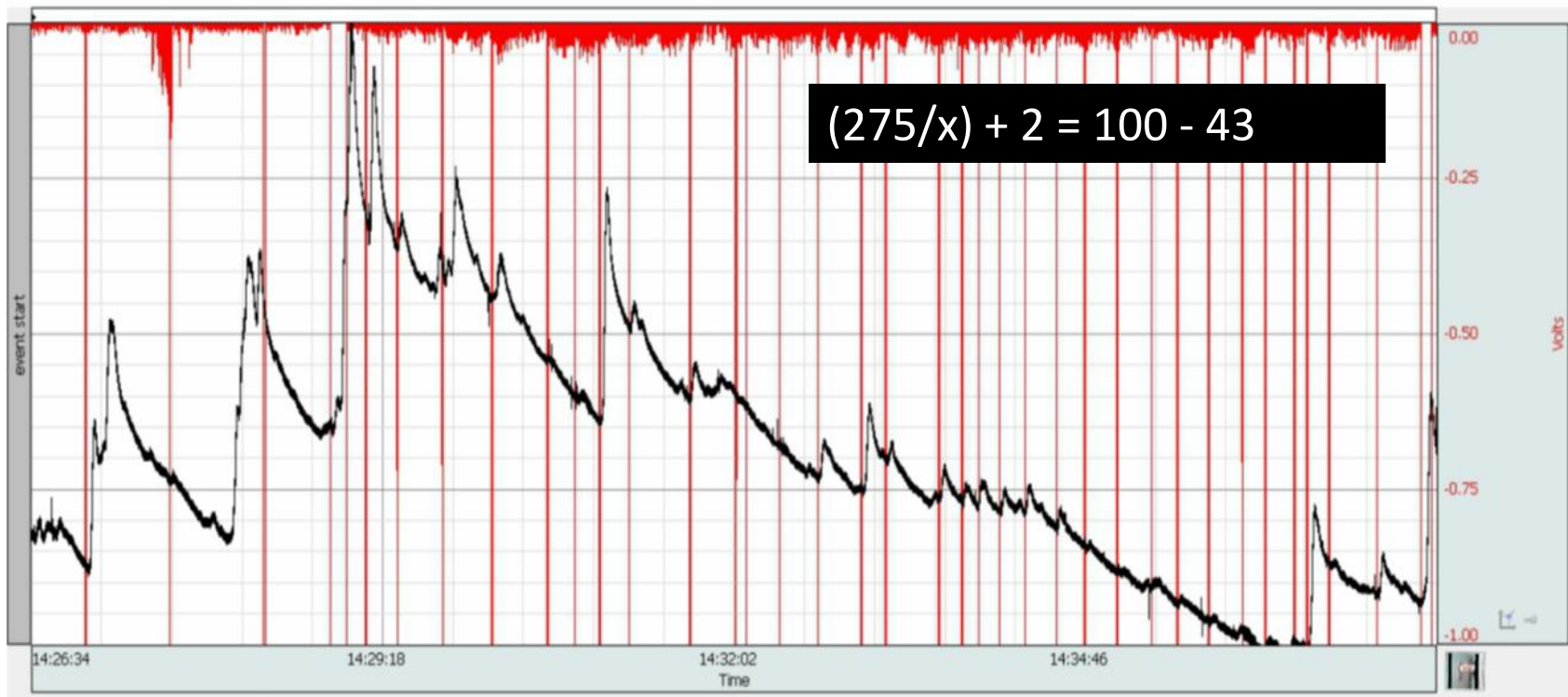
Merjenje težavnosti dela



Merjenje učinkov živalske terapije



Merjenje težavnosti matematike



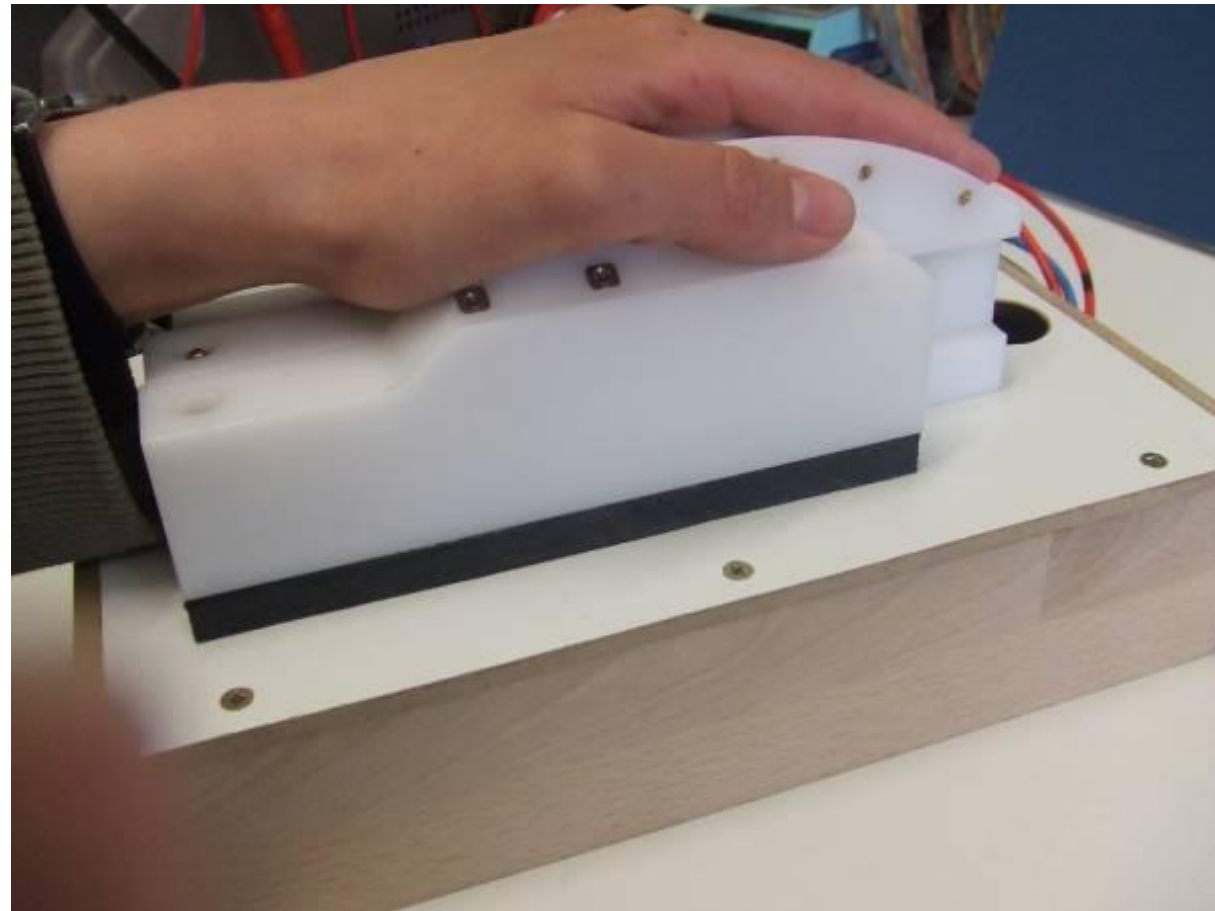
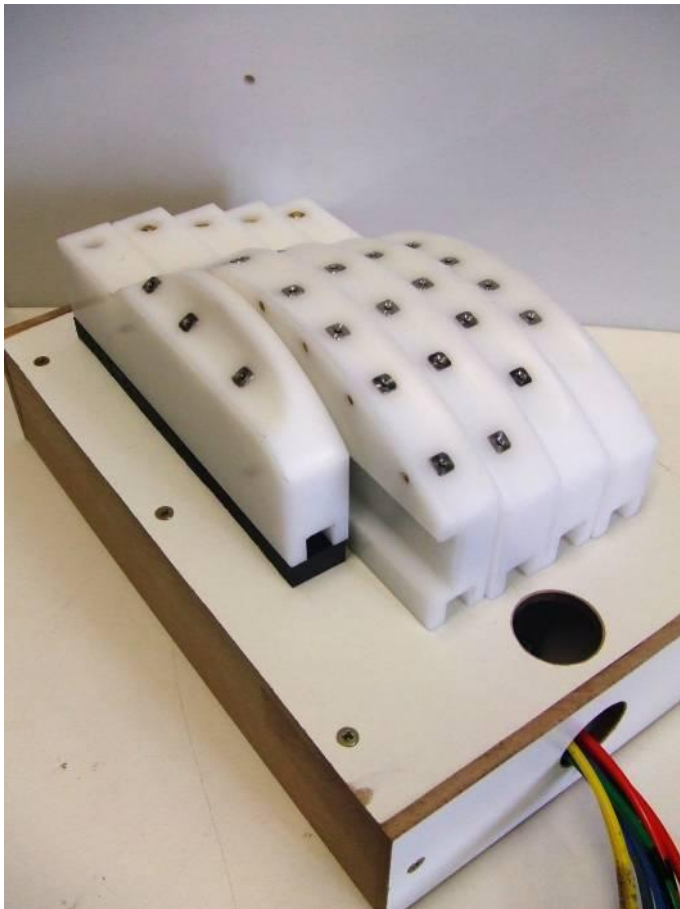
Merjenje zaznavanja zvokov v soseskah



Merjenje vonjev



Merjenje bolečine



Merjenje počutja študentov



Merjenje vpliva prostora na počutje



Merilne naprave v interdisciplinarnem meroslovju

- Za dobro odločanje moramo poznati točnost naprav (včasih ni definicij parametra)
- Poznati moramo robustnost, ponovljivost in obnovljivost naprav
- Za primerljivost med eksperimenti in splošno veljavne zaključke moramo izračunati merilne pogoške in merilno negotovost (npr. $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ razlike, pri čemer je negotovost skoraj $1\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Vzpostavimo metrološko sledljivost na SI enote

