

Janko Drnovšek  
Jovan Bojkovski  
Gregor Geršak  
Igor Pušnik  
Domen Hudoklin

# METROLOGIJA

uredil Gregor Geršak





Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za elektrotehniko  
Laboratorij za metrologijo in kakovost





Laboratorij  
*za metrologijo in kakovost*

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta *za elektrotehniko*



Janko Drnovšek  
Jovan Bojkovski  
Gregor Geršak  
Igor Pušnik  
Domen Hudoklin

# METROLOGIJA

Uredil: Gregor Geršak



# PREDGOVOR

Učbenik Metrologija obravnava metrologijo ali meroslovje, to je znanost o merjenju. Obravnava tiste specifične elemente merjenj v splošnem pomenu, ki so pomembni, da lahko medsebojno primerjamo merilne rezultate.

Večina merjenj, na primer primerjanja v regulacijskih zankah v tehniških sistemih, izdajanje najrazličnejših računov na osnovi nečesa izmerjenega, medicinska diagnostika, nadzor okolja, trgovanje in primerjava znanstvenih rezultatov, je namreč najpogosteje namenjena odločanju. Zato je potrebno znati točno in primerljivo podajati merilne rezultate. In ni dovolj, da je primerljivost zagotovljena zgolj lokalno, saj globalna razsežnost našega celotnega delovanja zahteva globalno primerljivost merilnih rezultatov.

Učbenik ne obravnava merilnih metod in merilne instrumentacije različnih področij, saj so temu namenjeni mnogi drugi učbeniki. Učbenik obravnava metrologijo kot sistemsko znanost, ki je hkrati tudi infrastrukturna dejavnost, pedagoška disciplina, gospodarska dejavnost, marsikje osnova zakonodaji, torej poleg tehniške in znanstvene discipline tudi izrazito družbena kategorija.

Metrologija kot znanost in kot infrastrukturna disciplina je v Sloveniji dokumentirano prisotna že od časa cesarice Marije Terezije, pa čeprav z osnovnim namenom pobiranja davkov in podporo poštenemu trgovanju. Enako kot danes je bil tudi takratni razvoj evropsko primerljiv, saj smo na naših tleh zelo hitro sledili meroslovnemu napredku, inspiriranemu s francosko revolucijo, uvedbo metrskega sistema in podpisom metrske konvencije leta 1875. Pričujoči učbenik oriše zgodovinske začetke meroslovja, razvoj metrologije in metrološke sisteme v sodobnih družbah. Opisuje definicijo, realizacijo in diseminacijo osnovnih enot mednarodnega sistema enot SI, s poudarkom na najnovejših znanstvenih dosežkih. V poglavju o merilni negotovosti obdela meroslovne pojme, kot so napaka, pogrešek, korekcija, negotovost, ponovljivost, obnovljivost in podobno. Študentu prikaže in ga uči metod izračunavanja in ocenjevanja izmerjene vrednosti in pripadajoče merilne negotovosti.

Pričujoča knjiga je študijsko gradivo na obeh prvostopenjskih študijskih smereh Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Učbenik je poleg študentom Fakultete za elektrotehniko namenjen tudi drugim strokovnim področjem in širši javnosti, saj so merjenja osnova vsakega opazovanja sveta okoli nas in temelj našega vedenja o našem fizikalnem, kemijskem, biološkem in družbenem okolju. Ker se znanstveno področje metrologije z napredkom znanosti in tehnologije hitro razvija in spreminja, predstavlja knjiga eno od vmesnih stopenj razvoja meroslovja, opisuje zgolj trenutno stanje in se bo zagotovo močno spreminjala tudi v prihodnosti, še posebno z novimi definicijami in realizacijami trenutnih osnovnih in verjetno tudi novih SI enot.

Učbenik ne bi mogel nastati brez neposrednih izkušenj več generacij, ki so poučevale merilno tehniko v okviru Univerze v Ljubljani in Univerze v Mariboru, brez odličnega sodelovanja s kolegi iz drugih slovenskih raziskovalnih in meroslovnih institutov, brez dvajsetletnega razvoja meroslovnega sistema Slovenije skupaj z Urdom RS za meroslovje in predvsem aktivnega sodelovanja v evropskih mednarodnih organizacijah kot sta EURAMET in WELMEC za znanstveno in zakonsko meroslovje in IMEKO kot mednarodno profesionalno združenje metrologov.

Avtorji

Ljubljana, februar 2012



# Vsebina

<b>1. Kratka zgodovina SI sistema</b>	<b>1</b>
<b>2. Meterska konvencija in BIPM</b>	<b>6</b>
<b>3. Zgodovina SI sistema enot</b>	<b>10</b>
BIPM (Bureau International des Poids et Mesures)	12
Dogovor o medsebojnem priznavanje certifikatov (MRA)	14
<b>4. Metrološki sistemi in zakonsko meroslovje</b>	<b>17</b>
Metrološka infrastruktura	18
OIML	20
WELMEC	23
EURAMET	24
<b>5. SI sistem merskih enot</b>	<b>27</b>
Zgradba SI sistema	27
Enote, sistemi enot in etaloni	27
Uvod v definicijo, realizacijo, vzdrževanje in diseminacijo enot SI sistema	35
SI sistem danes	42
SI sistem v prihodnosti	43
<b>6. Osnovne SI fizikalne veličine</b>	<b>45</b>
Čas	46
Dolžina	59
Masa	72
Električni tok	90
Temperatura	102
Množina snovi	114
Svetilnost	119
Nekatere izpeljane veličine SI sistema	122

<b>7. Izmerjena vrednost in merilna negotovost</b>	<b>127</b>
Sledljivost	132
<b>8. Zapis rezultata meritve</b>	<b>142</b>
Negotovosti merilnega rezultata	145
Porazdelitev izmerjenih vrednosti	152
Sestavljanje različnih porazdelitev - centralni limitni teorem	160
Koefficienti in tabela prispevkov negotovosti	163
Diagram vzrokov in posledic	165
Merilna negotovost pri preskušanju	169
Vrste merilne negotovosti	171
Statistične negotovosti (negotovosti tipa A)	171
Nestatistične negotovosti (negotovosti tipa B)	172
<b>9. Ocenjevanje negotovosti</b>	<b>179</b>
Praktični nasveti pri ocenjevanju negotovosti	179
Primer umerjanja izmeničnega voltmetra	187
Primer izračuna nadtemperature navitja	190
Primer umerjanja barometra	192
Primer izračuna prostornine goriva na bencinski črpalki	193
Primer izračuna temperature vode z uporovnim termometrom	194



# 1. Kratka zgodovina SI sistema

Malo predelov sveta je imelo večji vpliv na človeštvo kot svetopisemske dežele. Na tem osrednjem mostišču, ki povezuje afriško, azijsko in evropsko celino, se je nekako med 12000 in 8000 leti pr. n. š. človek najprej naučil osnov poljedelstva in udomačil nekaj najbolj uporabnih domačih živali. Tu so se v času med 5. in 4. tisočletjem pr.n.š razvili prvi namakalni sistemi, tu so nastala prva naselja. Na tem področju je človek tudi prvič uničil rastlinsko odejo, povzročil izpiranje zemlje in morda tako celo prvič povzročil spremembo podnebja. V civilizacijah z razvitimi državnimi tvorbami, kot je bila mezopotamska in egipčanska, so bili medsebojni vplivi človeka, kulture in naravnega okolja najbolj starodavni in najbolj prepleteni. Naturalno gospodarstvo je prišlo na višjo raven, izmenjavo preko vmesne forme denarja ter nujno spremljajoče aktivnosti v obliki tehtanja dobrin. To je pomenilo usoden trenutek za razvoj moderne civilizacije - vzpostavil se je sistem uteži in mer.

V času do našega štetja je poleg rimske, perzijske, feničanske in kitajske treba omeniti predvsem civilizacijo starega Babilona, ki sta ji dajali pečat predvsem trgovina in znanost, obe pa sta sloneli na izdelanem sistemu mer in uteži.

V prvem tisočletju po našem štetju so poleg arabske s svojimi še do danes nerazjasnjenimi geometrijskimi liki znani civilizaciji Južne Amerike, inkovska in azteška - predvsem pa je znan silen razcvet sistema mer in uteži na Japonskem. Japonska je pokrila vse tedanje potrebe s področja merjenj in verjetno kot prva v zgodovini človeštva uvedla še danes aktualen sistem umerjanja oziroma kalibracije. In to ne na osnovi direktne primerjave merila z artefaktom enake fizikalne narave, temveč je bila na primer enota dolžine izvedena z drugo veličino. Dolžina bambusove palice je bila namreč proporcionalna akustičnemu tonu, ki se ga je dalo s piskom izvabiti iz tega "praetalona". Širom po deželi so se nato primerjali akustični signali. Izvedena je bila torej pretvorba fizikalne veličine dolžine v fizikalno veličino frekvenco, kar je tudi danes cilj modernega meroslovja, saj je frekvenca daleč najbolj točno izmerjena fizikalna veličina.

Intenzivnejši razcvet evropske znanosti v povezavi z razcvetom meroslovja – vede o merjenjih - se začelja šele po našem štetju oziroma po prvem tisočletju našega štetja.

Če se vrnemo v čas nekaj tisočletij pred našim štetjem v Mezopotamijo in kasneje v Babilon, moramo poudariti razcvet temeljnih mer za maso, volumen in dolžino. Enote med seboj niso bile povezane po nekem sistemu, so pa odražale tedanje potrebe. Najmanjša enota za maso je bila 1 gera (približno 0,5 g), 10 ger je bil 1 bek, 2 beka sta bila 1 šekel, 50 šeklov je bila 1 mina (približno 500 g), 60 min pa je bil 1 talent (približno 30 kg). Podobno je bilo z dolžinskimi merami, kjer se je sistem začel s palcem (okoli 19 mm),

nato so sledili dlan, pedenj, komolec (okoli 45 cm), seženj (1,85 m), stadij (185 m), milja - 1000 korakov itd. Podobni sistemi so veljali v vseh ostalih zgodovinskih obdobjih in tako rekoč po vsem svetu.

Pomembno je razmišljati o posledicah teh merilnih sistemov. Znano je, da so kupci pogosto nosili uteži v svojih bisagah, saj so z njimi lahko kontrolirali trgovce. Pri tem so tako vladarji kot verski voditelji strogo zabičali uporabo pravih - dogovorjenih in točnih uteži in mer. Stopnja poštenosti pri trgovanju je zgovorno razkrivala duhovno stanje naroda in s tem raven stopnje civilizacije celih območij in je na ta način postala tudi izrazito etična kategorija.

Merjenje je bilo izrazito povezano z uvedbo denarja, v zgodovinskem smislu pa je najvplivnejša meritev gotovo postalo merjenje časa in iz njega izpeljani koledarji. Zanimivo je, da so bile prve meritve časa vezane na naravne fenomene, na primer na cikle: žetev ječmena, splošna setev, delo v vinogradu, prvo dozorelo grozdje, dozorele oljke, oranje, sejanje žita, deževna doba in mirovanje. Vzporedno k temu so meritve časa slonele tudi na astronomskih opazovanjih, vodnih urah itd. Navkljub nekaterim razmišljanjem, da vsa ta merjenja niti ne zaslužijo tega imena, so bile te meritve za tedanje razmere zelo točne. Bile so ponovljive, brez kumulativnih pogreškov, kvantizirane, pokrile so vse tedanje potrebe, seveda pa z današnjega stališča niso imele zadostne ločljivosti in s tem tudi točnosti. Razvoj meroslovja v kasnejših tisočletjih je prav v želji po večji ločljivosti merilnih tehnik prešel iz naravnega okolja na sistem artefaktov in šele z najnovejšim razvojem kvantnega meroslovja nazaj k osnovnim naravnim zakonitostim.

Povrnimo se v Evropo in omenimo nekaj mejnikov, ki so odločilno vplivali tudi na meroslovje pri nas. V Angliji so v začetku 12. stoletja že pozabili, koliko je merila na primer rimska ulna (laket), zato je okrog leta 1120 angleški kralj Henrik I. določil mero za en palec (inch) kot širino svojega palca (1 palec = 25,4 mm). Razdaljo med svojim nosom in palcem svoje iztegnjene levice je določil za 1 jard (1 jard = 0,9144 m). Jard (yard) je bil razdeljen na tretjine. Tretjina jarda je predstavljala mero za 1 čevelj (1 čevelj (foot) = 30,48 cm). Leta 1532 so v Angliji tudi prvi poenotili mere po vseh krajih v celotnem kraljestvu.



Slika 1.1: Določitev dolžinske mere (16 čevljev).

Na sliki 1.1 je prikazan postopek določitve nemške merske palice za dolžino v 16. stoletju. Dolžino so določili s pomočjo 16 v vrsto postavljenih čevljev, ki so pripadali različno velikim in naključno izbranim možem. Tako je bila v Oppenheimu leta 1575 določena prva statistična metoda za merjenje dolžine.

Leta 1576 je nizozemski astronom Christian Heuygens izdelal prvo uspešno uro na nihalo, ki je v znanosti in v vsakdanjem življenju povzročila revolucionaren preobrat. Okrog leta 1685 so William Clement in drugi prispevali nove izboljšave in šele na njihovi podlagi je postala smiselna delitev ure na 60 minut, minute pa na 60 sekund.

Leta 1770 je bil v Franciji določen meter z razdaljo enako 10-milijontemu delu četrtnine Zemljinega poldnevnikarja, ki gre skozi Pariz.

Na slovenskih tleh je bilo predpisano in organizirano "meroizkustvo" od leta 1777 naprej, in sicer v okviru avstro-ogrske monarhije, ko je cesarica Marija Terezija objavila in uveljavila prvi meroslovni zakonik. Ker je novost povsod naletela na hud odpor, je moral cesar Franc Jožef II. leta 1784 obnoviti cimentacijske odločbe za notranjo Avstrijo (Štajerska, Koroška, Kranjska). Cement je označba določene mere na posodi.

Naslednje leto je izdal patent o "Jožefinskem katastru", v katerem je bila dvojezično zapisana (v nemščini in slovenščini) odločba o dunajski klaftri kot predpisani enotni meri za zemljemerstvo. Izdana so bila tudi natančna navodila za merjenje zemlje, v katerih je bilo predpisano, da se mora v vseh avstrijskih deželah uporabljati samo cementirana lesena dunajska klafta, razdeljena v čevlje in cole. Uporablja se tudi merilna letev ali vrv, dolga 10 klafter. V Ljubljani in Mariboru so ohranjeni merski etaloni, ki jih je dala izdelati Marija Terezija, ohranjena pa je tudi vrsta meroslovnih predpisov, ki so bili izdani na podlagi novega Zakonika za dežele današnje Slovenije.

Slika 1.2: V svojem patentu o cimentiranju iz leta 1777 je cesarica natančno odredila, kakšna merila se lahko uporabljajo ter kako in kje se overjajo. Tako je bil na ozemlju Slovenije že 100 let pred podpisom Meterske konvencije urejen meroslovni sistem. Poleg mer in merskih enot je bilo poskrbljeno tudi za primerno kontrolo in označevanje plemenitih kovin.



Na to obdobje urejanja meroslovnih razmer na našem ozemlju se navezuje uvajanje francoske ideje o metriskem in dekadnem sistemu, kjer ne smemo prezreti znanstvene podobe velikega slovenskega matematika, fizika, astronoma in balistika Jurija Vege (1754-1802), ki je odigral pomembno in pionirsko vlogo pri uvajanju metrskega sistema na ozemlju bivše avstro-ogrske monarhije. Že kot študent je sodeloval pri raznih zemljemerskih delih, med drugim tudi pri načrtovanju gradnje Gruberjevega prekopa na Ljubljani. Na pomlad leta 1780 se je na Dunaju kot pomorski inženir vpisal med topničarje cesarske armade. Potem ko je opravil osnovno topničarsko usposabljanje, je postal podporočnik in kmalu nato učitelj matematike na topničarski šoli. Zaradi pomanjkanja ustreznih učbenikov se je sam lotil pisanja. Do konca leta 1780 je Vega izdal štiri zvezke predavanj iz matematike. Te štiri knjige matematično-fizikalnih predavanj so bile pomembne in še danes ne dovolj ovrednoten Vegov prispevek za napredek pouka teh predmetov na topničarskih šolah, kjer so povzročile pravo revolucijo.



Slika 1.3: Baron Jurij Vega.

Vega je v osemdesetih letih 18. stoletja prispeval za splošni dvig matematičnega znanja in prakse še eno pomembno delo, in sicer svoj logaritmovnik, ki vsebuje logaritme naravnih števil od 1 do 105000, logaritme trigonometričnih funkcij, seznam kvadratov in kubov naravnih števil ter vrsto drugih tabel in obrazcev. Ta logaritmovnik je požel izredno pohvalno kritiko. Francoski astronom Joseph Lalande je napisal Vegi zelo laskavo priznanje z izjavo: "Delo je resnično zaklad, s katerim je Vega znanosti storil veliko uslugo." Logaritmovnik je bil skoraj 200 let najuspešnejši pripomoček pri računanju, potrebnem za izvedbo matematično najzahtevnejšega dela industrijske in znanstvene revolucije. Ponatisi so se vrstili, zadnja izdaja je izšla v ZDA leta 1962.

Takoj po končani prvi svetovni vojni se je slovenska deželna vlada Kraljevine Srbov, Hrvatov in Slovencev lotila urejanja meroslovja. Že novembra 1918 je bil v Uradnem listu narodne vlade Kraljevine Srbov, Hrvatov in Slovencev objavljen razglas, da se "meroizkusno nadzorništvo" iz Trsta premesti v Ljubljano in da so mu podrejeni vsi ostali meroizkusni uradi na ozemlju takratne Slovenije.

V času jugoslavije (od 1945 do 1991) je bil meroslovni sistem centraliziran, v Sloveniji pa se je nahajalo 90% vse nekdanje jugoslovanske izdelave meril in merilne opreme, tako po fizičnem obsegu izdelave kot tudi po njeni zahtevnosti in kakovosti.

Danes imamo v Sloveniji distribuiran metrološki sistem, kar pomeni, da različne institucije, porazdeljene po državi, skrbijo za meroslovje različnih fizikalnih veličin.



Slika 1.4: Etalon prostornine v času Marije Terezije.

Osnovni principi meroslovja so skozi zgodovino civilizacije ostali enaki, menjale so se le tehnologije. Meritve naravnih pojavov so bile predpogoj za razcvet novih znanj, toda nič manj pomemben ni bil vpliv meroslovja na raven kulture naroda, zato meroslovje ni le trgovska, znanstvena, informacijska, temveč predvsem civilizacijska kategorija.

## 2. Meterska konvencija in BIPM

### Zgodovina Meterske konvencije

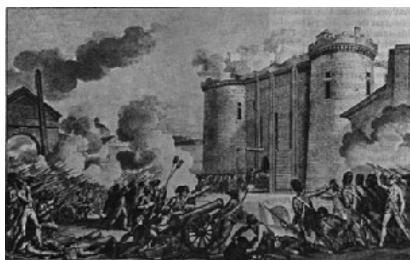
V drugi polovici sedemnajstega stoletja so trgovina, obrt in znanost že toliko napredovale, da proizvodnje in trgovske menjave ni bilo več mogoče pospeševati in razvijati na osnovi merskega sistema palec - laket - funt. Vladala je splošna zmešnjava mer in uteži, ki so se razlikovale od mesta do mesta, od pokrajine do pokrajine. Šele francoska revolucija je leta 1789 med drugimi radikalnimi potezami uredila tudi problem poenotenja mer. Osnovni gesli revolucije "svoboda" in "enakost" sta spodbudili in dali pomen naporom za uveljavljanje novega sistema mer. Kupec ni svoboden, če pri nakupu naleti na celo vrsto različnih teži in mer, ki jih ne pozna; in ni enakosti med njim in trgovcem, ki se zna v svojo korist poigravati z razlikami med merami.

Leta 1790 je ustavodajna skupščina poverila francoski Akademiji izdelavo projekta enotnega sistema mer. Posebna komisija najuglednejših učenjakov je predlagala sistem z naslednjimi karakteristikami: osnovne enote se morajo naslanjati na naravne pramere; vse izvedene enote naj bodo izpeljane iz osnovnih enot za dolžino, čas in maso, delitev enot na večje ali manjše vrednosti naj bo decimalna, tako da bo preračunavanje čim preprosteje.

Ideja naravnih pramer je bila za tiste čase nekaj izrednega. Z njo je revolucija hotela ustvariti mere, ki se bodo zaradi svojega naravnega porekla vedno uspešno upirale zobu časa. Iz tega časa izvira krilatica: *À tous les temps, á tous les peuples!* Za vse čase in za vse narode!

Idejo enotnega metričnega sistema enot je francoski ustavodajni skupščini marca 1790 razložil škof in državnik Talleyrand. Imenoval ga je decimalni metrični sistem. Osnova reforme merskih enot je bila želja, da se za temelj izberejo tiste naravne vrednosti, ki se s časom ne menjajo in ki jih je mogoče enostavno povzeti. Glede dolžinske pramere so bili dani trije predlogi, in sicer:

- del dolžine zemeljskega poldnevnika,
- del dolžine ekvatorja,
- dolžina sekundnega nihala.



Slika 2.1: Napad na Bastijo - začetek francoske revolucije leta 1789.

Sočasno je bila k novemu decimalnemu sistemu povabljena tudi Anglija. Odziva ni bilo, posledice pa so opazne še danes, saj v anglosaksonskih državah še uporabljajo enote, kot so milja, funt, palec.

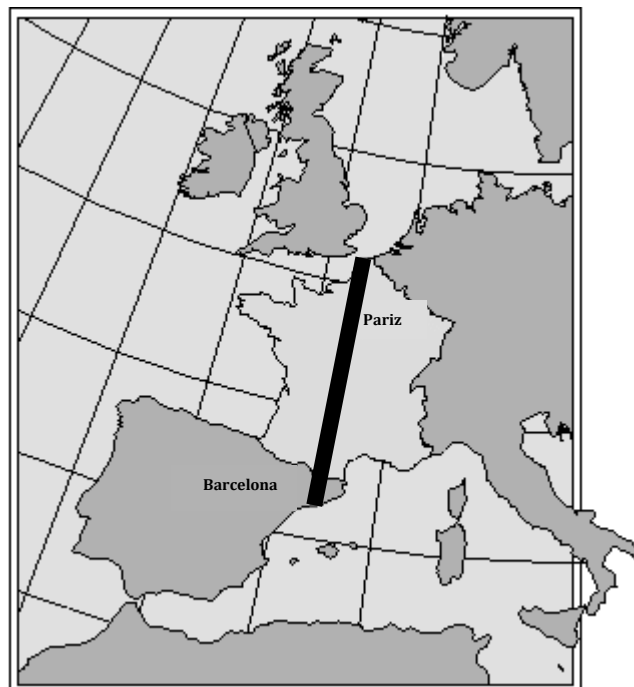
Francoska vladna uradnika Turgot in Condorcet sta uveljavljala projekt reforme mer in ugotavljala prednosti, ki jih bo taka reforma prinesla predvsem gospodarstvu. Zavedala pa sta se tudi velikih težav, ki bodo povezane z izvajanjem take reforme. Condorcet je analiziral projekt in prišel do zaključka, da je treba za univerzalno mero izbrati neko vrednost, ki temelji na naravnem fenomenu. Na tej osnovi izvedene pramere ne morejo propasti in so dostopne vsem deželam na svetu. S temi izhodišči je Condorcet prišel do zaključka, da bi bili taki naravni vrednosti lahko ločna stopinja na zemeljskem poldnevniku ali pa dolžina enostavnega nihala, ki opravi en nihaj v sekundi. Skušal se je tudi odločiti, kje bi izvedli predlagano mersko enoto. Analiziral je merjenje na ekvatorju in na  $45^\circ$  zemeljske širine. Ugotavljal je tudi možne vplive na tako izbrano naravno enoto. Ti vplivi so po njegovem vpliv temperature na dolžino nihala, vpliv okolice (gore ali morje) na zemeljski pospešek in dejstvo, da je nihalo pri gibanju izpostavljeno zračnemu uporu, ki je zaradi različne gostote zraka spremenljiv.

Sočasno s takimi razpravami in razmišljanji so bila opravljena merjenja dolžine loka na površini Zemlje, ki ustreza eni kotni stopinji. Taka merjenja so bila izvedena konec 17. stoletja v Franciji, na Nizozemskem in v Angliji. Francoska Akademija je s tem v zvezi organizirala dve znanstveni odpravi. Prva je v letih 1735 do 1746 merila dolžino poldnevnikarja v Peruju, druga pa je merila podobno dolžino leta 1736 na Laponskem. Rezultati so bili osnova za izdelavo etalonskih palic, ki so za merjenje geodetske baze služile kot dolžinske pramere. Imenovale so se "Toise du Perou" in "Toise du Nord" (toise je francoska beseda za klaftra ali seženj).

Leta 1767 je Huygens predlagal, da se za naravno dolžinsko pramero izbere dolžina sekundnega nihala. Ta predlog je obnovil Talleyrand ter leta 1790 preciziral, da bi se ta dolžina nihala definirala na  $45^\circ$  severne zemljepisne širine. Posebna komisija Akademije je ta predlog odklonila. Razlog je bil ta, da bi bilo potrebno zelo natančno realizirati sekundo, poleg tega pa se perioda nihanja spreminja z geografskim položajem na Zemlji, ker se z njim spreminja tudi gravitacijski pospešek. Odločeno je bilo, da se za enoto dolžine metričnega sistema izbere 40-milijonti del Zemljinega poldnevnikarja. Tako definirana enota dolžine bi služila tudi za osnovo definicije mere volumna in mase.

Merjenje loka pariškega poldnevnikarja med Dunquerque in Barcelono sta začela leta 1791 Delambre in Mechain. Sedem let kasneje sta to delo končala Arago in Biot. Pri obdelavi rezultatov teh merenj je sodelovalo 26 evropskih učenjakov, ki so svoje delo zaključili v dveh letih. Posebna komisija Francozov, Nizozemcev, Švicarjev in Špancev je ugotovila, da znaša dolžina četrtnine pariškega poldnevnikarja 5 130 740 toise (en toise je bil malo manj

kot 2 metra).



Slika 2.2: Merjenje dolžine pariškega poldnevnika od Dunquerqa do Barcelone (1791-1798).

Enota dolžine meter (naziv je predlagal Borda po grški besedi "metron", kar pomeni mera) je bila s tem definirana z relacijo: meter = 3 stope + 11,269 linij, kjer so enote "stope" in "linija" izhajale iz klaftre (Toise du Perou). Večje in manjše enote dolžine so se izvajale iz tako definiranega metra po decimalnem principu.

Vzporedno z deli za definicijo metra kot dela pariškega poldnevnika je francoska Akademija pripravljala definicijo mase. Lefevre-Geneau in Fabroni sta po obsežnih raziskavah predlagala, naj bo enota mase kubični decimeter destilirane vode pri njeni največji gostoti (pri temperaturi 4 °C). Upoštevala sta torej že mnogokratnik enote dolžine (decimeter = 0,1 m).



Slika 2.3: Leta 1905 izdelana pozlačena medeninasta krogla z maso 1 kg in volumnom 1 dm<sup>3</sup> (1 liter). Predstavljala je prvi artefakt enote za maso, ki je temeljil na takratni definiciji kilograma kot mase enega litra vode.



7. aprila 1795 je francoski zakon predpisal decimalni metrični sistem in nazive enot tega sistema: meter za dolžino, ar za površino, liter za volumen in gram za maso. Izraz kilogram za maso enega litra vode je bil uveden kasneje. Predpisano dolžino metra in maso enega kilograma je kot etalon izdelal Fortin. Mere je izdelal iz platine, kovane v ognju. Platinski prameter je bila palica preseka  $25 \times 4,05$  milimetra, katere konca sta pri temperaturi taljenja ledu medsebojno oddaljena točno en meter. Prakilogram je bil valj z enakima višino in premerom. Obe prameri sta od 22. junija 1799 shranjeni v arhivu Francoske republike.

Povsem praktični razlogi so kazali na potrebo po uvedbi enotnega evropskega sistema enot. Industrija, trgovina in znanost mnogih dežel so spoznale prednosti enostavnega, logičnega decimalnega sistema. Še posebej je bilo to očitno na mednarodnih razstavah 1851 v Londonu in 1867 v Parizu. Tudi mednarodna geodetska konferenca v Berlinu je leta 1867 dala močne pobude za mednarodno uvedbo metričnega sistema enot in za ustanovitev evropskega mednarodnega urada za mere in uteži. Navedeni predlogi in pobude so botrovali konferenci predstavnikov niza dežel avgusta 1870 v Franciji. Naslednje zasedanje mednarodne komisije za meter je bilo organizirano leta 1872 v prisotnosti predstavnikov 30 držav.

20. maja 1875 so se pooblaščenih predstavniki 18 držav sestali v Parizu na diplomatski konferenci o metru in podpisali Metersko konvencijo.

### 3. Zgodovina SI sistema enot

Prvi korak v izgradnji in razvoju današnjega Mednarodnega sistema enot – SI (Systemè International d'Unités) sta bila decimalni metrični sistem, uveden v času Francoske revolucije, in posledična izdelava dveh platinastih etalonov, ki sta predstavljala meter in kilogram leta 1799.



Slika 3.1: Karl Friedrich Gauss (1777-1855).

Leta 1832 je Gauss močno propagiral uporabo svojega fizikalnega koherentnega metričnega sistema enot, ki je poleg dolžine in mase vseboval tudi fizikalno veličino čas, ki je bila sicer v uporabi v astronomiji. Gauss je kot prvi izmeril absolutno vrednost zemeljskega magnetnega polja v obliki decimalnega sistema enot, ki je baziral na treh mehanskih enotah – milimetru, gramu in sekundi. Kasneje sta skupaj z Webrom z vključitvijo električne veličine razširila te meritve.

V 60. letih devetnajstega stoletja so potekale številne raziskave na področju elektrike in magnetizma pod vodstvom Maxwella in Thompsona. Skupaj sta sestavila potrebne lastnosti koherentnega sistema enot z osnovnimi in izpeljanimi enotami.

Koherentni sistem je sistem, v katerem je mogoče vsako izpeljano enoto izraziti kot linearno kombinacijo osnovnih enot, pri čimer so vsi številski faktorji enaki 1.

Leta 1884 je bil predstavljen CGS sistem enot, tri- $\pi$ -dimenzionalen koherentni sistem, ki je baziral na treh mehanskih enotah centimetru, gramu in sekundi in za decimalne večkratnike enot uporabljal predpone od mikro do mega.

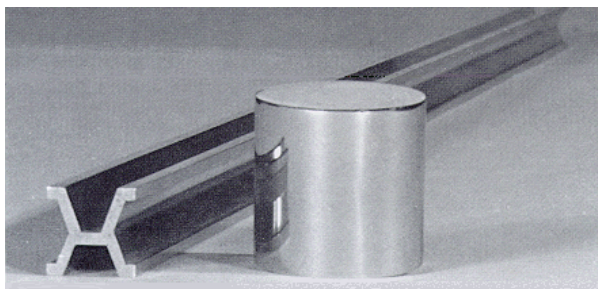
Na področju elektrike in magnetizma so se velikosti enot CGS pokazale kot neprimerne, zato je bil v 80. letih devetnajstega stoletja predlagan koherentni sistem praktičnih enot. Ta je vseboval tudi enote ohm za električno upornost, amper za električni tok in volt za napetost.

Po podpisu Meterske konvencije se je v okviru CIPM začela izdelava

novih prototipov za dolžino in maso.

20. maja 1875 so se pooblaščen predstavniki 18 držav sestali v Parizu na diplomatski konferenci o metru in podpisali Metersko konvencijo. Države podpisnice so bile Francija, Avstrija, Nemčija, Belgija, Brazilija, Argentina, Danska, Španija, Združene države Amerike, Italija, Peru, Portugalska, Rusija, Švedska, Norveška, Švica, Otomansko cesarstvo in Venezuela.

Konvencija je definirala enoto dolžine meter in enoto mase kilogram v obliki pramer. Ustanovila je Mednarodni urad za mere in uteži (BIPM) kot stalni znanstveni zavod in Mednarodni komite za mere in uteži (CIPM). S podpisom konvencije o metru leta 1875 se je začelo obširno znanstveno in eksperimentalno delo pri izdelavi pramer metra in kilograma. Trajalo je polnih 14 let, vse do leta 1889. Rezultata sta bila pramer s karakterističnim presekom črke H in prakilogram v obliki valja. Obe enoti sta skupaj z astronomsko sekundo tvorili sistem enot, podoben CGS sistemu, le da so bile osnovne enote meter, kilogram in sekunda. Definiran je bil MKS sistem.



Slika 3.2: Pramer in prakilogram.

Leta 1901 je Giorgi pokazal, da je mogoče kombinirati mehanske enote MKS sistema s praktičnimi električnimi enotami v obliko koherentnega sistema štirih osnovnih enot – treh mehanskih in ene električne.

Leta 1939 je bil predlagan štiri-dimenzionalni MKSA sistem z enotami meter, kilogram, sekunda in amper.

V letu 1954 je CGPM sprejel amper, kelvin in kandelo kot osnovne enote električnega toka, termodinamične temperature in svetilnosti. Leta 1960 je bilo sprejeto tudi ime novega sistema enot Systemè International d'Unités – SI.

Mol, kot osnovna enota za množino snovi, je bil v SI sistem dodan leta 1971.

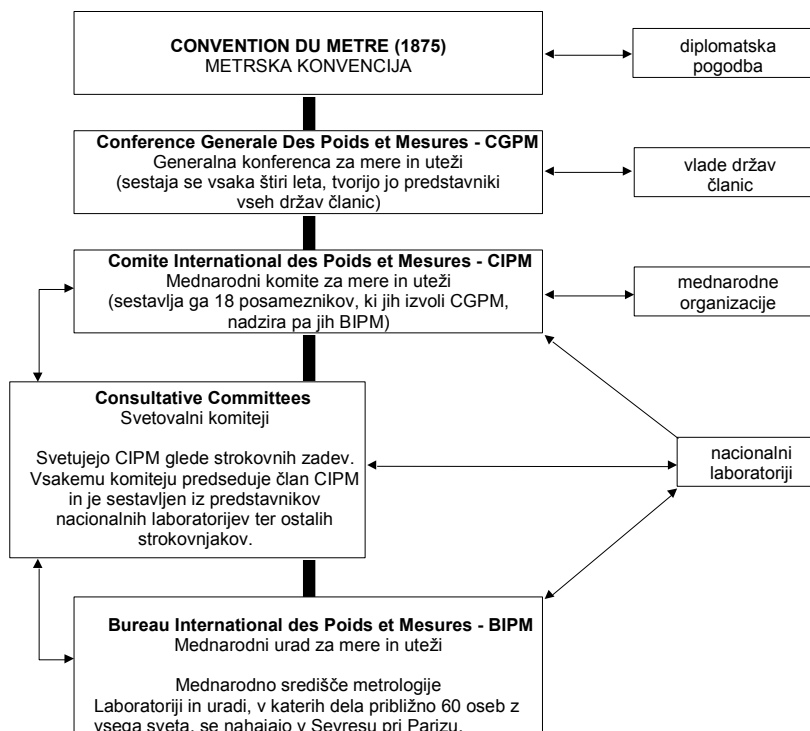
Danes vsebuje SI sistem enot sedem osnovnih enot, in sicer kilogram, meter, sekundo, amper, kelvin, kandelo in mol.

## BIPM (Bureau International des Poids et Mesures)



Mednarodni merslovni sistem koordinira in vodi Mednarodni urad za mere in uteži – BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) s sedežem v Parizu.

Naloga BIPM je, da na svetovni ravni zagotovi enovitost meritev in sledljivost do mednarodnega SI sistema. Poleg tega so naloge BIPM tudi raziskovanje na področju merjenja, organizacija ključnih medlaboratorijskih primerjav in kalibracija nekaterih etalonov za države podpisnice Meterske konvencije.



Slika 3.3: Organizacijska struktura Meterske konvencije.

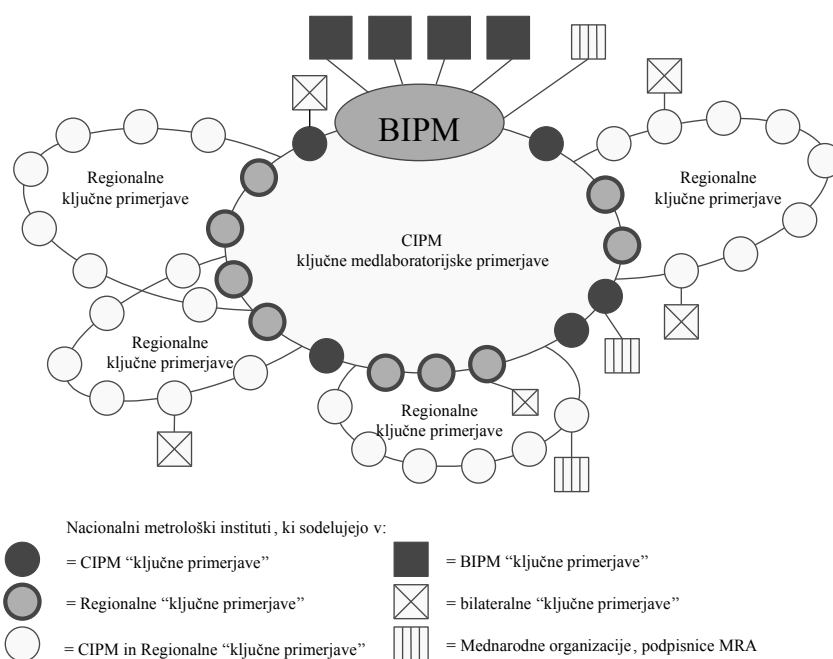
Osnovo za delovanje je BIPM dobil s podpisom Meterske konvencije 20. maja 1875. Meterska konvencija predstavlja diplomatski dogovor, ki je definiral enoto dolžine meter in enoto mase kilogram z realizacijo v obliki pramer. Od leta 2003 je pridružena članica Meterske konvencije tudi Slovenija.

Poleg BIPM je Meterska konvencija ustanovila še Mednarodni komite za mere in uteži – CIPM (Comité International des Poids et Mesures) in Generalno konferenco za mere in uteži - CGPM (Comité International Général des Poids et Mesures), ki izmed predstavnikov držav podpisnic Meterske konvencije izvoli člane CIPM (18 posameznikov). Nadzira jih BIPM (slika 3.3).

Kot svetovalni organi CIPM so ustanovljeni svetovalni komiteji – CC (Comités Consultatifs). Trenutno jih je deset in sicer za električne veličine, termometrijo, fotometrijo in radiometrijo, dolžino, čas, ionizirajoče sevanje, enote, maso, množino snovi in akustiko, ultrazvok in vibracije. Svetovalni komiteji so sestavljeni iz predstavnikov nacionalnih laboratorijev držav podpisnic Meterske

konvencije ter v izjemnih primerih iz priznanih strokovnjakov s posameznih področjih. Glavne naloge svetovalnih komitejev so spremljanje napredka tehnike in tehnologije na tistem področju, ki je neposredno povezano z metrologijo, določanje strategije razvoja, priprava priporočil za razprave na sestankih CIPM, določevanje, planiranje, organiziranje in analiziranje ključnih medlaboratorijskih primerjav ter svetovanje znanstvenikom znotraj BIPM.

V metrološkem sistemu poleg BIPM delujejo tudi različna regionalna metrološka združenja, kot so EURAMET, NORAMET... Cilji regionalnih združenj so predvsem vezani na določeno regijo. Glavni cilj je izboljšanje metroloških aktivnosti in storitev za doseg večje učinkovitosti. Gre predvsem za izboljšanje sodelovanja med nacionalnimi metrološkimi laboratoriji na področju merilnih etalonov ter za optimiranje sredstev in storitev. V sklopu regionalnih združenj se organizirajo regionalne medlaboratorijske primerjave, ki s sodelovanjem nacionalnih laboratorijev, sodelujočih v ključnih medlaboratorijskih primerjavah, zagotavljajo tudi ostalim laboratorijem enovitost meritev in sledljivost do mednarodnega SI sistema.



Slika 3.4: Sheme ključnih medlaboratorijskih primerjav v organizaciji BIPM in regionalnih metroloških združenj.

**Dogovor o medsebojnem priznavanju certifikatov (MRA)**

Sodelovanje v ključnih medlaboratorijskih primerjavah in v regionalnih dopolnilnih primerjavah predstavlja osnovo za podpis Dogovora o medsebojnem priznavanju certifikatov – MRA (Mutual Recognition Arrangement).

14. oktobra 1999 so v Parizu direktorji 38 nacionalnih metroloških laboratorijev držav podpisnic Meterske konvencije in predstavniki dveh mednarodnih organizacij podpisali Dogovor o medsebojnem priznavanju certifikatov - MRA (Mutual Recognition Arrangement). Dogovor je bil sprejet, da ne bi več prihajalo do podvajanja kalibracijskih certifikatov različnih metroloških institucij. MRA za stranko pomeni enostavnejšo pridobitev kvalitetne metrološke storitve. Namen MRA je zagotovitev enakovrednost nacionalnih etalonov in medsebojno priznavanje kalibracij meritev, izdanih s strani različnih nacionalnih metroloških institucij.

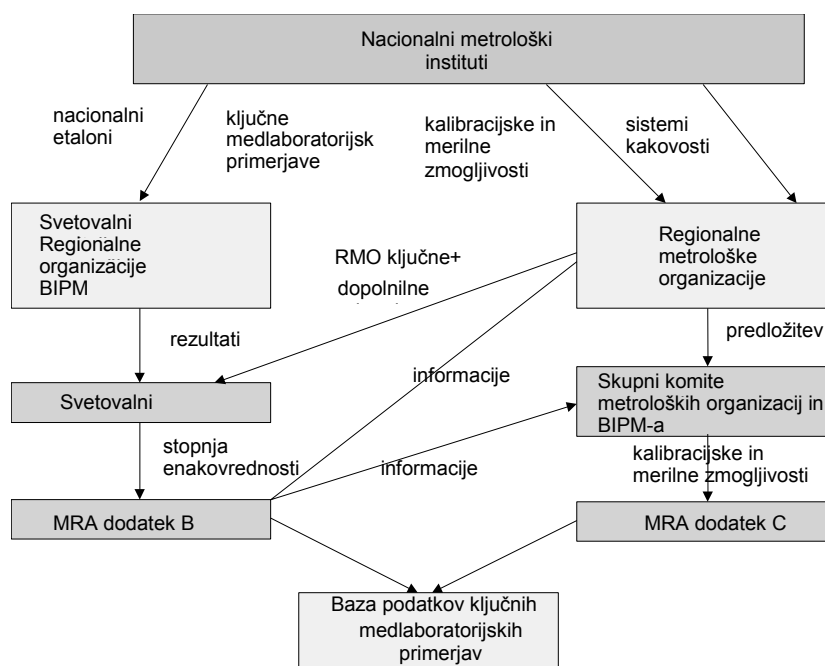
Izvajanje MRA in s tem priznavanje nacionalnih etalonov in certifikatov vključuje dva procesa, ki potekata v nacionalnih metroloških institucijah, regionalnih metroloških organizacijah in na širši ravni:

- ključne primerjave (Key Comparisons – KC) - trenutno poteka več kot 400 ključnih primerjav, ki preizkušajo merilne zmožnosti nacionalnih metroloških institucij na različnih metroloških področjih.
- kalibracijske in merilne zmogljivosti nacionalnih metroloških institucij – (Calibration and Measurement Capabilities - CMC) – zmogljivosti in sistem kakovosti nacionalnih metroloških institucij sta temeljito preverjena s strani regionalnih metroloških organizacij.

Ta sporazum predstavlja odgovor na povečano potrebo po odprtem, transparentnem in vsestranskem sistemu, ki bi omogočal uporabnikom zanesljivo informacijo o primerljivosti nacionalnih metroloških uslug. Na ta način je ustvarjena tehnična osnova za izboljšanje mednarodnih pogodb na področju trgovine in nadzora trga.

Dogovor predstavlja tehnično osnovo za širše dogovore držav na področju mednarodne proizvodnje in trgovine ter nadzora v najširšem pomenu besede. Procesi, ki bodo zagotovili pogoje za ugotavljanje enakovrednosti, so predvsem mednarodne ključne medlaboratorijske primerjave, dopolnilne medlaboratorijske primerjave ter sistemi kakovosti in izkazovanje sposobnosti nacionalnih metroloških laboratorijev.

Rezultat Dogovora je izjava o kalibracijskih in merilnih zmogljivostih posameznih laboratorijev ter njihova javna dostopnost preko svetovnega spleta. Dolžnosti podpisnikov dogovora so predvsem strinjanje s postopki, ki so podrobno opisani v samem dogovoru. Ti postopki so nujni za vpis podatkov o posameznih laboratorijih v bazo podatkov, za priznavanje rezultatov ključnih medlaboratorijskih primerjav ter za priznavanje kalibracijskih in merilnih zmogljivosti drugih sodelujočih laboratorijev.



Slika 3.5: Organizacijska struktura MRA.

Koordinacija celotnega dogovora MRA je poverjena instituciji BIPM, ki je usmerjana in nadzirana s strani CIPM in pod nadzorom držav podpisnic Meterske konvencije. Svetovalni komiteji CIPM, regionalne metrološke organizacije in BIPM so odgovorni za izvajanje ključnih in dopolnilnih medlaboratorijskih primerjav.

### Skupni komite regionalnih metroloških organizacij in BIPM (JCRB) in BIPM baza podatkov ključnih medlaboratorijskih primerjav

Skupni komite regionalnih metroloških organizacij in BIPM (JCRB) je odgovoren za analizo in vnos podatkov o kalibracijskih in merilnih zmogljivostih posameznih nacionalnih metroloških laboratorijev v bazo podatkov. Regionalne metrološke organizacije imajo pomembno vlogo v dogovoru, ker so dolžne izvajati ključne medlaboratorijske primerjave znotraj svojih regij, izvajati dopolnilne primerjave ter izvajati vse druge aktivnosti, ki pripomorejo k povečanju medsebojnega zaupanja v rezultate kalibracijskih certifikatov. S svojim delovanjem znotraj JCRB so odgovorne za vnos podatkov za nacionalne metrološke institute v regiji v BIPM-ovo bazo podatkov. Postopek usklajevanja kalibracijskih in merilnih zmogljivosti je izredno zahteven. Najprej nacionalni metrološki laboratorij predloži svoje CMC lokalni regionalni metrološki organizaciji. Potem se morajo ti CMC-ji znotraj regionalne metrološke organizacije uskladiti v skladu s kriteriji JCRB in regionalnih metroloških organizacij. Nato regionalna metrološka organizacija pošlje usklajene CMC-je predsedniku JCRB. Naslednji korak predstavlja distribucija teh zmogljivosti do ostalih regionalnih metroloških organizacij, kjer sledi ponovno usklajevanje. Po potrebi nacionalni metrološki laboratoriji naredijo popravek svojih CMC. Šele po končnem usklajevanju so podatki vneseni v bazo podatkov. Osnovni kriteriji za vpis v bazo podatkov so: sodelovanje v ključnih

medlaboratorijskih primerjavah, dokumentirani rezultati sodelovanja v posameznih bilateralnih ali multilateralnih primerjavah, preglednost in odprtost delovanja nacionalnega metrološkega laboratorija, aktivno sodelovanje v projektih regionalne metrološke organizacije, razpoložljivost ustreznih merilnih postopkov in opreme, tehnična in znanstvena usposobljenost zaposlenih v laboratoriju, aktiven sistem kakovosti in vsaj ena od naslednjih treh možnosti presoj: neposredna strokovna presoja, samooklic ali akreditacija s strani neodvisne akreditacijske službe.

Baza podatkov ključnih medlaboratorijskih primerjav vsebuje štiri dodatke MRA, in sicer:

- Dodatek A: seznam laboratorijev in držav podpisnikov MRA
- Dodatek B: rezultate ključnih in dopolnilnih medlaboratorijskih primerjav, in sicer individualne vrednosti s pripadajočimi negotovostmi za vsak institut, referenčno vrednost ključne primerjave z njeno negotovostjo, če je pri posamezni primerjavi določena, stopnjo ekvivalentnosti nacionalnega etalona in referenčne vrednosti ter stopnjo medsebojne ekvivalentnosti nacionalnih etalonov različnih držav
- Dodatek C: kalibracijske in merilne zmogljivosti za različne fizikalne veličine, ki so medsebojno usklajene in priznane
- Dodatek D: seznam ključnih in dopolnilnih medlaboratorijskih primerjav



## 4. Metrološki sistemi in zakonsko meroslovje

Merjenja podajajo numerični opis različnih proizvodov in aktivnosti. Posledično služijo tudi kot osnova za vrsto odločitev, ki zadevajo vsakodnevno življenje ljudi na različnih področjih, kot so trgovina, znanost, tehnologija, industrija, zdravstvo, kmetijstvo in varnost.

Merjenje je omogočilo rojstvo znanosti in pospešitev znanstvenega napredka, ki je prispeval k razvoju civilizacije. Z razvojem družbe je prišlo tudi do čedalje večjih zahtev po merjenju. Industrializacija je omogočila razvoj širokega spektra tehnologij in večjega števila ter kompleksnosti poslovnih transakcij. Masovna proizvodnja in avtomatizacija sta podali potrebo po izmenjavanju delov, urbanizacija pa je vodila k večjim raznolikostim v medsebojnih človeških vplivih.

Meroslovje je znanost in aktivnost povezana z merjenjem. Vključuje teorijo merjenj, merilne enote in njihovo fizikalno realizacijo, karakteristike merilnih instrumentov, merilne postopke in metode ter osebe in organizacije, povezane z uvajanjem in razvojem merjenj.

### Primeri vplivov merjenj na družbo

- Ročna ura je točen merilni instrument za dnevno uporabo.
- Nizke tolerance v dimenzijah motorja z notranjim izgorevanjem so pomembne za manjšo porabo goriva, manjše onesnaženje okolja in za podaljšanje življenjske dobe.
- Zagotavljanje kakovosti proizvodov zahteva ustrezne meritve ter ustrezne sledljive povezave za prepoznavanje referenc (merilni fizikalni etaloni), kar je določeno v mednarodnih standardih, kot so ISO 9000, ISO 14000, avtomobilski in medicinski standardi.
- Pomanjkljiva točnost opreme za radioterapijo lahko povzroči škodljiva sevanja, oziroma ne doseže želenega učinka na rakaste tvorbe.
- Senzorji se uporabljajo za redno preverjanje vsebnosti sladkorja v sadju, s katerim določijo najbolj ustrezen čas za pobiranje pridelka.
- Vesoljske raziskave zahtevajo izjemno točna merjenja dolžin in časa.
- V srednje velikih razvitih državah prinašajo razlike pri točenju naftnih derivatov nekaj deset milijard dolarjev letno.
- Pregledi vodenja zadnjih deset let so pokazali, da za aktivnosti, ki so povezane z metrologijo v industrijskih državah porabijo od tri do pet odstotkov bruto družbenega proizvoda.

### Verodostojnost merjenja

Vsak, ki je posredno ali neposredno povezan z merjenji, pričakuje verodostojne merilne rezultate. To je rezultate, ki od prave vrednosti ne odstopajo več, kot je sprejemljivo. Merilna verodostojnost je odvisna od številnih medsebojno prepletenih dejavnikov, ki so povezani z merilnimi procesi, kot so na primer umerjanje ali kalibracija, sledljivost, ocenjevanje skladnosti, usposobljenosti osebja in laboratorijske strokovnosti.

**Metrološka infrastruktura**

Metrološka infrastruktura je bistvena za izvajanje verodostojnih meritev in sestoji iz elementov kot so informacije, izobraževanje, raziskave, materialna sredstva in pripomočki za umerjanje. Ta sredstva omogočajo reševanje merilnih problemov z vedenjem kaj meriti, kako meriti ter kako oceniti in predstaviti merilne rezultate. Metrološka infrastruktura obstaja v večini držav, najti jo je moč na specifičnih področjih, kot so strojništvo, varstvo okolja, diagnostika v medicini in zdravstvu.

Kljub velikemu številu, velikosti ali specializaciji morajo metrološke infrastrukture delovati enotno in v soglasju. Primer so letalske komponente izdelane v različnih državah, ki morajo imeti točno izmerjene dimenzije in mehanske karakteristike, sicer bi bila sestava končnega izdelka nemogoča. Takšna doslednost je zagotovljena s sodelovanjem med nacionalnimi metrološkimi infrastrukturami na mednarodni in regionalni ravni.

**Vloga države v metrologiji**

V vsaki državi je državna oblast vključena v aktivnosti s ciljem vzpodbujati ekonomski razvoj, zagotavljati zdravstveni standard in varnost prebivalstva, podpirati izobraževanje in raziskovalno delo, nadzorovati nacionalno konkurenčnost ter vpeljevati druge aktivnosti povezane z javnimi interesi. Na področju metrologije je država odgovorna za zagotavljanje pravih postopkov v metrološki infrastrukturi z namenom zagotavljanja določenih zaščit prebivalstva.

**Glavne vloge države v metrologiji**

- Definicija kompatibilnih enot pri meritvah.
- Vzdrževanje nacionalnih merilnih etalonov (dolžine, mase, časa, itd) in zagotavljanje njihove enotnosti s podobnimi merilnimi etaloni v drugih državah.
- Organizacija metroloških povezav (sledljivosti) med nacionalnimi merilnimi etaloni in merilnimi procesi.
- Ustanovitev zakonskega meroslovja.
- Ustanovitev sistema akreditacije metroloških laboratorijev.
- Prispevati k razvoju metroloških raziskav, šolanja in informiranja.

Te odgovornosti in naloge običajno prevzamejo nacionalne metrološke službe (NMI – National Metrology Institute).

Metrologija pa se razširja tudi na področja, kot je raziskovanje in razvoj, industrija, trgovina, medicina, poklicna varnost in okoljevarstvena kontrola. Pokriva tudi nivoje točnosti od primarnih merilnih etalonov do navadnih merilnih instrumentov. Glede na širok spekter uporabe so lahko za določene metrološke zadeve odgovorni različni ljudje. V takšnih primerih morajo nacionalne službe za metrologijo koordinirati aktivnosti v smislu zagotavljanja potrebne enotnosti v metrologiji.

### **Metrološki sistemi in zakonsko meroslovje**

Določena področja metrologije izražajo potrebo po zaupnosti in nepristranskosti pri meritvah, ki so direktno povezane z javnostjo. Zakonsko meroslovje naslavlja takšne potrebe večinoma skozi regulative, ki so orodje za zagotavljanje zadostne stopnje verodostojnosti pri merilnih rezultatih. Merilna verodostojnost je še posebno pomembna, kadar nastopi konflikt med interesi ali kadar nepravilne meritve pomenijo tveganje za posameznika ali družbo. To je vzrok za potrebo po vladnih interesih v aktivnostih zakonskega meroslovja.

Zakonsko meroslovje izvira iz potrebe po zagotavljanju poštenega trgovanja. Eden izmed njegovih najvažnejših prispevkov družbi je zviševanje učinkovitosti v trgovanju z vzdrževanjem zaupanja pri merjenju in zmanjševanjem stroškov pri poslovanju. Potreba za zaščito družbe na področjih zdravstva, varnosti in okolja je privedla do razvijanja zakonskega meroslovja tudi na teh področjih. Danes zakonsko meroslovje pokriva merilne instrumente kot so merilniki krvnega tlaka, števci električne energije, vodomeri, plinomeri, merilniki pretoka goriva itd (tabela 4.1).

Na vseh teh področjih zakonsko meroslovje pokriva merske enote, merilne instrumente ter ostale dejavnosti, kot je na primer prepakiranje proizvodov. V zvezi z merilnimi instrumenti zakonsko meroslovje posebej določa zahtevane sposobnosti, preverjenost procesov za zagotavljanje sledljivosti zakonito definiranih merilnih enot in predpisanih smernic za uporabo.

Predpisi zakonskega meroslovja so uporabljeni s strani ali v imenu oddelka za zakonsko meroslovje, ki je po možnosti del ali pa je vsaj tesno povezan z nacionalno metrološko službo.

Tabela 4.1: Nekaj področij zakonskega meroslovja.

<i>Trgovina</i>	<i>Varnost</i>	<i>Okolje</i>	<i>Zdravstvo</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• instrumenti za avtomatsko tehtanje</li> <li>• merilni sistemi za tekočine</li> <li>• plinomeri in vodomeri</li> <li>• elektronski taksimetri</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alkotesti</li> <li>• poklicno varnostni merilni instrumenti</li> <li>• dozimetrijski instrumenti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• instrumenti za merjenje onesnaženj a zraka, vode in zemlje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• različni klinični in medicinski merilni instrumenti</li> </ul>

# OIML

## OIML

Internacionalizacija je bistvena lastnost pri merjenih, kajti mednarodni trg določa globalno ekonomijo. Znanstveno-tehnološke in medicinske raziskave so odvisne predvsem od mednarodnega sodelovanja. Odkar merjenje tvori osnovo za množične aktivnosti, sta mednarodna izmenjava znanja in strokovno znanje postala pomembna koraka v napredku širokega spektra področij. Zato se veliko število mednarodnih institucij ukvarja z metrologijo na področjih, kot je standardizacija, akreditacija, certificiranje, fizika, kemija in zdravstvo.

Da bi se metrološke stvari, ki še posebej zadevajo vlado, lahko naslovile nanjo, je bilo na podlagi Meterske konvencije in mednarodne organizacije za zakonsko meroslovje (International Organization of Legal Metrology - OIML) osnovano mednarodno medvladno sodelovanje v metrologiji. Meterska konvencija je primarno zadolžena za določitev mednarodnega sistema merskih enot (SI) in za vzdrževanje mednarodnih merilnih etalonov ter za vzdrževanje povezav z ustreznimi nacionalnimi etaloni.

Glavni cilj OIML je osnovati sodelovanje, pomembno za naslavljanje zakonskih meroslovnih zadev mednarodnih interesov. OIML skrbi tudi za odstranjevanje tehniških ovir, ki so rezultat neenotnih nacionalnih metroloških predpisov.

Strukturi Meterske konvencije in OIML vzdržujeta dobre povezave z drugimi mednarodnimi in regionalnimi telesi, ki se ukvarjajo z metrologijo. Skozi to sodelovanje se mednarodni metrološki problemi naslavlajo ter rešujejo.



ORGANISATION INTERNATIONALE  
DE METROLOGIE LÉGALE

INTERNATIONAL ORGANIZATION  
OF LEGAL METROLOGY

## Zgodovina OIML

Konec 19. stoletja je postajala potreba po pospešitvi mednarodne trgovine v proizvodnji in industrijskih proizvodih preko poenotenja ali harmonizacije merilnih enot vedno večja. Dejavnosti v tej smeri so se zaključile z Metersko konvencijo, ki je bila podpisana leta 1875. Kmalu zatem je bilo jasno, da samo vzpostavitev nacionalnih etalonov ni dovolj za odpravo vseh zaprek v mednarodni trgovini. Prav tako je bilo potrebno tudi poenotenje zahtev merilnih instrumentov in načinov, kako se instrumente verificira, oziroma kako se zagotavlja njihovo sledljivost glede na nacionalne primarne merilne etalone.

Države podpisnice Meterske konvencije so se odločile, da Mednarodni urad za mere in uteži – BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) ne bo deloval tudi na področju zakonskih vidikov meroslovja. Ustanovile so novo, neodvisno mednarodno organizacijo. Tako je bila v Parizu leta 1939 sklicana prva mednarodna konferenca za praktično in zakonsko meroslovje. Leta 1955 je bila z mednarodno pogodbo ustanovljena nova organizacija International Organization of Legal Metrology (OIML).

### Članstvo in povezave v OIML

Glede na pogodbo ima OIML dve vrsti članic: države podpisnice in pridružene članice. Države podpisnice odobrijo zborovanje in aktivno sodelujejo pri delu OIML, pridružene članice pa so samo informirane o rezultatih dela. Slovenija je država članica OIML. Povezave se vzdržujejo z mednarodnimi in regionalnimi organizacijami na področjih metrologije, standardizacije, fizike, kemije, industrijskega razvoja, kmetijstva, zdravja in varstva okolja. Za OIML pomembne povezave so tudi združenja proizvajalcev merilnih naprav in uporabnikov ter drugih zainteresiranih strank.

### Cilji OIML

Glavni cilji OIML

- Osnovati in podpirati informacijske centre za zakonsko meroslovje.
- Določiti in preučevati osnovna načela zakonskega meroslovja v okviru mednarodnih interesov.
- Osnovati priporočila za določanje kriterijev delovanja merilnih instrumentov in pomen za njihov pregled in kontrolo.
- Med članicami OIML pospeševati vzajemno priznavanje instrumentov in merilnih rezultatov, ki se podrejajo OIML zahtevam.
- Pospeševati sodelovanje med nacionalnimi službami za zakonsko meroslovje in jim pomagati pri njihovem razvoju.

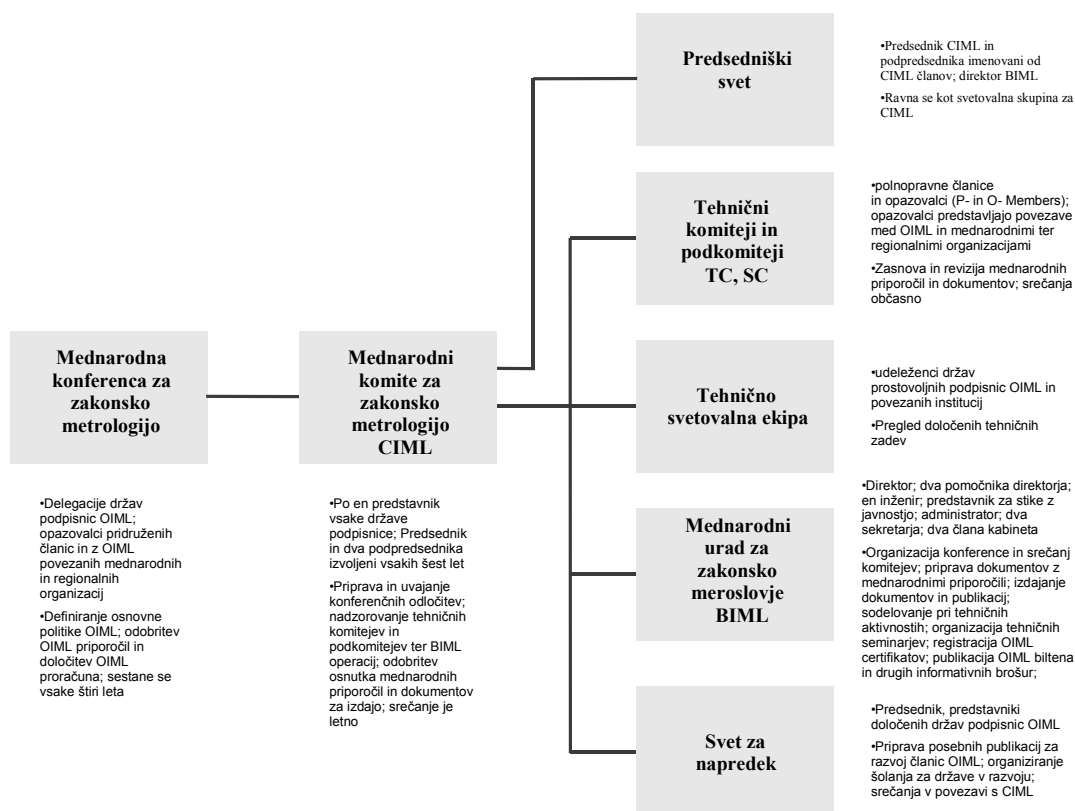
### Struktura OIML

**Mednarodna konferenca za zakonsko meroslovje**  
(International Conference of Legal Metrology)

Kot najvišja ustanova organizacije je konferenca odgovorna za definiranje osnovne politike, sankcioniranje oziroma potrjevanje mednarodnih priporočil in za sprejemanje OIML proračuna. Sestane se vsaka štiri leta. Tvorijo jo uradne delegacije držav podpisnic in opazovalke, ki jih predstavljajo pridruženi člani in zveze mednarodnih ter regionalnih organizacij.

**Mednarodni komite za zakonsko meroslovje**  
(International Committee of Legal Metrology)

Mednarodni komite za zakonsko meroslovje (CIML) je usmerjevalni odbor za OIML. CIML se sestaja vsako leto in vsebuje po enega predstavnika vsake države podpisnice. Izvoljeni predsednik in dva podpredsednika predsedujejo jedru predsedniškega sveta. Odgovornosti CIML vsebujejo pripravo in uvajanje konferenčnih odločitev v prakso – nadzorovanje tehničnih aktivnosti (tehničnih komitejev in podkomitejev) in administrativnih operacij (mednarodni urad za zakonsko meroslovje), odobritev osnutka mednarodnih priporočil in dokumentov za takojšnjo publikacijo, nadzorovanje povezav med OIML in drugimi organizacijami.



Slika 4.1: Organizacijska struktura OIML.

### Tehnični komiteji (TC) in podkomiteji (SC)

Tehnični komiteji in podkomiteji so odgovorni za razvoj mednarodnih priporočil in dokumentov. Vsak tehnični komite ali podkomite je sestavljen iz članov in opazovalcev iz držav podpisnic OIML. Opazovalci predstavljajo zvezo mednarodnih in regionalnih organizacij, na primer institutov za standardizacijo, združenj proizvajalcev in povezovalnih regionalnih teles. Delovni program tehničnih komitejev in podkomitejev OIML je odobren s strani CIML, aktivnosti pa se izvršujejo v soglasju z OIML navodili za tehnično delovanje OIML.

### Razvojni svet

Posebno aktivnost za države v razvoju predstavlja prizadevanje OIML razvojnega sveta. Ta aktivnost vsebuje pripravo smernic za ustvarjanje OIML priporočil in posebnih publikacij na teme, kot je gradnja in opremljanje laboratorijev za metrologijo ter učenje osebja. Razvojni svet ustanavlja povezave med državami podpisnicami in posebnimi organizacijami, z namenom prepoznavanja potrebne tehnične in finančne pomoči za razvijajoče se aktivnosti ter organizira šolanja inženirjev in meroslovcev iz držav v razvoju.

### Mednarodni urad za zakonsko meroslovje (International Bureau of Legal Metrology)

Stalni organ OIML je Mednarodni urad za zakonsko meroslovje (BIML) v Parizu. Odgovornosti BIML vključujejo: pripravo konference in CIML srečanj, izdajanje OIML mednarodnih priporočil, dokumentov in drugih publikacij, četrletno izdajanje OIML biltena, zasledovanje aktivnosti tehničnih komitejev in podkomitejev ter razvijanje delovnih dokumentov, ustanavljanje povezav med mednarodnimi in regionalnimi organizacijami, organiziranje in sodelovanje pri različnih tehničnih seminarjih, registracija OIML certifikatov, razdeljevanje in prodaja vseh OIML publikacij, razvijanje in uvajanje OIML politike v notranjih in zunanjih povezavah ter delovanje kot središčna točka vseh informacij v okviru OIML.

# WELMEC

## WELMEC

Evropsko zakonsko meroslovje urejuje organizacija WELMEC (Western European Legal Metrology Cooperation), ki jo je leta 1990 ustanovilo 18 predstavnikov držav Evropske unije in članic EFTA. Danes so države članice tudi srednjeevropske in vzhodnoevropske države. Danes kratica WELMEC predstavlja organizacijo Evropskega sodelovanja v zakonskem meroslovju.

Poglavitni cilj organizacije je vzpostaviti usklajen in dosleden pristop k evropskem zakonskem meroslovju. WELMEC se ukvarja z vzpostavljanjem, vzdrževanjem in izboljšavami komunikacijskih poti med svojimi člani z namenom, da s svojimi dejavnostmi zagotovi medsebojno zaupanje med metrološkimi službami. WELMEC sodeluje z drugimi regionalnimi metrološkimi organizacijami in z ostalimi organizacijami, kot je na primer Evropsko trgovinsko združenje.

## Cilji

- razviti medsebojno zaupanje med metrološkimi službami
- doseči usklajenost v zakonskem meroslovju
- ugotoviti posebne lastnosti zakonskega meroslovja, ki morajo biti upoštevane v evropski metrologiji, certificiranju in preskušanju
- organizirati izmenjavo informacij
- spodbujati odstranjevanje preprek v trgovini merilnih inštrumentov
- spodbujati doslednost interpretacij in uporabe normativnih dokumentov in predlagati ukrepe za njihovo enostavnejšo uporabo
- vzdrževati povezave z drugimi organizacijami zakonskega meroslovja

# EURAMET

## EURAMET

EURAMET je organizacija, ki povezuje nacionalne metrološke institute (NMI) Evropske unije, Evropske komisije, EFTE in pristopne članic EU. Tudi ostale evropske države so na osnovi določenih kriterijev lahko vključene v EURAMET. V 2011 je bilo v EURAMET vključenih 37 evropskih držav.

Namen EURAMET-a je podpora na področju metroloških aktivnosti in storitev z namenom boljše učinkovitosti.

Formalna osnova za nastanek EURAMET-a je bil dogovor Memorandum of Understanding (MOU), podpisan leta 1987 v Madridu.



Slika 4.2: Članice EURAMET-a (leto 2011).

## Cilji

Poglavitni cilj EURAMET-a je koordinirana evropska metrološka infrastruktura, ki bi zadostovala vsem potrebam evropske industrije. Cilje dosega s sodelovanjem v medlaboratorijskih primerjavah, ki zagotavljajo priznavanje merilnih etalonov, in sodelovanjem z drugimi regionalnimi metrološkimi institucijami.

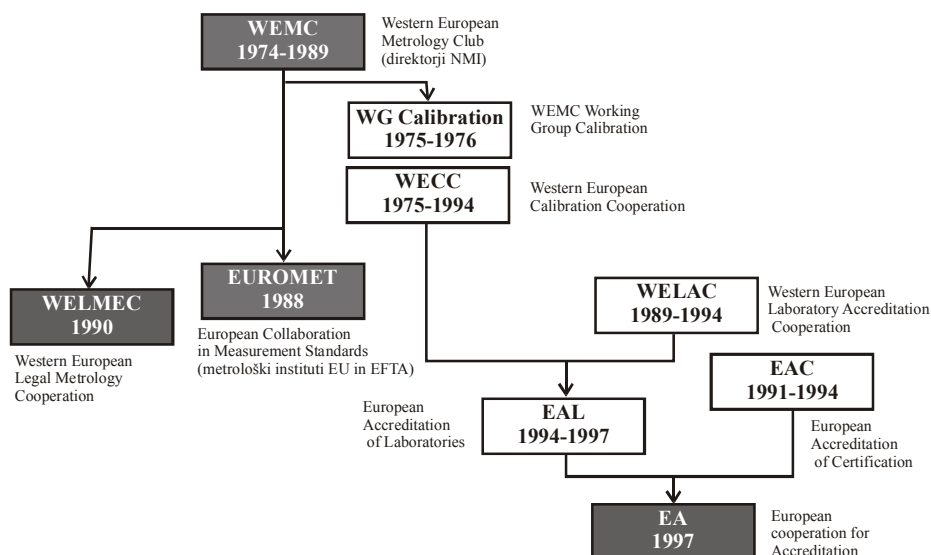
Konkretni cilji:

- pospeševati sodelovanje v izgradnji nacionalnih etalonov in merilnih metod
- optimizirati uporabo virov in storitev
- izboljšati merilne naprave in jih narediti dostopne vsem članom
- izvajati medlaboratorijske primerjave za zagotavljanje večje skladnosti meritev



## Partnerji EURAMET-a

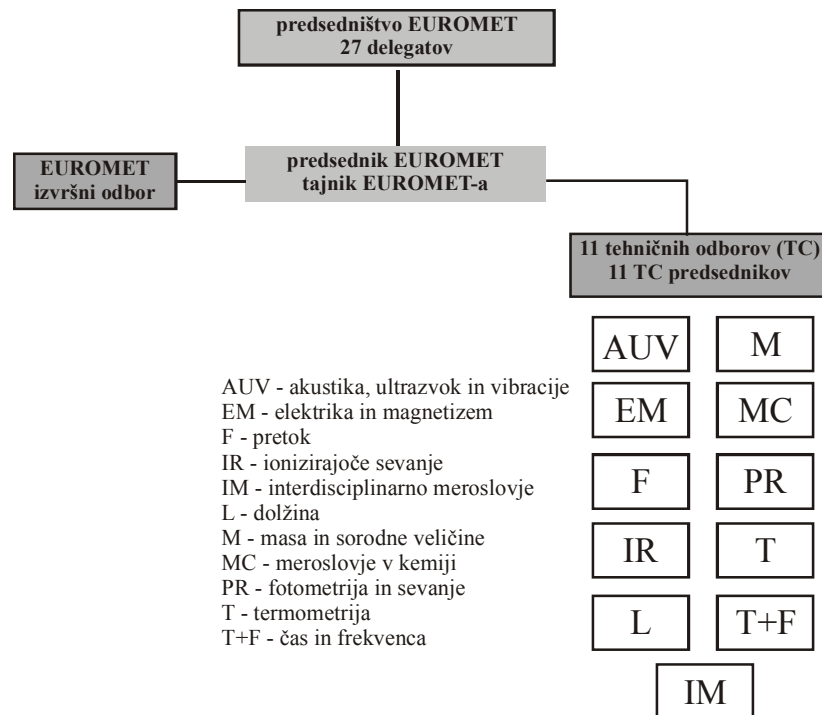
- regionalne metrološke organizacije
- evropski COOMET - Cooperation in Metrology among the Central European countries, azijsko-pacifiški APMP - Asia Pacific Metrology Program, ameriški SIM - Sistema Interamericano de Metrologia, ki vključuje tudi NORAMET - North American Metrology Cooperation, afriški SADC MET - Southern African Development Community Cooperation in Measurement Traceability
- CIPM in BIPM
- akreditacijska in regulacijska metrološka telesa
- EA (Evropska akreditacija) – za medsebojno priznavanje certifikatov kalibracij in preskusov, WELMEC (European Cooperation for Legal Metrology) za pravno podlago metroloških dejavnosti



Slika 4.3: Razvoj organizacij in institucij po letu 1974.

## Znanstvena polja delovanja EURAMET-a

- masa in sorodne veličine
- elektrika in magnetizem
- dolžina
- čas in frekvenca
- termometrija
- fotometrija in radiometrija
- pretok
- ionizirno sevanje
- akustika, ultrazvok in vibracije
- množina snovi
- interdisciplinarna metrologija



Slika 4.4:  
Struktura  
organizacije  
EURAMET.

### EURAMET projekti

Poglavitna dejavnost EURAMETa je sestavljena iz več kot 245 aktivnih projektov. Do danes jih je bilo dokončanih več kot 315. Ti projekti so organizirani v smislu delitve na enajst znanstvenih polj delovanja in razdeljeni na štiri tematike: sodelovanje v raziskavah, primerjave, sledljivost in posvetovanje o napravah.

## 5. SI sistem merskih enot

**Zgradba SI sistema** Mednarodni sistem veličin ISQ (International System of Quantities) in mednarodni sistem enot SI (Système International d'Unités) pozna sedem osnovnih fizikalnih veličin in njihovih osnovnih enot, s katerimi je mogoče opisati vse fizikalne postopke in zakone [5]. Osnovne enote so predstavljene v tabeli 5.3. Na sliki 5.1 so prikazane osnovne enote in iz njih izpeljane enote SI sistema. Osnovne enote se nahajajo v črnih elipsah v prvem stolpcu. Kot simbole za veličine se uporabljajo poševne črke. V tabelah 5.4, 5.5 in 5.6 pa so prikazane nekatere izpeljane fizikalne veličine. V tabeli 5.1 so prikazane predpone SI sistema, medtem ko so v tabeli 5.2 prikazane merske enote izven mednarodnega sistema enot s posebnimi imeni. Če simbol za številsko vrednost zapišemo v zavitem oklepaju in simbol za enoto v oglatem oklepaju, dobimo za poljubno vrednost fizikalne veličine zapis, v katerem se številška vrednost loči od enote samo s presledkom.

$$l = \{l\} [l] \quad (5.1)$$

**Enote, sistemi enot in etaloni** Merjenje razmerja omogoča primerjavo velikosti neznane fizikalne veličine z znano, ki ima enako dimenzijo. Znana velikost fizikalne veličine, na katero se sklicujemo, se imenuje *mera* ali *merilo*. Za osnovna merjenja so mere standardizirane in za enostavnost uporabe izenačene z enotami. V tem primeru mera določa *enoto* veličine, ki se meri. Rezultat osnovnega merjenja fizikalne skalarne veličine se lahko zapiše kot:

$$\text{velikost} = \{\text{vrednost}\} \cdot [\text{enota}] \text{ ali } x = \{x\} \cdot [x] \quad (5.2)$$

Označimo vektorsko fizikalno veličino  $\vec{x}$  kot:

$$\vec{x} = \{x\} [x] \vec{e} \quad (5.3)$$

kjer je  $\vec{e}$  enotski vektor (ista smer kot  $\vec{x}$ ), ki vsebuje (brezdimenzijsko) informacijo o smeri  $x$  glede na (poljubno) izbran koordinatni sistem.

Med fizikalnimi veličinami različnih dimenzij obstajajo medsebojne povezave v obliki definicij in naravnih zakonov. To so matematične relacije, ki določajo povezavo med različnimi fizikalnimi veličinami. Tako lahko odnos med različnima veličinama zavzame obliko:

$$x = f A^a B^b C^c \dots \quad (5.4),$$

kjer številski faktor  $f$  v splošnem ni enak 1. Enote  $[A]$ ,  $[B]$  in  $[C]$  tvorijo novo enoto  $[x]$ .

Veličinska enačba se lahko razdeli na številsko enačbo

$$\{x\} = f \{A\}^a \{B\}^b \{C\}^c \dots \quad (5.5),$$

ki vsebuje samo velikosti različnih fizikalnih veličin, in na *enotsko enačbo*

$$[x] = [A]^a [B]^b [C]^c \dots \quad (5.6),$$

ki vsebuje le enote posameznih fizikalnih veličin.

Primer enačb za kinetično energijo telesa s podatki  $m=1$  kg in  $v=10$  m/s:

veličinska enačba  $E = \frac{1}{2} m v^2$

številsko enačba  $\{E\} = \frac{1}{2} \{m\} \{v\}^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot (10)^2 = 50$

enotska enačba  $[E] = [m][v]^2 = [m][l/t]^2 = \text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$

Koherentni sistem enot

Če so enote v enotski enačbi izbrane tako, da noben številski faktor ni različen od ena, pravimo, da so enote **koherentne** glede na veličinsko enačbo. Primer nekoherentnih enot so npr. palci, čevlji ipd.

Možno je vzpostaviti sistem popolnoma koherentnih enot.

Pomanjkljivost takšnega sistema je, da so nekatere izpeljane enote neprimerno velike v primerjavi s praktičnimi vrednostmi. Takšen primer v mednarodnem sistemu enot SI je enota za kapacitivnost farad. Največje vrednosti kapacitivnosti običajnih kondenzatorjev so reda  $10^{-3}$  faradov. V ta namen se pogosto uporabljajo predpone, kot so mikro, mili, kilo, mega, itd.

Osnovne in izpeljane veličine

Če je  $k$  število neodvisnih fizikalnih veličinskih enačb, ki opisujejo določeno področje v fiziki (na primer termodinamika, mehanika, elektromagnetizem),  $n$  pa je število različnih veličin, ki nastopajo v  $k$  enačbah, potem lahko poljubno izberemo  $n - k$  **osnovnih veličin** v sistemu enot, ki ustrezajo določenemu fizikalnemu področju. Ostale veličine so **izpeljane veličine**, ki sledijo osnovnim veličinam in  $k$  enačbam. Osnovne veličine so povezane po definiciji z ustreznimi fizikalnimi pravili.

Določitev, katera veličina v sistemu enot naj bo osnovna veličina (s pripadajočo osnovno enoto), je pogojena z enostavnostjo njenega merjenja, z logično strukturo sistema enot in z enostavno realizacijo fizikalnih pravil. Število osnovnih veličin  $n-k$  je odvisno od števila veličin  $n$  in števila fizikalnih enačb  $k$ , ki so medsebojno neodvisne.

Na primer, v mehaniki bi bilo poleg dolžine  $l$ , mase  $m$  in časa  $t$  možno kot osnovno veličino izbrati tudi silo  $F$ . Rezultat tega bi bil, da bi se sedaj znana Newtonova enačba  $F=ma$  spremenila v enačbo  $F=cma$ , v kateri nastopa fizikalna konstanta  $c$  s fizikalno dimenzijo

$$[c]=[F][t]^2/[m][l].$$

Prav tako je možno izbrati manjše število osnovnih veličin, na primer samo  $l$  in  $t$ , namesto običajnih  $l$ ,  $m$  in  $t$ . Dimenziji mase in sile bi bili potem določeni z enačbama  $F=c_1ma$  in  $F=c_2m_1m_2/r^2$ , kjer sta  $c_1$  in  $c_2$  številske konstante. Tako bi bila dimenzija mase  $[m]=[l]^3/[t]^2$  in dimenzija sile  $[F]=[l]^4/[t]^4$ .

Iz primerov je razvidno, da so posledica izbire prevelikega števila osnovnih veličin konstante v enotskih enačbah, ki imajo fizikalne dimenzije. Izbira najmanjšega možnega števila osnovnih veličin daje številske konstante. Te številske konstante so, če je sistem koherenten, enake ena.

Prejšnji primeri kažejo, da so izpeljane veličine sestavljene iz produktov potenc osnovnih veličin. Ustrezna enotska enačba prikazuje, katere osnovne enote so bile uporabljene za izpeljavo izvedene enote ali drugače povedano, kakšno fizikalno dimenzijo ima določena enota. Dimenzija  $[A]$  za površino  $A$  je na primer enaka  $[l]^2$ .

Če bi bile osnovne veličine sistema  $l$ ,  $m$ ,  $t$  in  $I$ , potem bi bila dimenzija  $[V]$  električnega potenciala  $V$  enaka  $[m][l]^2/[I][t]^3$ .

Zatorej analiza dimenzij v enačbi predstavlja sredstvo za ugotavljanje pravilnosti enačbe. Pravilna enačba fizikalnih veličin mora izpolnjevati naslednje pogoje: dimenziji leve in desne strani morata biti enaki, členi seštevanja in odštevanja morajo biti enakih dimenzij, eksponenti in argumenti matematičnih funkcij morajo biti brez dimenzij.

Zapišimo enačbo za pospešek pri enakomerno pospešenem gibanju telesa s hitrostjo  $v$  v času  $t$ .

$$a = \frac{v}{t} \quad (5.7),$$

Ta enačba določa enotsko enačbo  $[a]=[t]^{-1}[v]$ .

Enačba  $v=ds/dt$  prinaša  $[v]=[s][t]^{-1}$ .

Eksponent v eksponentni funkciji  $I=I_S(e^{qV/kT}-1)$ , ki opisuje karakteristiko polprevodniške diode, mora biti brez dimenzije. To je izpolnjeno, ker je  $k=1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ .

V enačbi  $v(t) = \hat{v} \sin(\omega t + \phi)$ , mora biti  $\phi$  brez dimenzije, kot tudi člen  $\omega t$ , kar pomeni, da je  $[\omega]=[t]^{-1}$ .

Čeprav so dimenzije v enačbi, ki opisuje odnos med različnimi fizikalnimi veličinami, pravilne, pa sama enačba ni nujno pravilna. Napaka se lahko pojavi pri postavitvi enačbe. Pravilne dimenzije so torej nujen, ne pa tudi zadosten pogoj za pravilnost fizikalne enačbe.

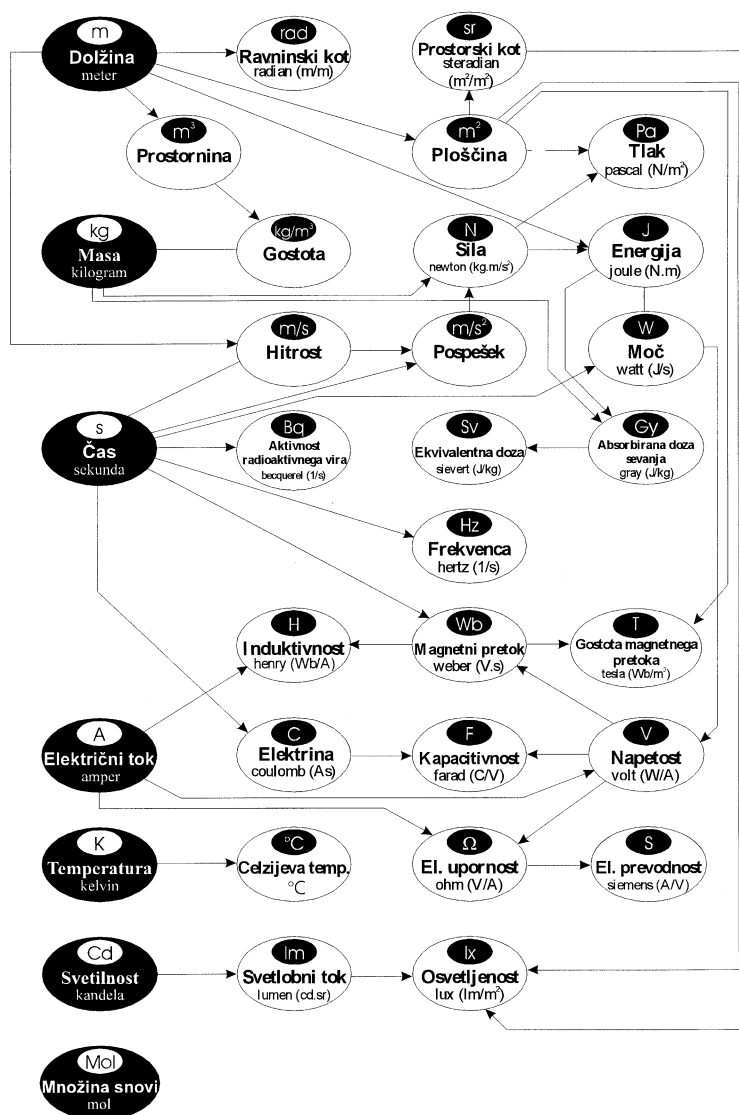
Čeprav je možnosti za izbiro sistemov enot veliko, prinaša izbira mednarodno sprejetega in standardiziranega sistema enot veliko prednosti. Takšen je SI sistem enot, ki ima sedem osnovnih enot. Te so: meter za dolžino, kilogram za maso, sekunda za čas, amper za električni tok, kelvin za termodinamsko temperaturo, candela za svetilnost in mol za količino snovi. Kot dodatek sta definirani še dve brezdimenzijski števili, in sicer radian za merjenje kota v dvodimenzionalnem prostoru ter steradian za tridimenzionalna kotna merjenja. Vse ostale enote tega sistema so izpeljane enote.

SI sistem je koherenten sistem enot. Sistem je tudi **racionaliziran**, kar pomeni, da faktorja  $2\pi$  in  $4\pi$  nastopata le pri izrazih, kjer nastopata rotacijska oziroma sferična simetrija. Candela je bila uvedena v sistem za poenostavitev merjenja svetlobne jakosti. Le-ta vključuje fiziološko občutljivost človeškega očesa. Svetlobna jakost se lahko definira tudi z valovno dolžino in energijo svetlobe. V bistvu je torej candela odvečna enota. Candela in iz nje izpeljane enote tvorijo ločen del SI sistema in se uporabljajo izključno v fotometriji.

V preteklosti je bilo istočasno v uporabi kar nekaj sistemov enot, ki so bili vsak po svoje prilagojeni določenim fizikalnim področjem. Razširjen je bil *cgs* sistem (centimeter, gram, sekunda). V elektrotehniki sta bila v uporabi dva sistema, in sicer e.s.u. (elektrostatične enote) in e.m.u. (elektromagnetne enote). V e.s.u. sistemu je bila absolutna dielektričnost vakuumu  $\epsilon_0$  brez dimenzij z vrednostjo 1. Absolutna permeabilnost vakuumu  $\mu_0$  je sledila iz enačbe  $\epsilon_0\mu_0c^2=1$ , kjer je  $c$  hitrost svetlobe v vakuumu. Zato je imela kapacitivnost dimenzijo dolžine. Enoti gauss in oersted, ki sta še vedno v uporabi kot enoti magnetne indukcije oziroma jakosti magnetnega polja, prav tako izvirata iz tistega časa. V SI sistemu je absolutna permeabilnost določena kot  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m, iz česar sledi, da je vrednost  $\epsilon_0=1/\mu_0c^2$  približno enaka  $8.854 \cdot 10^{-12}$  F/m.

Izraza **enota** in **fizikalna veličina** sta abstraktna pojma. Da bi se lahko enota uporabljala kot mera, mora biti na razpolago realizacija enote t.i. **fizikalni etalon**.

Etalon je lahko otipljiv predstavnik fizikalne veličine, na primer kilogram kot etalonska mera za maso. Lahko pa je definiran tudi s standardiziranim postopkom merjenja in uporabo standardiziranih merilnih metod ter opreme. Takšen primer predstavlja merjenje električnega toka s pomočjo tokovne tehtnice. Tretja možnost je uporaba naravnih pojavov kot fizikalnih etalonov. Etaloni za dolžino, čas in električni potencial so na primer definirani na osnovi atomskih procesov.



Slika 5.1: Enote SI sistema.

**Primarni (merilni) etalon** je ima najvišjo metrološko veljavo za določeno fizikalno veličino. Po definiciji je to etalon, ki je vpeljan po primarni proceduri, s katero dosežemo merilni rezultat brez sklicevanja na etalone iste veličine, ali pa je imenovan za s konvencijo izbran artefakt [7]. Mnoge države imajo več primarnih etalonov. Ti nacionalni primarni etaloni se v splošnem realizirajo, vzdržujejo, hranijo in izboljšujejo v nacionalnih laboratorijih za uteži in mere.

V idealnem primeru se primarni etaloni varno hranijo in ne uporabljajo pogosto, pogosta merjenja pa se izvajajo s sekundarnimi ali celo terciarnimi etaloni (delovni etaloni). Le-ti so umerjeni ali kalibrirani glede na višje etalone (primarne ali sekundarne). Tudi etaloni nižjih redov, ki so prisotni v vsakem instrumentu, se lahko uporabljajo za osnovna merjenja. Zato pa morajo biti instrumenti redno umerjeni (kalibrirani), kajti staranje, lezenje, uporaba itd. so vzroki, da je negotovost notranjega etalona, imenovanega tudi referenca, vse večja.

Tabela 5.3: Osnovne veličine in osnovne enote mednarodnega sistema enot.

osnovna veličina	simbol	osnovna enota	
		ime	oznaka
dolžina	$l, s$	meter	m
masa	$m$	kilogram	kg
čas	$t$	sekunda	s
električni tok	$I$	amper	A
termodinamična temperatura	$T$	kelvin	K
množina snovi	$n$	mol	mol
svetilnost	$I_v$	kandela	cd

Tabela 5.4: Izpeljane veličine, izražene s pomočjo izpeljanih veličin s posebnimi imeni.

izpeljana veličina	ime enote	oznaka
kotna hitrost	radian na sekundo	rad/s
kotni pospešek	radian na sekundo kvadrat	rad/s <sup>2</sup>
energijska jakost sevanja	watt na steradian	W/sr
kinematična viskoznost	kvadratni meter na sekundo	m <sup>2</sup> /s
dinamična viskoznost	pascal sekunda	Pa s=kg/m s
navor, moment sile	newton meter	N m=kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
površinska napetost	newton na meter	N/m=kg/s <sup>2</sup>
gostota toplotnega toka	watt na kvadratni meter	W/m <sup>2</sup> =kg/s <sup>3</sup>
toplotna kapacitivnost, entropija	joule na kelvin	J/K=kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> K
specifična toplotna kapacitivnost	joule na kilogram kelvin	J/kg K=m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> K
specifična energija	joule na kilogram	J/kg=m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
toplotna prevodnost	watt na meter kelvin	W/m K=kg m/s <sup>3</sup> K
gostota energije	joule na kubični meter	J/m <sup>3</sup> =kg/m s <sup>2</sup>
električna poljska jakost	volt na meter	V/m=kg m/s <sup>3</sup> A
gostota elektrine	coulomb na kubični meter	C/m <sup>3</sup> =s A/m <sup>3</sup>
gostota električnega pretoka	coulomb na kvadratni meter	C/m <sup>2</sup> =s A/m <sup>2</sup>
dielektričnost	farad na meter	F/m=s <sup>4</sup> A <sup>2</sup> /kg m <sup>3</sup>
permeabilnost	henry na meter	H/m=kg m/s <sup>2</sup> A <sup>2</sup>
molska energija	joule na mol	J/mol=kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> mol
molska toplotna kapacitivnost	joule na mol kelvin	J/mol K= kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> molK
izpostavljenost X in $\gamma$ žarčenju	coulomb na kilogram	C/kg=A s /kg
stopnja absorbirane doze	gray na sekundo	Gy/s=m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>



Tabela 5.5: Primeri izpeljanih veličin izraženih z osnovnimi.

veličina	ime enote	oznaka
ploščina	kvadratni meter	m <sup>2</sup>
prostornina	kubični meter	m <sup>3</sup>
prostorninski pretok	kubični meter na sekundo	m <sup>3</sup> /s
masni pretok	kilogram na sekundo	kg/s
hitrost	meter na sekundo	m/s
pospešek	meter na sekundo kvadrat	m/s <sup>2</sup>
gostota	kilogram na kubični meter	kg/m <sup>3</sup>
specifična prostornina	kubični meter na kilogram	m <sup>3</sup> /kg
gostota toka	amper na kvadratni meter	A/m <sup>2</sup>
magnetna poljska jakost	amper na meter	A/m
koncentracija (množine snovi)	mol na kubični meter	mol/m <sup>3</sup>
molska masa	mol na kilogram	mol/kg
svetlost	kandela na kvadratni meter	cd/m <sup>2</sup>

Tabela 5.6: Izpeljane veličine s posebnimi imeni.

izpeljana veličina	enota			zapis	opomba
	simbol	ime	oznaka		
frekvenca	$f$	hertz	Hz	s <sup>-1</sup>	Heinrich Rudolf Hertz (1825-1894)
sila	$F$	newton	N	N=kg m/s <sup>2</sup>	sir Isaac Newton (1643-1727)
tlak, mehanska napetost	$p, \sigma$	pascal	Pa	Pa=N/m <sup>2</sup> =kg/m s <sup>2</sup>	Blaise Pascal (1623-1662)
delo, energija, toplota	$W, E, Q_w$	joule	J	J=N m=kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	James Prescott Joule (1818-1889)
moč, toplotni tok, energijski tok	$P, Q_w$	watt	W	W=J/s=kg m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>	James Watt (1736-1819)
električni naboj množina elektrine	$Q$ $q$	coulomb	C	C=A s	Charles Augustin de Coulomb (1736-1806)
električna napetost električni potencial	$U$	volt	V	V=W/A=kg m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> A	Alessandro Volta (1745-1827)
kapacitivnost	$C$	farad	F	F=C/V=s <sup>4</sup> A <sup>2</sup> /kgm <sup>2</sup>	Michael Faraday(1791-1867)
električna upornost	$R$	ohm	Ω	Ω=V/A=kg m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>	Georg Simon Ohm (1789-1854)
električna prevodnost	$G$	siemens	S	S=A/V=s <sup>3</sup> A <sup>2</sup> /kg m <sup>2</sup>	Werner von Siemens (1816-1892)
magnetni pretok	$\phi_m$	weber	Wb	Wb=V s=kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> A	Wilhelm Eduard Weber (1804-1891)
gostota magn. pretoka	$B$	tesla	T	T=Wb/m <sup>2</sup> =kg/s <sup>2</sup> A	Nikola Tesla (1856-1943)
induktivnost	$L$	henry	H	H=Wb/A=kgm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> A <sup>2</sup>	Joseph Henry(1797-1878)
celzijeva temperatura	$t, \vartheta$	stopinja celzija	°C	°C=K -273,15 °C=0 K	Anders Celsius (1701-1744)
svetlobni tok	$\phi_v$	lumen	lm	lm=cd sr	lumen (lat.) svetloba
osvetljenost	$E_v$	lux	lx	lx=lm/m <sup>2</sup> =cd sr/m <sup>2</sup>	lux (lat.) luč
aktivnost radioaktivnega vira	$A$	becquerel	Bq	s <sup>-1</sup>	Henri Antoine Becquerel (1825-1908)
absorbirana doza ionizirnega sevanja	$D$	gray	Gy	Gy=J/kg=m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Louis Harold Gray (1905-1965)
ekvivalentna doza ionizir.sevanja	$H$	sievert	Sv	Sv=J/kg=m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Rolf Maximilian Sievert (1896-1966)
ravninski kot	$\alpha$	radian	rad		dopolnilna enota SI
prostorski kot	$\Omega$	steradian	sr		dopolnilna enota SI

Tabela 5.7: Predpone SI sistema.

faktor	predpona	simbol	faktor	predpona	simbol
$10^{24}$	jota	Y	$10^{-1}$	deci	d
$10^{21}$	zeta	Z	$10^{-2}$	centi	c
$10^{18}$	eksa	E	$10^{-3}$	mili	m
$10^{15}$	peta	P	$10^{-6}$	mikro	$\mu$
$10^{12}$	tera	T	$10^{-9}$	nano	n
$10^9$	giga	G	$10^{-12}$	piko	p
$10^6$	mega	M	$10^{-15}$	femto	f
$10^3$	kilo	k	$10^{-18}$	ato	a
$10^2$	hekto	h	$10^{-21}$	zepto	z
$10^1$	deka	da	$10^{-24}$	jokto	y

Tabela 5.8: Merske enote izven mednarodnega sistema enot s posebnimi imeni (\* - vrednosti v SI enotah sta določeni eksperimentalno).

veličina	enota izven SI		vrednost v enotah SI	dopustna uporaba samo
	ime enote	oznaka		
dolžina	morska milja		1 morska milja=1852 m	v pomorskem, zračnem in rečnem prometu
	astronomska enota		1 astronomska enota= $1,4959787 \cdot 10^{11}$ m	v astronomiji
ploščina	ar	a	1 a= $100 \text{ m}^2$	za izražanje ploščine zemljišča
	hektar	ha	1 ha= $10.000 \text{ m}^2$	za izražanje ploščine zemljišča
prostornina	liter	l, L	1 l= $1 \text{ L}=10^{-3} \text{ m}^3$	
ravninski kot	(kotna) stopinja	°	1 °= $(\pi/180)$ rad	
	(kotna) minuta	'	1 '= $(\pi/10.800)$ rad	
	(kotna) sekunda	"	1 ''= $(\pi/648.000)$ rad	
	gon	g	1 g= $(\pi/200)$ rad	
masa	tona	t	1 t= $1000 \text{ kg}$	
	atomska enota mase	u *	1 u= $1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	v fiziki in kemiji
dolžinska masa	teks, tex	tex	1 tex= $10^{-6} \text{ kg/m}$	za izražanje dolžinske mase tekstilnega vlakna
čas	minuta	min	1 min= $60 \text{ s}$	
	ura	h	1 h= $3600 \text{ s}$	
	dan	d	1 d= $86.400 \text{ s}$	
hitrost	vozel		1 vozel= $1852/3600 \text{ (m/s)}$	v pomorskem, zračnem in rečnem prometu
tlak	bar	bar	1 bar= $10^5 \text{ Pa}$	
energija	elektronvolt	eV *	1 eV= $1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ J}$	na specializiranih področjih
moč	volt-amper	VA	1 VA= $1 \text{ W}$	za določanje navidezne moči izmeničnega toka
	var	var	1 var= $1 \text{ W}$	za določanje električne jalove moči

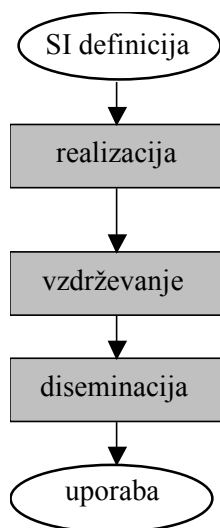
## Uvod v definicijo, realizacijo, vzdrževanje in diseminacijo enot SI sistema

Leta 1960 je bil na 11. konferenci Meterske konvencije predlagan Mednarodni sistem enot (SI), ki je medtem sprejet že skoraj po vsem svetu. Osnovan je na sedmih osnovnih enotah, ki so bile izbrane iz različnih zgodovinskih in praktičnih razlogov. Vse izpeljane enote SI sistema lahko izrazimo s kombinacijo osnovnih sedmih brez uporabe faktorjev, drugačnih od 1. Skupina sedmih osnovnih enot je imenovana tudi koherenten sistem enot in je osnova za številne algebrajske enačbe, na katerih so osnovane današnja fizika, kemija in tehnologija.

Sodobni sistem enot mora zgrajen tako, da zadovolji vedno širše potrebe industrije in ustreza novim spoznanjem, ki se pojavijo z razvojem znanosti. Mora biti definiran tako, da z uporabo njegovih enot z definirano negotovostjo lahko enolično izmerimo vse znane fizikalne veličine. Pri tem je seveda jasno, da tako definiran sistem enot ne more biti veljaven večno, ampak se vzporedno z razvojem znanosti in tehnologije ves čas razvija in dopolnjuje.

SI sistem enot se je skozi leta dokazal za zelo uspešnega, predvsem zaradi velike sposobnosti prilagodljivosti. Z novimi znanstvenimi spoznanji so osnovne enote SI namreč dobivale vedno nove, primernejše definicije. Pri spreminjanju obstoječih definicij je bil poseben poudarek na tem, da najprimernejša definicija osnovne enote temelji na naravnih fizikalnih konstantah ali stabilnih lastnostih procesov v atomih. Enota mase, kilogram, je edina osnovna enota SI sistema, ki je še vedno definirana s fizičnim telesom kot materializiranim artefaktom.

»Meriti« pomeni s poskusom primerjati neznano veličino s primerno enoto, ki je definirana z dogovorom. Naloga nacionalnih metroloških institucij (NMI) je, da preskrbijo etalone, s katerimi je enota uvedena v meritev. Danes etalone, za katere je dogovorjena mednarodno sprejeta definicija, pridobimo s serijo treh operacij – realizacijo, vzdrževanjem in diseminacijo etalona.



- **definicija** – običajno abstrakten opis fizikalne veličine z navedbo vseh njenih bistvenih lastnosti.
- **realizacija** – izvedba mednarodno dogovorjene abstraktne definicije enote.
- **vzdrževanje** – proces vzdrževanja rezultatov realizacije enote s primarnimi etaloni.
- **diseminacija** – postopek podajanja enote s sledljivostno verigo od primarne realizacije do uporabnika. V odvisnosti od narave veličine je lahko izvedena na številne načine, od transporta etalona ali etalonskih instrumentov do prenosa signalov na daljavo.

Slika 5.2: Osnovne operacije metrologije.

**Osnovne fizikalne konstante kot osnova prihodnjega sistema\* enot SI**

Z razvojem novih tehnologij, napredkom znanosti in vedno točnejših merjenj se spreminjajo tudi definicije osnovnih enot SI sistema.

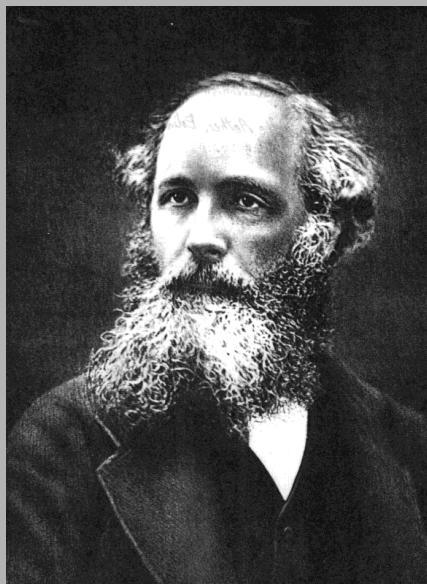
Definicije osnovnih enot SI sistema postajajo vedno bolj osnovane na osnovnih fizikalnih konstantah. Hkrati je vedno manj osnovnih enot definirano s fizičnim telesom - artefaktom. Trenutno je le še kilogram definiran z artefaktom. Nova znanstvena spoznanja in nove tehnološke zmogljivost ga skušata na novo definirati preko dveh osnovnih fizikalnih konstant - Planckove konstante  $h$  (poskusi z vatnimi tehtnicami) in Avogadrovega števila  $N_A$  (Avogadrov projekt).

*"Navsezadnje, čeprav dimenzija in čas rotacije naše Zemlje v povezavi z našo trenutno zmožnostjo merjenj in primerjav izgledata konstantni, nista fizikalno dejstvo. Zemlja se lahko skrči zaradi ohlajevanja, lahko se poveča zaradi plasti meteoritov, ki padejo nanjo, in trajanje njene revolucije se lahko sčasoma skrajša, pa bo še vedno prav tako planet kot pred tem.*

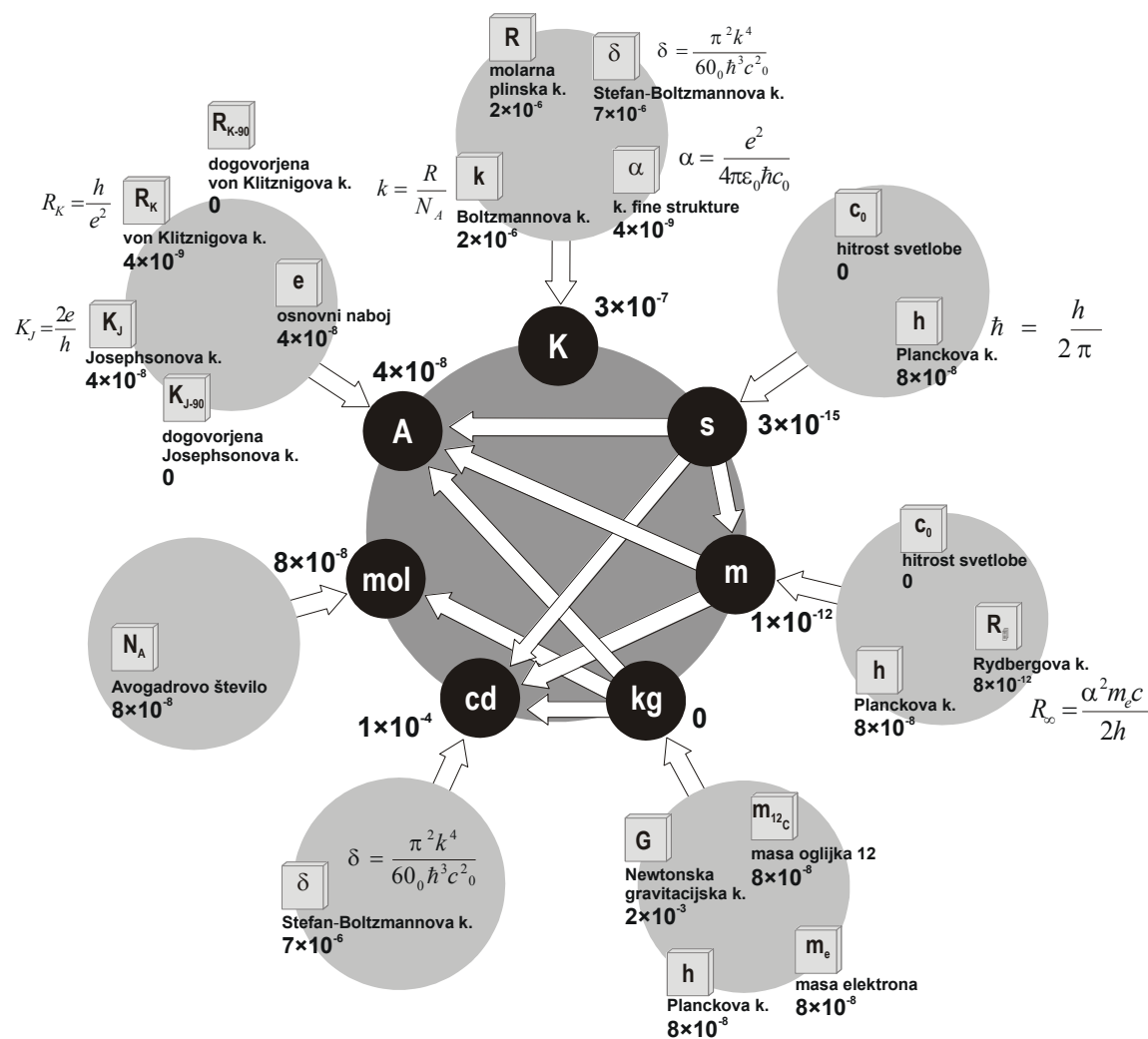
*Toda če pogledamo molekulo, recimo vodik, lahko ugotovimo, da če bi le za odtenek spremenili njeno maso in frekvenco oscilacije, to ne bi bila več molekula vodika.*

*Če torej želimo dobiti etalone za dolžino, čas in maso, ki bodo stalni, jih moramo namesto v dimenziji, masi in gibanju našega planeta iskati v dimenzijah, absolutni masi in frekvenci oscilacij večnih in nespremenljivih in vedno popolnoma enakih molekulah."*

*James Clerk Maxwell, 1870*



\* - v letu ali dveh pričakujemo nov sistem SI.



Slika 5.3: Osnovne enote SI sistema z negotovstmi trenutne realizacije in povezavami na osnovne atomske in fizikalne konstante s trenutnimi negotovostmi. Časovna nestabilnost kilograma se izraža v treh ostalih fizikalnih veličinah, katerih definicije so navezane na kilogram.

Definicije nekaterih ostalih osnovnih enot še vedno temeljijo na delnih artefaktih. Eden od primerov je tudi osnovna enota za čas – sekunda. Definicija sekunde, ki temelji na fizikalnih lastnostih cezijevega izotopa, je bila osnovana na najboljši eksperimentalni realizaciji leta 1966, ko so jo sprejemali. Vendar prehod med dvema stanjema atoma cezija ne more biti enako osnoven, kot sta na primer fizikalni konstanti hitrost svetlobe ali Planckova konstanta. Cezij je relativno kompleksna kovina. Bolj osnovni atom je zagotovo najenostavnejši atom – vodik. Zato potekajo nove raziskave v smeri spoznavanja in zagotavljanja stabilnih fizikalnih pojavov v prehodih vodikovega atoma.

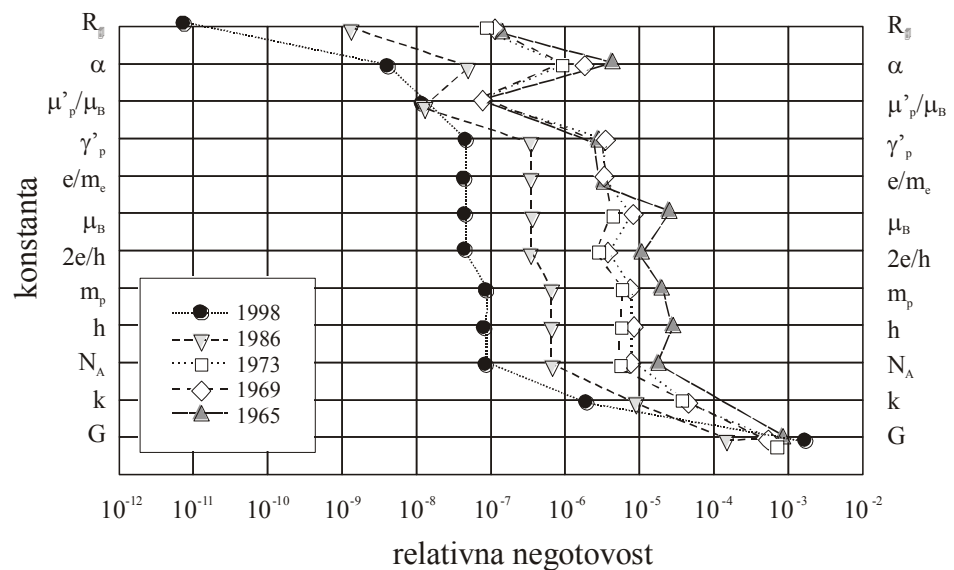
Podoben primer je kelvin, osnovna enota za temperaturo, ki je definirana s trojno točko vode. Čeprav je voda široko dostopna po Zemlji, v lastnostih vodnih molekul ni ničesar osnovnega. Z razvojem merilne tehnike bodo tudi negotovosti določevanja

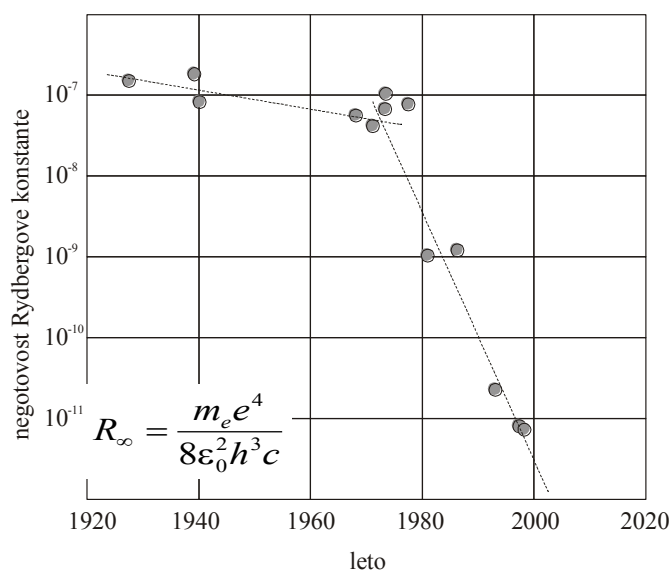
razmerij izotopov postavila mejo pri uporabnosti fiksne točke vode. V smislu naslanjanja na osnovne fizikalne konstante bi bilo bolj primerno nadomestiti obstoječo definicijo kelvina z novo, ki bi temeljila na osnovni termodinamični konstanti – Boltzmannovi konstanti  $k$ . Obstoječo definicijo kelvina lahko torej opišemo kot definicijo z delnim artefaktom, ker je osnovana na vodi in njenem edinstvenem faznem diagramu in v bližnji prihodnosti ni preračunljiva glede na osnovne fizikalne konstante.

Osnovne fizikalne konstante lahko razdelimo v tri velike skupine:

- konstante, ki izhajajo neposredno iz teorije (hitrost svetlobe iz Einsteinove specialne relativnostne teorije, Planckova konstanta v kvantni teoriji in konstanta fine strukture v kvantni elektrodinamiki)
- konstante, ki predstavljajo lastnosti osnovnih delcev (masa in naboj elektrona, masa in magnetni moment protona)
- konstante, ki povezujejo različne tipe fizikalnih veličin (Boltzmannova konstanta, ki povezuje toplotno in mehansko energijo, Avogadrovo število, ki povezuje mikroskopske in makroskopske delce snovi)

Slika 5.4: Spreminjanje relativne negotovosti posameznih osnovnih fizikalnih konstant v odvisnosti od časa [4].





Slika 5.5: Relativna negotovost določevanja vrednosti Rydbergove konstante  $R_{\infty}$  v odvisnosti od časa. Rydbergova konstanta je ena izmed fizikalnih konstant, ki je bila določena z visoko negotovostjo  $8 \times 10^{-12}$  [5]. Predstavlja osnovo optične frekvenčne metrologije, ki temelji na opazovanju vodikovega spektra. Ozki prehodi v vodikovih atomskih sistemih bi bili lahko neposredno oprti na osnovne fizikalne konstante. Tako bi bili morda v prihodnosti primerni za etalone frekvence, časa in dolžine.

Tabela 5.9: Primerjava relativnih negotovosti, s katerimi so bile določene nekatere fizikalne konstante v letu 1965 in leta 1998. Prikazan je tudi faktor izboljšanja relativne negotovosti [6].

konstanta	ime konstante	vrednost (1998)	negotovost $w(1998)$	negotovost $w(1965)$	$\frac{w(1965)}{w(1998)}$
$R_{\infty}$	Rydbergova	10973731,568549 /m	$7,6 \times 10^{-12}$	$9,1 \times 10^{-8}$	12000
$\alpha$	fine strukture	$7,297352533 \times 10^{-3}$	$3,7 \times 10^{-9}$	$4,4 \times 10^{-6}$	1200
$h$	Planckova	$6,62606876 \times 10^{-34}$ Js	$7,8 \times 10^{-8}$	$2,4 \times 10^{-5}$	310
$e$	osnovni naboj	$1,602176462 \times 10^{-19}$ As	$3,9 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-5}$	320
$m_e$	masa elektrona	$9,10938188 \times 10^{-31}$ kg	$7,9 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-5}$	180
$N_A$	Avogadrovo število	$6,02214199 \times 10^{23}$ /mol	$7,9 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-5}$	190
$R$	molarna plinska	8,314472 J/mol/K	$1,7 \times 10^{-6}$	$4,2 \times 10^{-5}$	25
$k$	Boltzmannova	$1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K	$1,7 \times 10^{-6}$	$4,3 \times 10^{-5}$	26
$G$	Newtonska gravitacijska	$6,673 \times 10^{-11}$ m <sup>3</sup> /kg/s	$1,5 \times 10^{-3}$	$7,5 \times 10^{-4}$	0,5

### Ohm kot primer moderne oblike SI enote

Najbolj so se modernemu konceptu definicije SI enot približale električne veličine.

Po odkritjih makroskopskih kvantnih pojavov B. D. Josephsona (1963) in K. von Klitzinga (1980) je prišlo do stanja, ko je postala obnovljivost (ujemanje merilnih rezultatov iste merjene veličine, opravljenih pri spremenjenih pogojih merjenja) električnih enot daleč boljša od najboljših dotedanjih realizacij teh enot. Uporaba Josephsonovega spoja in kvantnega Hallovega pojava za realizacijo volta in ohma je pomenila nove temelje v metrologiji.

Kvantni Hallov pojav je bil opažen v mikroelektronskih vzorcih pri

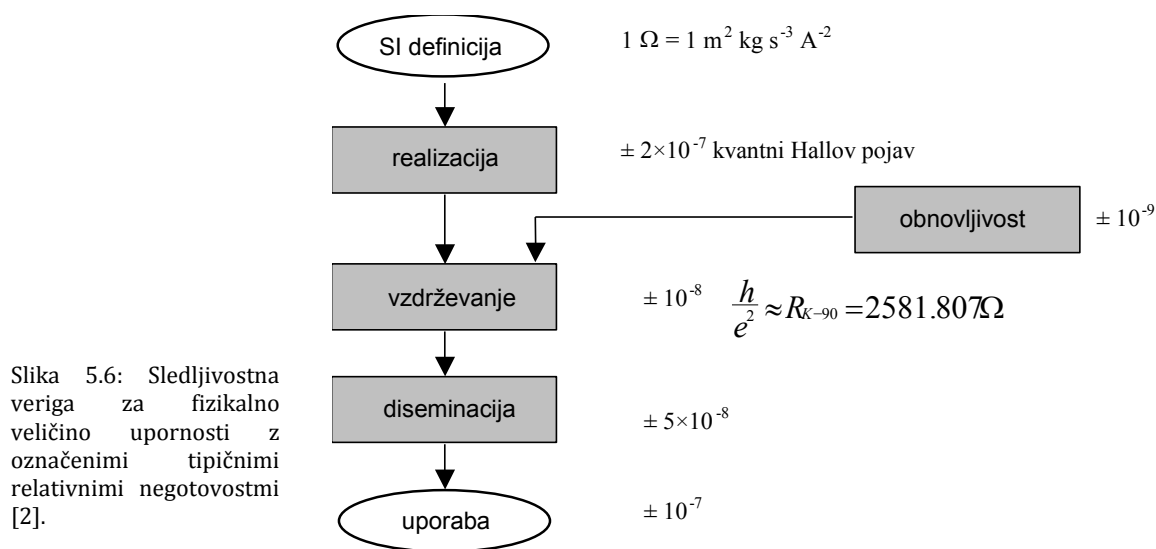
nizkih temperaturah. V dvodimenzionalnem prostoru močno magnetno polje sili elektrone v kroženje. Dokazano je bilo, da je Hallova upornost  $R_H$  neodvisna od katerega koli drugega parametra poskusa. Velja, da je  $R_H$  odvisna le od celoštevilске vrednosti  $i$ , ki predstavlja nivo kvantnega pojava in od osnovne fizikalne konstante - von Klitzingove konstante  $R_K$ .

$$R_K = \frac{h}{e^2} \quad (5.8)$$

$h/e^2$  je konstanta, ki je v SI enotah glede na najboljše poskuse realizacije ohma (preko definicije  $1 \Omega = 1 \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-3} \text{ A}^{-2}$ ) trenutno znana z relativno negotovostjo  $3,9 \times 10^{-8}$  [1].

Po drugi strani je relativna negotovost realizacije na principu kvantnega Hallovega pojava okoli  $10^{-9}$  [2]. Še več, leta 1990 je bil sprejet mednarodni dogovor, ki je namesto vrednosti  $h/e^2$  za vrednost von Klitzingove konstante določil dogovorjeno  $R_{K-90} = 25812,807 \Omega$ .

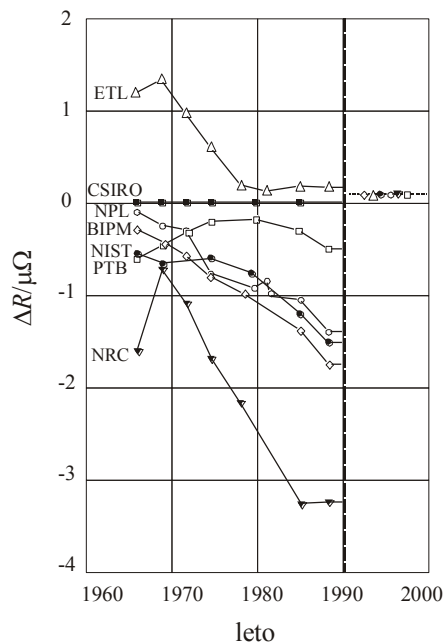
Velja, da lahko vsi laboratoriji, ki uporabljajo kvantni Hallov pojav za realizacijo ohma, med seboj pričakujejo odstopanja, ki so manjša od  $10^{-9}$ . Vzdrževanje ohma s skupino etalonskih uporov, kalibriranih v smislu  $R_{K-90}$  in diseminacija proti uporabnikom je torej na podlagi kvantnega pojava danes obremenjena z veliko manjšo negotovostjo, ko dosedanje najboljše realizacije ohma po SI definiciji.



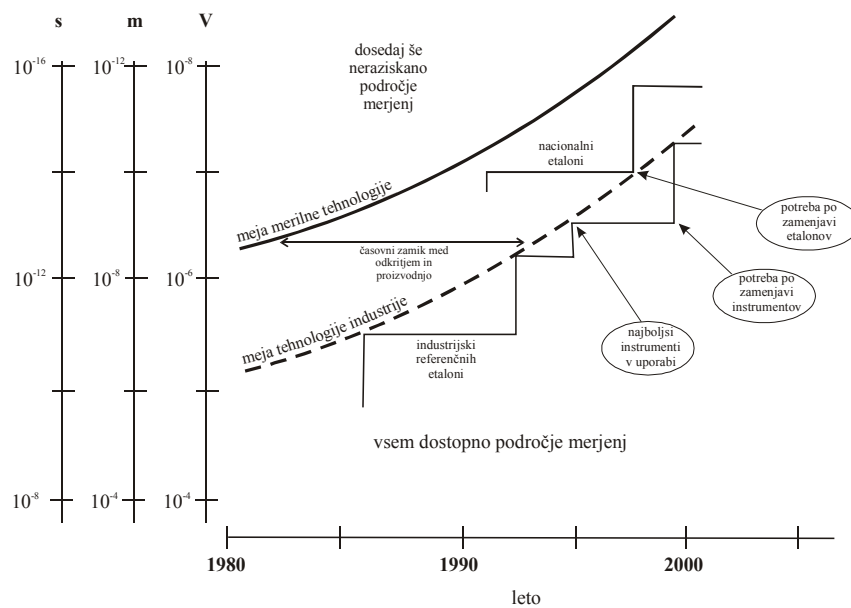
Pred odkritjem kvantnega Hallovega pojava in njegove uporabe v metrologiji so vsi etalonski upori, ki so predstavljali realizacijo ohma, imeli eno skupno značilnost. Vsi so bili v določeni meri časovno nestabilni. Vzdrževana enota za upornost se je tako spreminjala s časom. Z uporabo  $R_{K-90}$  so od leta 1990 vzdrževane enote upornosti precej bolj stabilne (slika 5.7).



Slika 5.7: Vrednosti vzdrževane električne upornosti v različnih metroloških institucijah v odvisnosti od časa. Leta 1990 (črtkana črta) je bila dogovorjena vrednost von Klitznigove konstante  $R_{K-90}$ , ki je bistveno zmanjšala negotovosti, s katerimi je definirana. Pri prikazu vrednosti so kot referenca vzete vrednosti avstralskega nacionalnega laboratorija (CSIRO) [2].

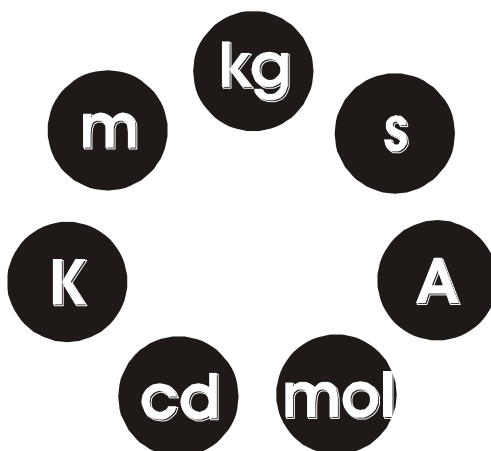


Slika 5.8: Izboljševanje merilne negotovosti etalonov s časom in prenos v industrijo [4].



**SI sistem danes**

SI sistem vključuje sedem osnovnih enot. Dodatni pomožni enoti sta enoti za ploskovni in prostorski kot (radian in steradian).



Slika 5.9: Sedem osnovnih enot SI sistema.

Tabela 5.10: Definicije sedmih osnovnih enot SI sistema.

<b>dolžina</b> (meter)	<i>Meter (m) je dolžina poti, ki jo prepotuje svetloba v vakuumu v času 1/299 792 458 sekunde.</i>
<b>masa</b> (kilogram)	<i>Kilogram (kg) je enota za maso in ustreza masi mednarodnega prototipa kilograma.</i>
<b>čas</b> (sekunda)	<i>Sekunda (s) je trajanje 9 192 631 770 period sevanja, ki ustreza prehodu med dvema hiperfinima nivojema cezijevega atoma 133 v osnovnem stanju pri temperaturi 0 K.</i>
<b>električni tok</b> (amper)	<i>Amper (A) je konstantni enosmerni električni tok, ki v vakuumu pri prehodu skozi dva ravna, en meter oddaljena, neskončno dolga, vzporedna vodnika z zanemarljivo majhnim krožnim prerezom, povzroča silo <math>2 \times 10^{-7}</math> N/m.</i>
<b>termodinamična temperatura</b> (kelvin)	<i>Kelvin (K) je enota termodinamične temperature, ki je enaka 1/273,16 delu termodinamične temperature trojne točke vode.</i>
<b>množina snovi</b> (mol)	<i>Mol (mol) je množina snovi sistema, ki vsebuje toliko elementarnih enot, kolikor je atomov v 0,012 kg ogljika <sup>12</sup>C. Ogljik mora biti v nevezanem stanju, v mirovanju in v osnovnem stanju. Kadar uporabljamo enoto mol morajo biti elementarne enote točno označene ter so lahko atomi, molekule, ioni, elektroni ali drugi delci ali skupine delcev.</i>
<b>svetilnost</b> (kandela)	<i>Kandela (cd) je svetilnost vira sevanja, ki v določeno smer oddaja monokromatsko sevanje s frekvenco 540 THz in ima v tej smeri energijsko jakost sevanja 1/683 vatov na stera ian.</i>

**SI sistem v prihodnosti**

SI sistem se z razvojem tehnologije in novimi spoznanji znanost razvija in spreminja. Pričakovano je, da bodo v prihodnosti definicije osnovnih enot še bolj osnovne in enostavne in da ne bodo več temeljile na artefaktih ali delnih artefaktih, kot danes. Primer novega SI sistema bi bil sistem sedmih osnovnih enot, ki bi skoraj v celoti temeljil na fizikalnih konstantah in atomskih lastnostih najenostavnejšega atoma – atoma vodika.

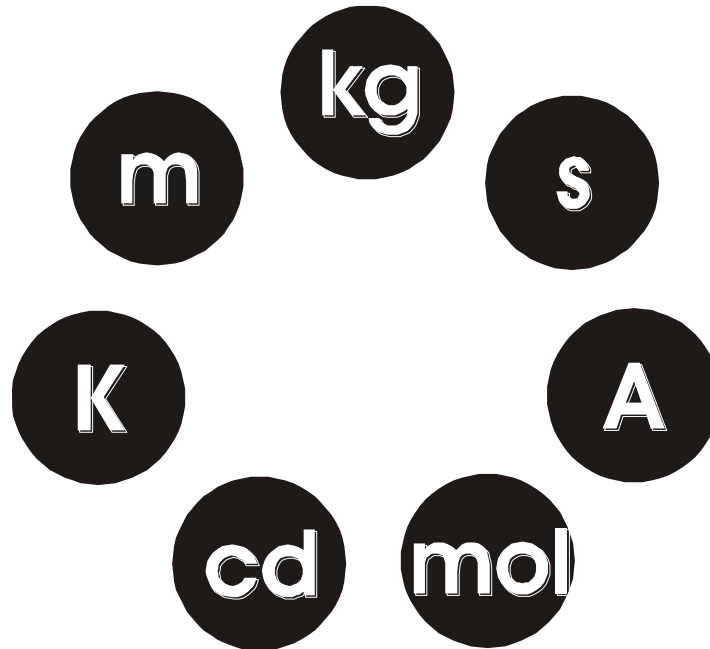
Tabela 5.11: Teoretični predlog definicije sistema enot, ki bi bil osnovan na vodikovem atomu [3].

<b>dolžina</b> (meter)	<i>Meter (m) je dolžina poti, ki jo prepotuje svetloba v vakuumu v času <math>1/299\,792\,458</math> sekunde.</i>
<b>masa</b> (kilogram)	<i>Kilogram (kg) je enota mase in predstavlja <math>5,973386XXX \times 10^{26}</math> kratnik mase prostega vodikovega atoma v osnovnem stanju.</i>
<b>čas</b> (sekunda)	<i>Sekunda (s) je trajanje <math>466\,8XX\,XXX\,XXX\,XXX</math> period sevanja, ki ustreza prehodu med <math>2S_{1/2}</math> in <math>3P_{1/2}</math> nivojem vodikovega atoma na povprečni višini morske gladine.</i>
<b>električni tok</b> (amper)	<i>Amper (A) je električni tok, ki ustreza <math>6,241\,509\,XXX \times 10^{18}</math> kratniku osnovnega naboja na sekundo.</i>
<b>termodinamična temperatura</b> (kelvin)	<i>Kelvin (K) je <math>1/13,80X\,X</math> del termodinamične temperature trojne točke vodika.</i>
<b>množina snovi</b> (mol)	<i>Mol je množina snovi, ki vsebuje <math>6,022\,141\,XXX \times 10^{23}</math> osnovnih delcev. Ko uporabljamo enoto mol, je treba podati osnovni delec, ki je lahko atom, molekula, ion, elektron, drugi delec ali skupina takih delcev.</i>
<b>svetilnost</b> (kandela)	<i>Kandela (cd) je svetilnost vira sevanja, ki v določeno smer oddaja monokromatsko sevanje s frekvenco <math>540\,THz</math> in ima v tej smeri energijsko jakost sevanja <math>1/683</math> vatov na steradian.</i>

## Literatura poglavja

- [1] P. J. Mohr, B. N. Taylor, CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 1998, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 72, No. 2, pp. 351-495, 2000.
- [2] D. Kind, T. Quinn, Metrology: Quo Vadis?, *IEEE Trans. Inst. Meas.*, vol. 44, no. 2, 1995
- [3] V. Kose, B. R. L. Siebert, W. Wöger, General principles for the definition of the base units in the SI, *Metrologia*, vol. 40, 2003
- [4] National Measurement System Foundation Programme 1998-2001, NPL
- [5] [http://www.bipm.fr/enus/3\\_SI/si\\_fig.html](http://www.bipm.fr/enus/3_SI/si_fig.html), T.J Quinn, Base units of the Système international d'unités, their accuracy, dissemination and international traceability, *Metrologia*, 1995, 31, 515-527
- [6] Barry Taylor, Fundamental constants, BIPM Metrology Summer School 2003
- [7] International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms, VIM, 3rd edition, JCGM 200:2008

## 6. Osnovne SI fizikalne veličine



Mednarodni sistem enot SI sistem vključuje sedem osnovnih enot. Sekunda je enota za čas, meter za dolžino, kilogram za maso, kelvin za temperaturo, amper za električni tok, mol za množino snovi in kandela za svetilnost.

# Čas

## Definicija enote za čas

*Sekunda (s) je trajanje 9 192 631 770 period sevanja, ki ustreza prehodu med dvema hiperfinima nivojema cezijevega atoma 133 v osnovnem stanju pri temperaturi 0 K.*

SI enota za čas, sekunda (s), je bila definirana leta 1967 na 13. zasedanju CPIM.

Čas  $T$  in frekvenca  $f$  sta tesno povezani veličini, saj je čas v splošnem izpeljan iz periodičnega pojava. Tako vsaka točna ura preko enačbe  $f = 1/T$  predstavlja tudi etalon frekvence. SI enota za izpeljano fizikalno veličino frekvenco je hertz (Hz).

## Zgodovina enote

Rimljani so sprva uporabljali leto z desetimi meseci po 30 dni, okoli leta 700 pr.n.š. pa so med december in marec dodali še meseca februar in za njim januar in dobili leto z 12 meseci. V letu 450 pr.n.š. so zamenjali še vrstni red prvih dveh mesecev, tako da se je leto začelo z januarjem, ki mu je sledil februar: In imena mesecev so se ohranila do danes. V letu 46 pr.n.š. je Julij Cezar vzpostavil koledar, ki je bil osnovan na 365 dnevih v letu in 366 dnevih vsake štiri leta (povprečna dolžina leta 365,25 dni). Ta, danes imenovani julijanski koledar, se je ohranil skozi celotni srednji vek do renesanse.

V človeški zgodovini je bila delitev časa vedno vezana na astronomske pojave, ki so jih ljudje lahko opazovali. Vrtenje Zemlje okoli svoje osi in njeno vrtenje okoli sonca je bilo osnova prvih definicij časovnih intervalov (dan, leto). Nastajale so priprave za merjenje časa (sončne, peščene ure).

Na življenje ljudi so vplivali koledarji, ki so sistematično razdelili leto. Na Zemeljski obli se je v zgodovini izoblikovalo več različic koledarjev, od koledarjev starih Babiloncev (3000 pr.n.š.), Majev, do koledarja prebivalcev starega Egipta (1300 pr.n.š.), ki se je preko vpliva antične Grčije in Rima ohranil do srednjega veka.

Julijanski koledar je bil delno spremenjen leta 1582 na podlagi odloka papeža Gregorja VIII. Novi koledar danes imenujemo gregorijanski koledar. Pravoslavna cerkev danes še vedno uporablja Julijanski koledar.

Gregorijanski koledar se je ohranil do danes, čeprav so predlagali tudi druge oblike koledarja, kot na primer julijanski datumski koledar (1582). Ta je bil zasnovan na enostavnem štetju dni in je kot začetek uporabljal datum 1. januar 4713 pr.n.š.. Tako datumu 1. januar 2000 ustreza datum 2 451 545.

Za deljenje časa na manjše enote se uporabljajo časovne skale. Danes je v uporabi nekaj časovnih skal. UT (Universal Time) je časovna skala, katere osnova je dolžina srednjega sončnega leta zemeljskega poldnevnikarja, ki gre skozi Greenwich (imenovana tudi GMT - Greenwich Mean Time). Temelji na astronomskem opazovanju gibanja Zemlje okoli Sonca.

Nasprotno sta bili na osnovi atomskega časa leta 1972 definirani dve skali Mednarodna atomska skala TAI (International Atomic Time) in UTC (Coordinated Universal Time). Manj uporabljan je TAI, ki je določen na osnovi podatkov okoli 230 atomskih etalonov različnih meroslovnih institucij, in ga vzdržuje BIPM. V vsakdanjem življenju najbolj uporabljan je UTC, ki se nekoliko razlikuje od TAI. UTC temelji na tradicionalni astronomski delitvi leta, ki je popravljena z uporabo atomskega časa TAI. Korekcije UTC so vedno po korakih v velikosti ene sekunde – prestopne sekunde (1. julija

1997 je razlika znašala –31 sekund).

Vzrok vsake spremembe koledarja lahko najdemo v novih fizikalnih in astronomskih spoznanjih. In ob vsaki spremembi koledarja je bilo nekaj dni izpuščenih ali dodanih.

Enota časa, sekunda, je bila prvič definirana v 17. stoletju kot  $1/86400$  dneva. S pomočjo ure na nihalo je bila tudi realizirana z največjo relativno negotovostjo  $10^{-8}$ . Definicija se je obdržala do 20. stoletja, ko so na podlagi zapisov o Sončevih mrkih astronomi ugotovili, da se vrtenje Zemlje okoli svoje osi zaradi vpliva Lunine težnosti na njeno tekočo notranjost upočasnjuje. Vsako stoletje se dan podaljša za 1,4 milisekunde.

Leta 1956 so definicijo enote časa popravili, tako da je bila sekunda  $1/31556925,9747$  časa, ki ga je Zemlja potrebovala za potovanje okoli Sonca v letu 1900. Negotovost tako definirane sekunde je bila okoli  $10^{-9}$ , pri čemer je bilo za določitev negotovosti potrebno nekaj let opazovanja.

Časovno spremenljivo in geometrijsko nagnjeno eliptično pot Zemlje okoli Sonca je izredno težko popolnoma opisati z matematičnimi sredstvi. Posledica je bila, da so znanstveniki poskušali najti nov princip definiranja časa. Z razvojem znanosti in novimi dosežki tehnike je bilo ugotovljeno, da astronomska definicija časa enostavno ni zadosti konstantna za dandanašnje potrebne točnosti.

Danes je enota časa definirana s pomočjo lastnosti atomov.

Eksperimentalno je bilo namreč ugotovljeno, da se atomski etaloni, ki temeljijo na prehodu med dvema energijskima nivojema atoma ali molekule, omogočajo zelo točno realizacijo in reprodukcijo sekunde.

Leta 1967 je bila na 13. konferenci CPIM določena zadnja definicija enota časa. Ta definicija je bila potrjena s strani CPIM leta 1997, kjer so kot atom določili cezij 133 v osnovnem stanju pri temperaturi nič stopinj Kelvina.

### Zakaj potrebujemo točno merjenje časa?

Vsakdo v svojem vsakdanu vsaj nekajkrat potrebuje podatek o točnem času. Točni čas je pomemben, da ujamemo avtobus, da vemo, kdaj nastopi pravi trenutek za praznovanje novega leta in kdaj se začne priljubljena televizijska oddaja. Za tako vsakdanjo obliko merjenja časa so običajne ročne ure zadosti točne. Tipična točnost kvarčne ure je okoli ene sekunde na deset dni. Tolikšna točnost pa ne zadošča, ko želimo poslati faks preko telefonskih linij, pobrsati po internetu ali s satelitskim navigacijskim sistemom ugotoviti, kje smo.

Telekomunikacije so osnovane na točnem merjenju časa, ki zagotovi, da so digitalni signali v mrežah sinhronizirani. Če sinhronizacije ne bi bilo, bi se delčki informacije izgubljali. Tako bi slišali prasketanje v telefonu, vrstice v prispelih faksih bi bile zabrisane, povezava z internetom bi se lahko celo prekinila. Podobno je pri navigaciji ladij, letal in osebnih vozil s sistemom GPS (Global Positioning System), ki deluje s pomočjo 24 satelitov v Zemljini orbiti. Sateliti pošiljajo časovne signale svojih atomskih ur in so razporejeni tako, da so vsaj po štirje s svojimi signali dosegljivi z vsake točke na Zemlji. Z uporabo štirih signalov lahko točno določimo svoj položaj na Zemlji. Točnost merjenja časa v določanju položaja je izredno pomembna, saj elektromagnetno valovanje naredi že v eni sami nanosekundi 30 centimetrov ali 300 metrov v eni mikrosekundi! Vsaka večja napaka v merjenju časa nas lahko odvede daleč stran od našega cilja.

**Realizacija sekunde** Danes najpomembnejše naprave za točen čas in frekvenčna merjenja so kvarčni etaloni in etaloni, ki temeljijo na atomskih hiperfinih prehodih (cezijeve, vodikove in rubidijeve ure). Kot etalon jih opisujemo, ker njihova izhodna frekvenca ali čas lahko služijo kot referenca. Sekunda je realizirana z najmanjšo negotovostjo neposredno iz definicije s pomočjo cezijevih atomskih ur. Danes so najboljše dosežene relativne negotovosti pri realizaciji sekunde med  $10^{-13}$  in  $10^{-15}$ , kar pomeni odstopanja okoli ene sekunde v tridesetih milijonih let.

Tabela 1. Prikaz stabilnosti frekvenčnih etalonov [1].

Etalon frekvence in časa	stabilnost
Kvarčni kristal	$10^{-10}$
Vodikova atomska ura	$2 \times 10^{-15}$
Rubidijeva atomska ura	$7 \times 10^{-13}$
Cezijeva atomska ura	$10^{-13}$
Amonijev stabiliziran laser	$5 \times 10^{-15}$
Jodov stabiliziran laser	$10^{-12}$



### Realizacija sekunde s kvarčnim kristalom

Etalon časa in frekvence s kvarčnim kristalom temelji na kristalu kvarca (kremen). Kvarc pride v izmeničnem električnem polju v vzbujeno stanje. Zaradi piezoelektričnega efekta se pojavijo mehanske vibracije velike frekvenčne stabilnosti. Kristali kvarca so rezani iz simetrično gojenih kristalov v obliki palic, plošč, obročev ali vilic (v ročnih urah). Značilnost kvarčnega kristala je dolgoročno frekvenčno lezenje, ki ga povzročajo spremembe v kristalni strukturi kristala, električnih kontaktih in mehanskih delov ure. Frekvenca kvarčne ure je temperaturno odvisna. Odvisnost od temperature se lahko zmanjša s posebnim načinom rezanja kristala iz surove kristalne strukture. Temperaturna odvisnost se lahko omili tudi s pomočjo več temperaturno kompenziranih lupin. Ure, ki temeljijo na principu kvarčnega kristala, morajo biti zaradi svoje nestabilnosti vedno vezane na višje etalone frekvence.

Tabela 6.1: Realizacija sekunde skozi zgodovino.

leto	realizacija	ocenjena negotovost ure
3500 p.n.š.	sončna ura	10 minut
17	ura na nihalo	10 sekund na dan
1762	Harrisonov kronometer	1 sekunda na 3 dni
okoli 1930	vrtenje Zemlje	1 sekunda na 3 leta
okoli 1950	kvarčna zapestna ura	1 sekunda na 30 let
1955	Essnova cezijeva ura	1 sekunda na 300 let
1980	moderna cezijeva ura	1 sekunda na 300 000 let
1995	cezijeva fontana	1 sekunda na 15 000 000 let
21. stoletje	atomska ura z ionsko pastjo	1 sekunda na 15 000 000 000 let

### Realizacija sekunde z atomsko uro

Atomska ura je naprava, ki za svoje delovanje izrablja kvantni pojav v atomih, t.j. prehod med dvema osnovnima nivojema. Ta prehod je mogoč, če atomu dovedemo točno določeno količino energije (kvant energije), ki je neposredno določen s frekvenco elektromagnetnega valovanja, s katerim obsevamo atom. Delovanje atomske ure temelji na Planckovem zakonu

$$E = hf, \quad (6.1)$$

kjer je  $h$  Planckova konstanta,  $E$  pa razlika energijskih nivojev atoma, ki ustreza vzbujalnemu elektromagnetnemu valovanju s frekvenco  $f$ .

Delež atomov na višjem energijskem nivoju je odvisen od bližine frekvence vzbujalnega elektromagnetnega valovanja glede na optimalno, izračunano kot  $E/h$ . Ta odvisnost je še močnejše izražena pri hiperfinih stanjih atoma, pri čemer delež vzbujenih atomov močno naraste šele zelo blizu optimalne frekvence.

Pomembna lastnost atomov v sosednjih energijskih stanjih je tudi različen odziv, če so izpostavljeni nehomogenemu magnetnemu polju. Magnetno polje tako omogoča, da atome lahko ločimo med seboj in tako ugotavljamo deleže atomov na obeh energijskih

nivojih. Maksimalni delež atomov v vzbujenem stanju zagotavlja, da ima vpadno elektromagnetno valovanje optimalno frekvenco.

Glavni izvedbi atomske ure sta poleg cezijeve tudi vodikova in rubidijeva.

Cezijevo uro odlikuje najvišja točnost, saj je njeno delovanje osnovano neposredno na definiciji sekunde. Vodikova atomska ura ima najboljšo kratkotrajno stabilnost (100 sekund) izmed vseh atomskih ur. Rubidijeva ura je najbolj kompaktna, povprečne teže 15 kg in prostornine 25 dm<sup>3</sup> (cezijeva ura je lahko težka do 500 kg in ima 2000 dm<sup>3</sup> prostornine). Kompaktnost je poleg majhne kratkotrajne nestabilnosti frekvence glavni razlog za njeno široko uporabo. Je pogosto uporabljena v komunikacijski, vesoljski in navigacijski tehnologiji.

Določanje negotovosti obeh atomskih ur je zahtevno, saj sta v istem velikostnem razredu kot cezijeva atomska ura. Negotovost atomske ure je odvisna od temperature, pospeška, magnetnega polja, zračnega tlaka in staranja.

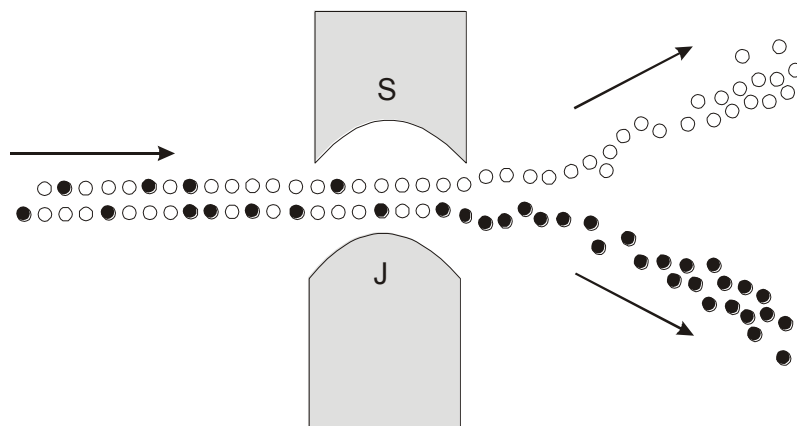
### **Cezijeva atomska ura**

Ugotovljeno je bilo, da sta nivoja  $F=3$  in  $F=4$  izotopa cezijevega atoma <sup>133</sup> še posebno primerna, ker je energijska razlika med njima zelo stabilna in ustreza frekvencam v mikrovalovnem območju. Frekvenca vzbujalnega elektromagnetnega valovanja je zadosti visoka za definicijo sekunde z veliko točnostjo in hkrati zadosti nizka, da jo lahko realiziramo s pomočjo običajnih mikrovalovnih tehnik. Izdelava in detekcija curka cezijevih atomov je relativno preprosta (temperatura izparevanja atomov iz kovine je le okoli 100 °C, kar pomeni, da so hitrosti atomov relativno majhne).

Prvo cezijevo uro sta leta 1955 dokončala Louis Essen in Jack V. L. Parry v britanskem NPL (National Physical Laboratory). Točnost ure je znašala  $10^{-10}$  ali eno sekundo v 300 letih [2].

Delovanje cezijeve atomske ure opisuje slika 6.1. Curek atomov izhaja iz cezijeve pečice, v kateri segrevamo cezij. Pri delovanju ure sodelujejo le atomi na nižjem energijskem nivoju ( $F=3$ ). Te ločimo iz curka atomov s pomočjo nehomogenega magnetnega polja selektivnega magneta A.

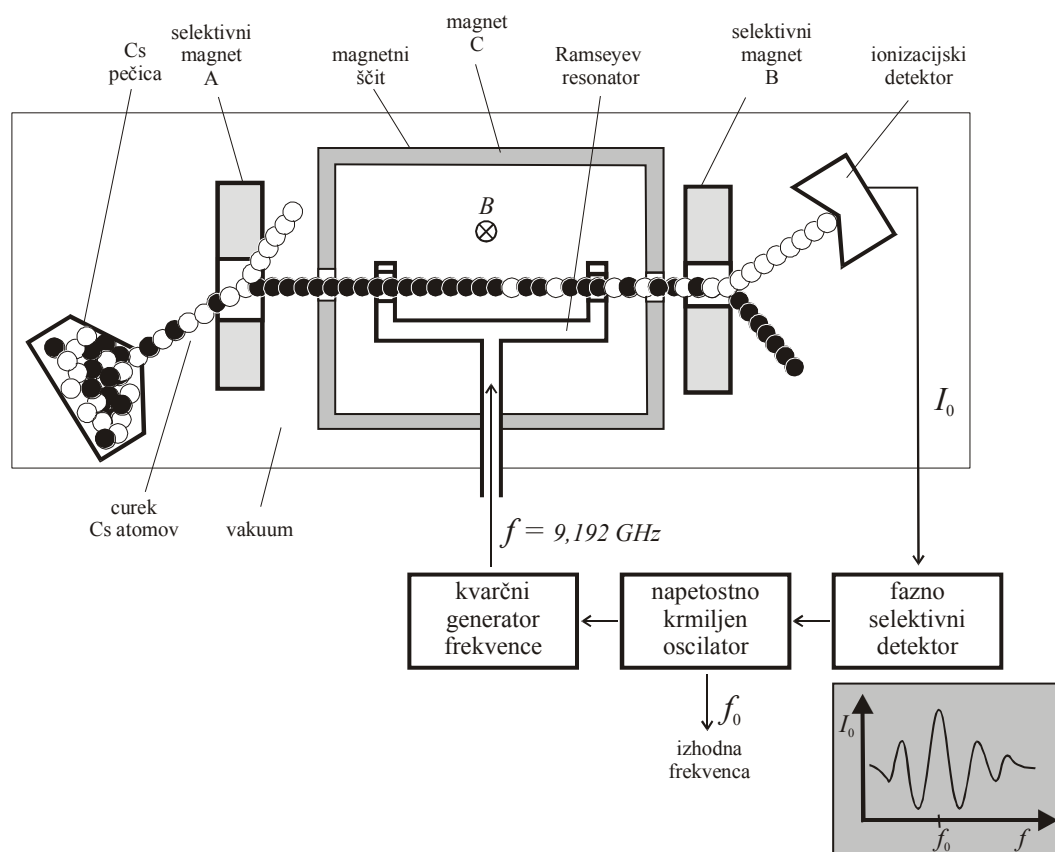
Slika 6.1: Z nehomogenim magnetnim poljem je možno razdeliti cezijeve atome glede na njihovo energijsko stanje. S temnimi krogi so prikazani cezijevi atomi na nižjem energijskem nivoju, ki se usmerijo v smeri proti južnem polu magneta.



Ostali atomi so blokirani z magnetnim ščitom. Izbrani atomi vstopijo v C območje, kjer so izpostavljeni vzbujalnemu elektromagnetnemu valovanju mikrovalovnih frekvenc in homogenemu magnetnemu polju. Magnetno polje razdeli atome glede na energijski nivo. Mikrovalovi frekvence  $9\,192\,631\,770\text{ Hz}$  povzročijo prehod atomov na višji energijski nivo ( $F=4$ ). Načinov prehoda je več. Standardne cezijeve ure uporabljajo Ramseyev prehod. Za ta princip je potreben Ramseyev mikrovalovni resonator, v katerem se atome dvakrat obseva z mikrovalovi. Bližje kot je frekvenca mikrovalov optimalni frekvenci, večje je število prehodov atomov. Velik delež atomov pri izstopu iz C območja je tako na višjem energijskem nivoju. Atomi so na koncu ponovno ločeni s pomočjo nehomogenega magnetnega polja B. Tokrat so tisti na višjem energijskem nivoju usmerjeni v ionizacijski detektor. Izhodni signal detektorja je sorazmeren toku atomov na višjem energijskem nivoju. Odvisnost amplitude signala ionizacijskega detektorja od frekvence mikrovalov je prikazana na sliki 1. V optimalni, resonančni frekvenci je amplituda detektorskega signala maksimalna. Signal ionizacijskega detektorja se uporabi v zaključeni povratni zanki za regulacijo frekvence mikrovalov v C območju.

#### Hipefni prehod

Ko je atom na nižjem energijskem nivoju, se njegovi zunanji elektroni vrtijo v nasprotni smeri kot njegovo jedro. Ko absorbira energijo okoliškega elektromagnetnega valovanja optimalne frekvence, se elektroni začnejo vrteti v isto smer kot jedro. Pravimo, da je atom opravil hipefni prehod na višji energijski nivo. Energija za ta prehod je točno določena in je odvisna od strukture atoma. Za cezijev izotop  $^{133}\text{Cs}$  je značilno, da imajo vsi atomi vedno 54 protonov, 79 nevtronov in 54 elektronov. Izotop  $^{133}\text{Cs}$  je 133 krat težji od  $1/12$  atomske mase izotopa ogljika 12. Če bi bilo sestavnih delcev manj, ne bi šlo več za atom cezijevega izotopa 133. Ravno ta enoličnost atoma je osnova vseh atomskih ur in njenih vrhunskih meroslovnih značilnostih.



Slika 6.2: Shematski prikaz delovanja cezijeve atomske ure z izhodno frekvenco  $f_0$  (črni krogi predstavljajo cezijeve atome na nizkem energijskem nivoju, beli pa na visokem).

Delovna temperatura cezijeve pečice običajno ne preseže  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , zato je hitrost atomov nizka (okoli  $100\text{ m/s}$ ). Majhna hitrost atomov pomeni dolg čas potovanja delcev skozi mikrovalovno območje. Daljši čas potovanja pomeni manjšo napako, s katero določimo optimalno frekvenco vzbujalnih mikrovalov.

Osnovna zahteva dobre cezijeve ure je, da v C območje usmerimo čim več atomov v pravem energijskem stanju, saj na ta način povečamo uporabni signal.

Število atomov lahko povečamo z višjo temperaturo izparevanja atomov iz cezijeve pečice. Višja temperatura pomeni višje hitrosti cezijevih atomov in s tem manjši interakcijski čas med atomi in mikrovalovi. Posledično bi po prehodu C območja padlo število atomov v pravem energijskem stanju.

Bolj učinkovita je metoda laserskega optičnega črpanja atomov. Pri tej metodi se curek cezijevih atomov pred mikrovalovnim resonatorjem optično obdela z laserskimi diodami, ki oddajajo laser valovne dolžine  $852,1\text{ nm}$  (slika 6.3). Frekvenca laserskega žarka je ravno taka, da povzroči prehod atomov iz nižjega na višji energijski nivo. Tako umetno povečamo tok atomov v ionizacijski detektor.

Zaradi neposredne navezave na SI definicijo sekunde je negotovost dobrih komercialnih cezijevih ur zelo visoka ( $2 \times 10^{-14}$ ). Za najbolj točna merjenja se uporabljajo laboratorijske izvedbe cezijevih ur, ki

niso komercialno dobavljive in imajo negotovost okoli  $1 \times 10^{-15}$  ter kratkotrajno stabilnost okoli  $10^{-14}$ .

Z atomskimi cezijevimi urami lahko časovni interval ene sekunde tako določimo na nekaj milijonink nanosekunde natančno.

Leta 1971 sta dva znanstvenika preverjala Einsteinovo relativnostno teorijo.

Na potniško letalo sta vzela vsak svojo prenosno atomsko uro. Pravzaprav sta zaradi bolj verodostojnih rezultatov vzela vsak štiri ure.

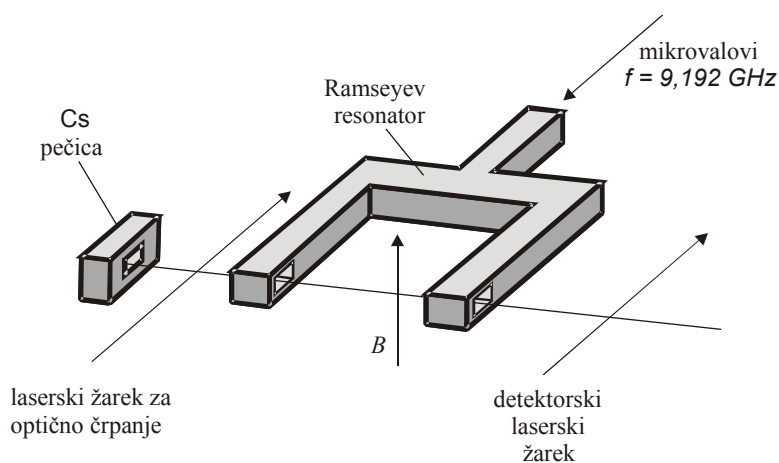
Eden je letel od vzhoda proti zahodu, drugi pa v obratni smeri. Skupni pretečeni čas je bil primerjan s fiksnim časom atomske ure na površini Zemlje (US Naval Observatory). Ugotovljeno je bilo, da so ure, ki so letele proti vzhodu, kazale povprečno 59 ns manj. Ure, ki so letele proti zahodu, so kazale 273 ns preveč. Izmerjena razlika med obema vrednostma 332 ns se za manj kot 5% razlikuje od teoretične, izpeljane iz specialne relativnostne teorije (podaljševanje časa zaradi hitrosti) in splošne relativnostne teorije (podaljševanje časa zaradi gravitacije). Praktično to pomeni, da atomske ure tečejo malenkost hitreje v zraku (letalo, satelit) kot na Zemljinem površju [3].

### Lasersko ohlajanje atomov

Za izboljšavo negotovosti atomskih ur je bistveno, da lahko čim dalj časa opazujemo atome. To pomeni, da morajo biti hitrosti atomov čim nižje. Običajno imajo atomi hitrosti čez 100 m/s.

V osemdesetih letih 20. stoletja je bilo odkritih več tehnik, s katerimi je možno atome upočasniti na hitrosti nekaj cm/s. Če bi hitrost izrazili v obliki temperature, gre za nekaj milijonink stopinje nad absolutno ničlo.

Če se upočasnjevanje atomov z IR lasersko svetlobo kombinira z gradientnim magnetnim poljem, lahko zadržimo atome v določenem delu prostora. Na ta način deluje magnetooptična past za atome. Leta 1997 je bila za nova spoznanja s področja laserskega ohlajanja S. Chuju, C. Cohen-Tannoudjiju in W.D.Phillipsu podeljena Nobelova nagrada za fiziko.

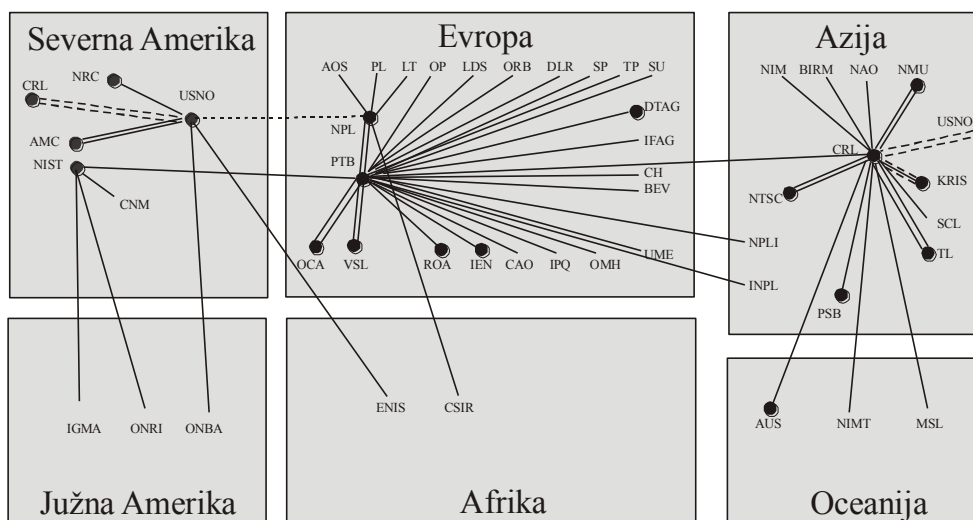


Slika 6.3: Cezijev etalon z optičnim črpanjem (laserskim ohlajanjem atomov).

## Diseminacija sekunde

Primerjave med etaloni časa in frekvence v okviru meroslovne piramide potekajo preko časovnih signalov. V ta namen je vzpostavljena časovna skala TAI, ki na osnovi odčitkov atomskih ur, ki delujejo v različnih okoljih, v skladu z SI definicijo sekunde predstavlja referenčno časovno koordinato. Mednarodni atomski čas TAI vzdržuje BIPM na osnovi uravnoteženega povprečenja okoli 230 cezijevih ur v 50 različnih meroslovnih institucijah, upoštevaje njihovo stabilnosti in ostale lastnosti.

Področje uporabe in s tem učinkovitost ur in frekvenčnih etalonov se lahko precej razširi, če so le-ti kalibrirani v rednih intervalih ali celo neprekinjeno korigirani z referenčnimi etaloni.

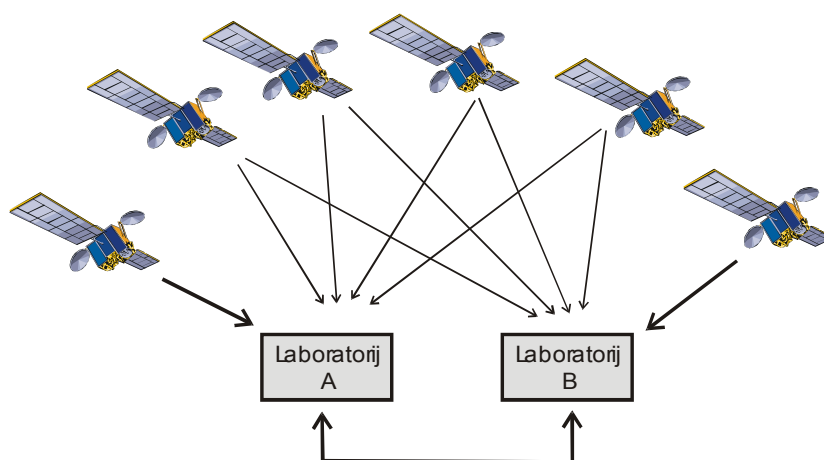


Slika 6.4: Način izračunavanja mednarodnega časa TAI iz podatkov metroloških institucij. Črn krog predstavlja laboratorij, ki je opremljen s TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer), povezave so različni sistemi GPS (Global Positioning System) [6].

Za prenos časa med dvema točkama se danes uporablja različne metode. Enostavna, zanesljiva in točna je metoda prenosa časa s pomočjo transporta baterijsko napajanih ur (cezijeve ure). Negotovost prenosa časa znaša okoli 20 ns za kratke razdalje (nekaj ur), oziroma 200 ns za medcelinske prenose.

Vrsta metod kot nosilne signale izkorišča signale višjih frekvenc. Metoda prenosa z visokofrekvenčnim oddajanjem HF (med 3 MHz in 30 MHz) izkorišča odbijanje signala med ionosfero in zemeljskim površjem. Negotovost prenosa časa znaša okoli 500  $\mu$ s. Metoda prenosa z nizkofrekvenčnim oddajanjem LF (od 30 kHz do 300 kHz) je primerna, ker doseže velike razdalje (2000 km) in uporablja sprejemne antene velikosti samo nekaj centimetrov tudi v notranjostih stavb. Negotovost prenosa časa znaša okoli 100  $\mu$ s. Negotovost prenosa časa s pomočjo signalov zelo nizkih frekvenc (VLF) znaša okoli 10  $\mu$ s. Prenos se lahko vrši tudi s TV signalom (negotovost 300 ns). LORAN-C (long range navigation) sistem izkorišča nosilno frekvenco 100 kHz in ima negotovost med 0.1  $\mu$ s in nekaj mikrosekundami. Sistem uporablja merjenje razlike poti med satelitom in dvema točkama na površju Zemlje.

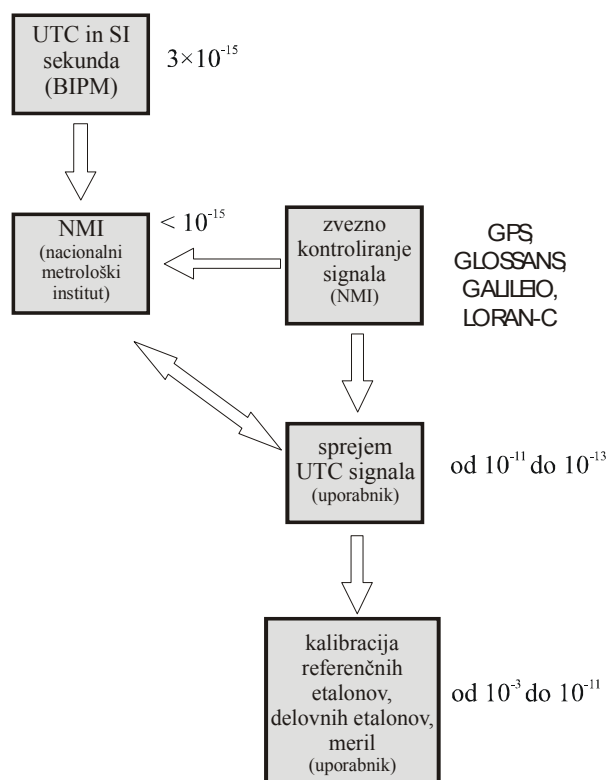
Danes med najbolj pomembne metode za prenos časa uvrščamo metode, ki uporabljajo satelite. Negotovosti takih metod znašajo do 10 ns, v prihodnosti pa naj bi se spustile do 1 ns. Trenutno delujeta dva taka sistema, in sicer sistem za globalno pozicioniranje (GPS) in podobni ruski sistem GLONASS, medtem ko Evropa gradi svoj lastni navigacijski satelitski sistem GALILEO (začetek obratovanja je načrtovan za leto 2008). Delujoča sistema delujeta na podobnem principu kot LORAN, vendar na višjih frekvencah (približno 1200 MHz in 1600 MHz). Negotovosti obeh sistemov so med 20 ns in 50 ns, pri razdaljah pod 2000 km pa tudi do 5 ns, kar ustreza ločljivosti nekaj decimetrov. Drugi sistem, ki izkorišča geostacionarne satelite je TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer) sistem, ki deluje podobno kot GPS/GLONASS, le da zemeljske postaje niso le sprejemniki, ampak tudi oddajniki signala.



Slika 6.5: Primerjava frekvenčnih etalonov preko GPS satelitskega sistema [5].

**Tipične negotovosti** Tipične negotovosti fizikalnih veličin, ki vplivajo na skupno točnost realizacije enote za čas s cezijevimi atomskimi urami, so [1]:

- nehomogenost in časovna nestabilnost magnetnih polj
- pogrešek zaradi gibanja cezijevih atomov (relativnostna teorija)
- negotovost hitrosti cezijevih atomov
- fazni premik Ramseyevega resonatorja zaradi trkov atomov
- negotovost mikrovalovnega vira (temperaturna odvisnost)
- spektralne nečistoče



Slika 6.6: Sledljivostna veriga za signale, ki jih kotrolirajo NMI.

### Realizacija sekunde v prihodnosti

Danes raziskave potekajo v smeri tehnološki izboljšav principov merjenja, s katerimi bi lahko še zmanjšali negotovost etalonov frekvence in izboljšali njihovo frekvenčno stabilnost.

Fizikalni princip novih raziskav v osnovi ostaja enak: uporaba elektromagnetnega valovanja (v optiki laserske svetlobe) za stabilizacijo sevanja atomov ali molekul.

Tehnologija izdelave takih etalonov vključuje tehnike obdelave žarkov in hranjenja delcev v ionskih pasteh ali laserskih poljih. S pomočjo električnega in magnetnega polja lahko v ionskih pasteh v majhnih prostorninah shranjujemo nabite delce (oblake ionov ali posamezne ione). Delci so lahko shranjeni več ur ali celo dni in so kasneje uporabljeni za frekvenčne meritve. Z optičnim črpanjem s pomočjo laserske svetlobe lahko delce ohladimo, t.j. upočasnimo njihovo hitrost, kar posledično pomeni izboljšanje negotovosti merjenja frekvence. Danes lahko že rutinsko ohladijo 100 milijonov atomov na temperaturo nekaj mikrokkelvinov.

Točnosti ur z uporabo ionskih pasti naj bi bile 1000 krat boljše od današnjih atomskih ur [4].

V obliki ure, imenovane cezijeva fontana, potekajo raziskave v smeri upočasnjevanja cezijevih atomov s laserjev in uporabe

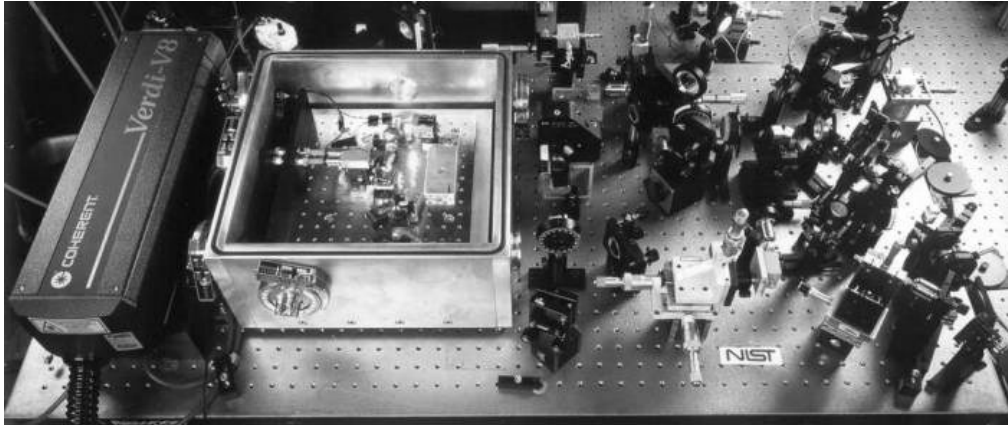
#### Pulzarska ura

Leta 1967 so prvič opisali pulzarje, kot hitro vrteča se nevtronske zvezde z velikansko gostoto in magnetnim poljem. Ko se pulzar vrti okoli svoje osi, oddaja elektromagnetno valovanje. Astronomi lahko opazujejo take oddane pulze. Pri posebnem razredu pulzarjev, t.i. milisekundnih pulzarjih, so ugotovili izredno stabilne časovne intervale med pulziranjem. Stabilnost »pulzarske ure« bi bila najmanj primerljiva z atomskimi urami na Zemlji [4].

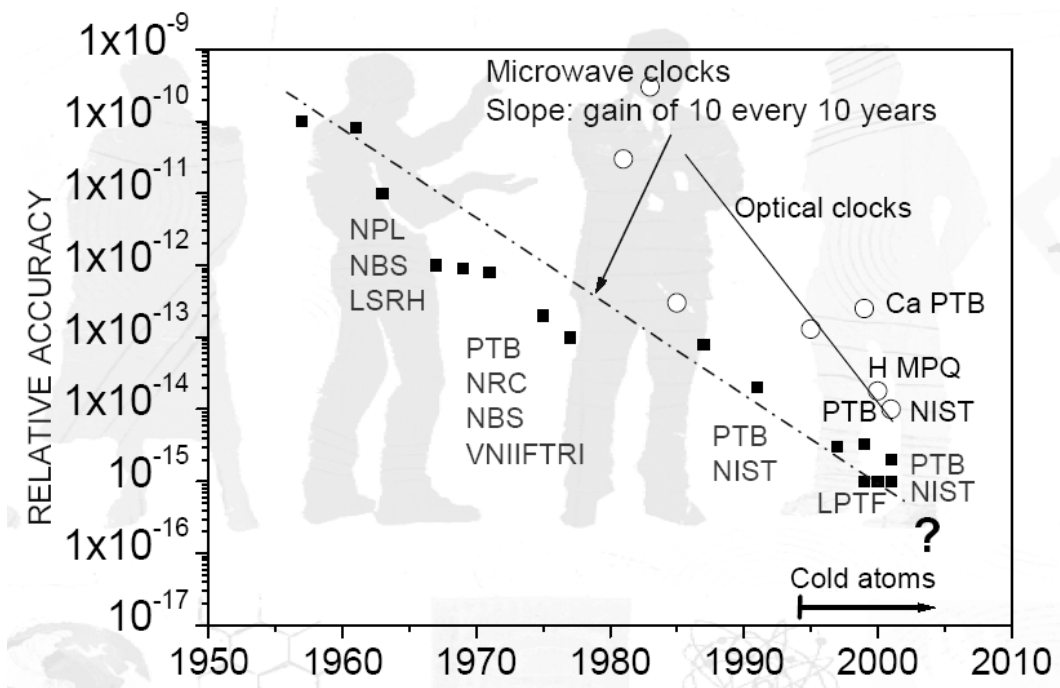


gravitacije za počasen prelet mimo detektorjev. Cezijevi atomi se iz stanja mirovanja pospešijo le toliko, da dosežejo višino približno enega metra, nakar padejo nazaj.

Trenutno najbolj obetajoče raziskave potekajo v smeri optičnih ur z laserji frekvenc nekaj 10 THz. Trenutni rezultati kažejo na negotovosti frekvence med  $10^{-17}$  in  $10^{-19}$ .



Slika 6.7: Postavitev optične laserske ure v ameriškem NIST.



Slika 6.8: Negotovost atomskega časa v odvisnosti od leta [7].

## Literatura poglavja

- [1] J. Bortfeld, B. Kramer, Units and Fundamental Constants in Physics and Chemistry, Subvolume A: Units in Physics and Chemistry, Spinger-Verlag, Berlin Heidelberg, 1991.
- [2] J. McA. Steele, Louis Essen, <http://www.npl.co.uk/time/essen.pdf>
- [3] H. A. Klein, The Science of Measurement, A History Survey, Dover Publications, New York, 1974, p175
- [4] <http://www.npl.co.uk/time/>
- [5] Z. Svetik, R. Lapuh, I. Visočnik, Nacionalni etalon frekvence in časa, <http://www.siq.si/PDF/Meroslovje/Cas.pdf>
- [6] [http://www.bipm.fr/cgi-bin/get\\_BIGGER?INDEX=3&SECTION=TAI&MAPF=/5/navig530.html](http://www.bipm.fr/cgi-bin/get_BIGGER?INDEX=3&SECTION=TAI&MAPF=/5/navig530.html)
- [7] Marc E. Himbert, Uncertainties I & II, BIPM Metrology Summer School 2003

# Dolžina

**Definicija enote za dolžino** *Meter (m) je dolžina poti, ki jo prepotuje svetloba v vakuumu v času 1/299 792 458 sekunde.*

Definicija enote je bila sprejeta na 17. zasedanju CPIM leta 1983. Poglavitni del definicije metra je bilo fiksiranje vrednosti svetlobne hitrosti. V SI sistemu je vrednost svetlobne hitrosti v referenčnih pogojih (vakuum, ravninsko svetlobno valovanje, brez gravitacije) točno

$$c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

Danes v računanju merilnih negotovosti realizacije metra uporabljamo absolutno točno vrednost  $c_0$ , neobremenjeno z negotovostjo.

Definicija metra torej temelji na definiciji sekunde. Posledično je vsaka realizacija metra sledljiva na realizacijo sekunde. Vendar bo definicija metra ostala nespremenjena ob vsaki izboljšavi realizacije sekunde v prihodnosti. Izboljšava realizacije sekunde pa bo seveda pomenila izboljšanje realizacije metra. Pravimo, da je meter danes metrološko odvisen od sekunde.

## Zakaj potrebujemo točno merjenje dolžine?

Potreba po merjenju dolžine se pojavlja v našem življenju vsak dan. Ko nas frizer vpraša, koliko naj nas ostriže, in ko kupujemo nove čevlje. Dolžina je pomembna, ko iščemo nove ventilčke za gume svojega starega kolesa in moramo povedati, kakšne navoje naj imajo. Merjenje dolžine nas zanima, ko računamo porabo bencina našega avta. Brez točnega merjenja dolžine bi bilo težje graditi predore, kjer je pomembno, da se obe izvrtini srečata na istem mestu. Brez točnih dolžin se kovinski deli, izdelani v Sloveniji, ne bi prilegali avtomobilski karoseriji francoskega avta, sestavljenega v Španiji. Vedno manjše dimenzije mikroprocesorjev današnjih računalnikov imajo točno definirane dolžine (tipične negotovosti so nekaj nm). Iz teh posameznih primerov lahko vidimo, da ima spekter uporabe merjenja dolžine velik razpon.

Tabela 6.2: Razpon merjenj dolžine.

500 000 000 000 000 000 000 m	$5 \times 10^{20}$ m	premer naše galaksije
150 000 000 000 m	$1,5 \times 10^{11}$ m	povprečna razdalja Zemlja - Sonce
380 000 000 m	$3,8 \times 10^8$ m	razdalja med Zemljo in Luno
2 400 000 m	$2,4 \times 10^6$ m	dolžina kitajskega zidu
8 848 m	$8,8 \times 10^3$ m	višina Mont Everesta
1,8 m	1,8 m	človeška višina
0,000 08 m	$8 \times 10^{-5}$ m	debelina človeškega lasu
0,000 004 m	$4 \times 10^{-6}$ m	tipična velikost celice
0,000 000 001 m	$1 \times 10^{-9}$ m	premer molekule vode
0,000 000 000 3 m	$3 \times 10^{-10}$ m	velikost atoma

## Zgodovina metra

Skozi zgodovino sta definicija in merjenje dolžine dobivali različne oblike. Na začetku so bili za definicijo dolžinskih enot uporabljeni deli človeškega telesa. Kasneje so bile enote definirane z določenimi fizičnimi telesi, na primer kovinskimi palicami. Danes je SI enota metra definirana s svetlobno hitrostjo, ki je osnova univerzalne, povsod veljavne in absolutne dolžinske skale.

Ena najstarejših enot za merjenje dolžine, ki se je uporabljala v starih časih, je bil laket. Laket je bil definiran različno, kot dolžina roke od konice prstov do komolca ali pa kot razdalja med zapestjem in komolcem (rimska ulna). Bil je razdeljen v manjše enote, kot so bili čevlji, dlan in palec. Sestavljanje laktov je definiralo večje enote. Kasneje je bil iz palca (okoli 19 mm), dlani, pednja, komolca (okoli 45 cm), sežnja (1,85 m), stadija (185 m), milje iz 1000 korakov itd. sestavljen pravi sistem enot.

Stare enote so temeljile na dolžinah človeškega telesa. Dolžina enot je bila precej spremenljiva, saj je temeljila na telesnih značilnostih posameznih ljudi. Enote so bile tudi precej geografsko odvisne. V različnih delih Francije so še v 18. stoletju istočasno uporabljali štiri različno dolge sežnje ali klaftre (okoli 2 m).

Tabela 6.3: Različne dolžine dolžinske enote lakta.

laket	dolžina /m
rimski	0,444
kratek egipčanski	0,450
grški	0,463
asirski	0,494
sumerski	0,502
kraljevi egipčanski	0,524
judovski	0,555
palestinski	0,641

Z razvojem tehnologije in znanosti se je vedno bolj pojavljala potreba po uvedbi enote, ki bi bila enotno določena, oziroma bi imela enako dolžino po celem kraljestvu ali celo v širšem območju. V Britaniji je že sredi desetega stoletja saški kralj Edgar kot uradni etalon uvedel jard. Po legendi je bil jard v dvanajstem stoletju definiran kot razdalja med konico nosu kralja Henrika I. (1100-1135) in koncem dvignjenega palca na njegovi iztegnjeni roki (danes 0,914 m). Okrog leta 1120 je Henrik I. določil tudi mero za 1 palec kot širino svojega palca (1 palec=25,4 mm).

Leto 1196 je prineslo prvo dokumentirano standardizacijo merskih enot, ko je angleški kralj Rihard Levjesrčni izdal odlok, da se mora v celi državi uporabljati enako dolžino enega jarda in da mora biti ta izdelan iz železa [1]. Ustvarjen je bil prvi artefakt oziroma prototip dolžinske enote.

Že leta 1575 so v Oppenheimu uporabljali statistično metodo za merjenje dolžine. Dolžino palice so določili s pomočjo 16 v vrsto postavljenih čevljev, ki so pripadali različno velikim in naključno

izbranim možem [2]. Na britanskem otočju so še do dvajsetega stoletja uporabljali okoli 5 m dolgo dolžinsko enoto (perch), ki je bila definirana podobno. En perch je bil seštevek levih stopal šestnajstih mož, ki v nedeljo odhajajo iz cerkve.



Slika 6.9: Kraljevi egipčanski lakt s prikazanimi razdelitvami na manjše enote.

Na slovenskih tleh je bilo predpisano in organizirano "meroizkustvo" od leta 1777 naprej, in sicer v okviru avstro-ogrske monarhije, ko je cesarica Marija Terezija objavila in uveljavila prvi meroslovni zakonik. Ker je novost povsod naletela na hud odpor, je moral cesar Franc Jožef II. leta 1784 obnoviti cimentacijske odločbe za Štajersko, Koroško in Kranjsko (ciment - označba določene mere na posodi). Naslednje leto je izdal patent o Jožefinskem katastru, v katerem je bila v nemščini in slovenščini zapisana odločba o dunajski klafteri kot predpisani enotni meri za zemljemstvo. Izdana so bila tudi natančna navodila za merjenje zemlje, v katerih je bilo predpisano, da se je lahko v vseh avstrijskih deželah uporabljala samo cimentirana lesena dunajska klaftera, razdeljena v čevlje in cole. Uporabljale so se tudi merilne letve ali vrvi, dolge 10 klafter. V Ljubljani in Mariboru so ohranjeni merski etaloni, ki jih je dala izdelati Marija Terezija, ohranjena pa je tudi vrsta meroslovnih predpisov, ki so bili izdani na podlagi novega Zakonika za dežele današnje Slovenije.

Leta 1790 je francoska ustavodajna skupščina poverila francoski Akademiji izdelavo projekta enotnega sistema mer. Idejo enotnega metričnega sistema enot je francoski ustavodajni skupščini razložil marca 1790 škof in državnik Talleyrand. Imenoval ga je decimalni metrični sistem. Osnova reforme merskih enot je bila želja, da se za temelj izberejo tiste naravne vrednosti, ki se s časom ne menjajo in ki jih je mogoče enostavno povzeti. Glede dolžinske pramere so bili dani trije predlogi, in sicer del dolžine zemeljskega poldnevnik, del dolžine ekvatorja ali dolžina sekundnega nihala.

Opravljen so bila merjenja dolžine loka na površini Zemlje, ki ustreza eni kotni stopinji. Taka merjenja so bila izvedena konec 17. stoletja v Franciji, na Nizozemskem in v Angliji. Francoska Akademija je s tem v zvezi organizirala dve znanstveni odpravi. Prva je v letih 1735 do 1746 merila poldnevnik v Peruju, druga pa je isto merila leta 1736 na Laponskem. Za merjenje geodetske baze so služile takratne normalne palice, ki so bile v rabi kot dolžinske pramere. Imenovali so se "Toise du Perou" in "Toise du Nord" (toise je francoska beseda za klaftro ali seženj).

Treba je povedati, da je splošno prepričanje, da naj bi bila ideja o uveljavitvi enotnega merskega sistema plod francoske revolucije, napačno. Že veliko pred francosko revolucijo so namreč pričeli v Franciji z resnim prizadevanjem, da bi nadomestili različne mere, ki so se večkrat razlikovalne od mesta do mesta, z enotnim, naravnim merskim sistemom. Od prvih pobud za tak sistem do podpisa metrske konvencije je poteklo 200 let. Že leta 1670 je Gabriel Mouton, vikar v Lyonu, predlagal, da bi za mersko enoto osvojili dolžino loka ene minute na zemeljski površini. Enoto je imenoval 1 milliaria in je bila decimalno razdeljena v centuria, decuria, virga, virgula, decima, centesima in millesima.

Leta 1767 je Huygens predlagal, da se za naravno dolžinsko pramero izbere dolžina sekundnega nihala. Ta predlog je obnovil Talleyrand ter leta 1790 preciziral, da bi se ta dolžina nihala definirala na 45° severne zemljepisne širine. Posebna komisija Akademije je ta predlog odklonila. Razlog je bil ta, da bi se moralo pri rabi nihala zelo natančno reproducirati sekundo, poleg tega pa se perioda nihanja spreminja z geografskim položajem na Zemlji, ker se z njim spreminja pospešek Zemljine teže.

Odločeno je bilo, da se za enoto dolžine metričnega sistema izbere 40-milijonti del Zemljinega poldnevnika. Tako definirana enota dolžine bi morala služiti tudi za osnovo definicije mere volumna in mase.

Merjenje loka pariškega poldnevnika med Dunquerque in Barcelono sta začela leta 1791 Delambre in Mechain. Zaradi domnevne simetričnosti Zemlje je bil merjen le en kvadrant poldnevnika (ena četrtnina). Sedem let kasneje sta to delo končala Arago in Biot. Delo je bilo naporno in zahtevno, še posebno, ker sta se obe državi ravno takrat pripravljali na vojno. Večkrat se je celo zgodilo, da so znanstvenike zaprli kot vohune. Pri obdelavi rezultatov teh merjenj je sodelovalo 26 evropskih učenjakov, ki so svoje delo zaključili v dveh letih. Posebna komisija Francozov, Nizozemcev, Švicarjev in Špancev je ugotovila, da znaša dolžina četrtnine pariškega poldnevnika 5130740 toise. Glede na to razdaljo je bil določen meter. Glede na današnjo definicijo metra odstopa prameter za manj kot  $3 \times 10^{-4}$  [2].

Enota dolžine meter (naziv je predlagal Borda po grški besedi "metron", kar pomeni meriti) je bila s tem definirana z relacijo: meter = 3 stope + 11,269 linij, kjer so enote "stope" in "linija" (t.i. pariška linija) izhajale iz klaftre (Toise du Perou). Večje in manjše enote dolžine so definirali iz tako določenega metra po decimalnem principu.

Rezultat raziskave je bila platinasta palica dolžine enega metra, izdelana leta 1799 in imenovana *Mètre des Archives*, ki je postala osnovni etalon novega merskega sistema, imenovanega Metrični sistem.

Zlitina platine in iridija se je izkazala za izredno stabilno. Precej bolj stabilno kot material prajarda iz leta 1885, ki je bil izdelan samo iz platine in se krči za eno milijoninko vsakih 20 let.

7. aprila 1795 je francoski zakon predpisal decimalni metrični sistem in nazive enot tega sistema, kot so: meter za dolžino, ar za površino, liter za volumen in gram za maso. Izraz kilogram za maso enega litra vode je bil uveden kasneje. Predpisano dolžino metra in maso enega kilograma je kot etalon izdelal Fortin. Mere je izdelal iz platine, kovane v ognju. Platinski prameter *Mètre des Archives* je bila palica preseka  $25 \times 4,05$  milimetra, katerega konci so bili medsebojno oddaljeni točno en meter pri temperaturi taljenja ledu. Shranjen je v arhivu Francoske republike.

Leta 1889 je bilo izdelano trideset palic iz zlitine platine in iridija. Ena izmed njih (številka 6) je nadomestila *Mètre des Archives* in bila izbrana kot Mednarodni prototip metra. Države podpisnice Meterske konvencije so z žrebanjem dobile v last preostale palice, ki so tako postale nacionalni etaloni (ZDA so dobile številki 21 in 27, Velika Britanija številko 16...).

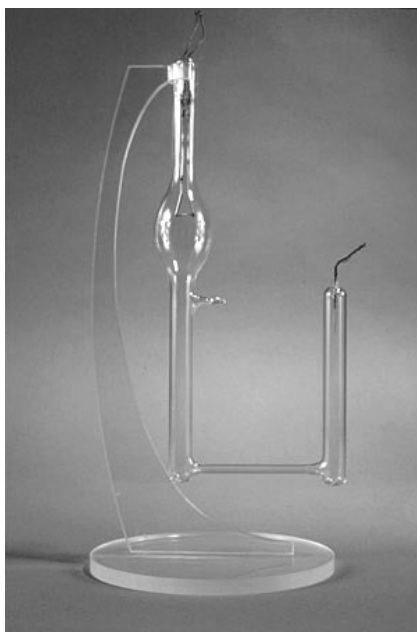
Slika 6.10: Prototip metra – Palice so bile izdelane iz zlitine platine z 10 % deležem iridija. Zlitina se je zaradi velike gostote, nižje stopnje korozivnosti od medenine in mehanske togosti izkazala za izredno primerno za izdelavo etalonov dolžine in mase. Palice so bile izdelane v obliki črke H po zamisli Francoza Henrija Tresca. Tako imenovani Tresca presek palice je zagotavljal njeno maksimalno togost. Na obeh koncih palice sta bili dve elipsi s tremi zarezami 0,5 mm narazen. Razdalja med srednjima je definirala en meter. Palica na sliki je nacionalni etalon Združenih držav Amerike (št. 27), ki definira dolžino glede na Mednarodni prototip metra kot  $1 \text{ m} - 1,6 \mu\text{m} + 8,657 \mu\text{m} \cdot T + 0,001 \mu\text{m} \cdot T^2 \pm 0,2 \mu\text{m}$ , kjer je  $T$  temperatura v stopinjah celzija. Meja pogreška prototipa prototipa številka 27 je bila določena kot  $\pm 0,04 \mu\text{m}$  [3].



Praktična uporabnost in obnovljivost Mednarodnega prototipa metra je postala osnova za njegovo vse širšo uporabo, ki je vse bolj izpodrivala definicijo metra z Zemeljskim poldnevnikom.

Vendar pa uporabnost etalona, definiranega popolnoma na podlagi naravnih fizikalnih pojavov, nikoli ni bila pozabljena in kmalu so znanstveniki predlagali novo definicijo metra, ki bi temeljila na lastnosti svetlobe, na njeni valovni dolžini.

Osnovo gonilo iskanja nove definicije metra je bilo naslednje. Če bi bil meter definiran recimo v obliki valovne dolžine svetlobe, bi ga lahko s pomočjo atomskih svetilk, ki svetlobo oddajajo, reproducirali v katerem koli dobro opremljenem laboratoriju na Zemlji.



Slika 6.11: Kriptonova svetilka oddaja monokromatično svetlobo (oddajajo jo električno vzbujeni atomi izotopa plina kripton 86).

Med 1960 in 1983 je bil meter definiran s pomočjo fizikalnih lastnosti monokromatične svetlobe, ki jo oddajajo električno vzbujeni atomi plina kripton 86 (slika [Napaka! Neveljavna povezava.](#)).

Aktivni del kriptonove svetilke je potopljen v tekoči dušik, njen izhod pa meri svetlobni interferometer.

Interferometer je naprava, ki omogoča merjenje svetlobe, oziroma njene valovne dolžine. S pomočjo točno definirane in stabilne svetlobe (ponavadi laser) in treh zrcal se lahko s pomočjo interference svetlobnih signalov določi valovna dolžina ali frekvenca svetlobe s točnostmi reda nm. Žarek enobarvne svetlobe prvo polprepustno zrcalo razdeli na dva žarka, ki sta speljana po dveh različno dolgih poteh in na koncu združena. Interferenčna slika je odvisna od razlike poti žarkov.

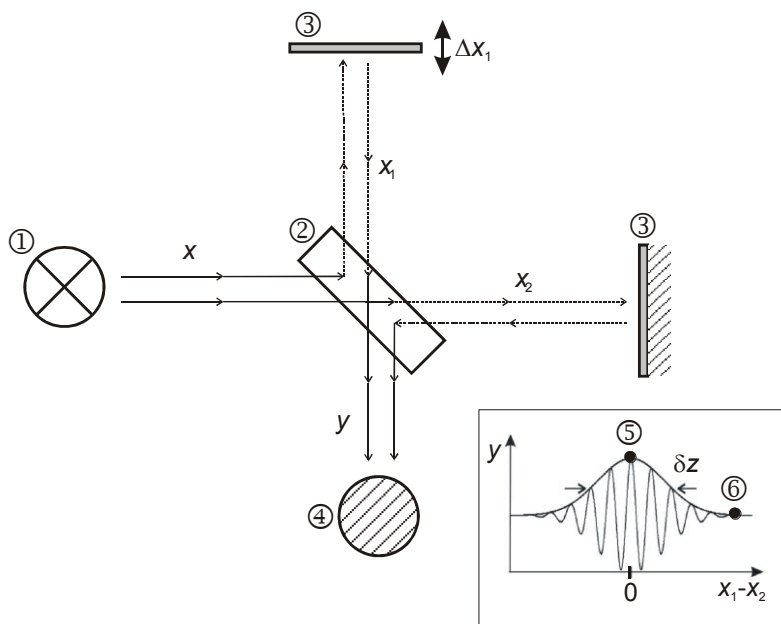


Za konstrukcijo prvega interferometra je ameriški znanstvenik poljskega rodu Albert A. Michelson leta 1907 dobil Nobelovo nagrado.

Po njegovem predlogu so dolžino prametra določili z valovno dolžino rdeče svetlobe, ki jo izseva kadmijeva svetilka. Meritve so bile kasneje potrjene s Fabry-Perotovim interferometrom. Leta 1923 je Michelson določil hitrost svetlobe kot 299 798 km/s.

Po njegovi smrti pa so dokončali njegov zadnji eksperiment in izračunali hitrost svetlobe 299 794 km/s, za manj kot 2 km/s drugačno, kot je bila določena leta 1970.

Slika 6.12: Skica delovanja Michelsonovega interferometra - ① - vir svetlobe, ② - polprepustno zrcalo, ki razdeli svetlobo, ③ - fiksno in pomično zrcalo ( $\Delta x_1$  je premik zrcala), ④ - detektor svetlobe,  $x$  je vpadni žarek iz vira svetlobe,  $x_1$  in  $x_2$  sta poti obeh delov razdeljenega vpadnega žarka,  $y$  je interferirana mešanica žarkov  $x_1$  in  $x_2$ . ⑤ - ko je razlika poti obeh žarkov enaka nič, se razdeljena žarka seštejeta in je interferenčni signal  $y$  največji. ⑥ - ko se žarka medsebojno odštejeta, je odklon  $y$  najmanjši. Faktor  $\delta z$  v splošnem predstavlja maksimalno ločljivost interferometra in je v fizikalnem smislu koherentnost vira svetlobe. Za izhod ⑤ mora biti razlika  $x_1$  in  $x_2$  večja od  $\delta z$ .



Med 1892 in 1940 je bilo v različnih laboratorijih narejenih devet meritev prametra v smislu valovne dolžine svetlobe. Srednja vrednost teh meritev je postala osnova nove definicije metra. Meter je bil definiran kot »dolžina enaka 1 650 763,73 valovnih dolžin v vakuumu... kriptona 86«. Na ta način je nova uradna definicija metra v letu 1960 nadomestila Mednarodni prototip metra.

Od leta 1983, ko je vrednost svetlobne hitrosti  $c_0$  fiksno določena, vsako generiranje etalonskega valovanja pomeni generiranje etalonske frekvence in istočasno etalonske valovne dolžine z isto relativno negotovostjo realizacije in isto obnovljivostjo. Ko je etalon frekvence zgrajen, ga lahko izmerimo s cezijevo atomsko uro.

Prva meroslovna povezava med definicijama dolžine in časa je bila narejena leta 1972. Frekvenca in valovna dolžina molekule metana je bila izmerjena s pomočjo cezijeve ure in z interferometrično primerjavo z etalonsko kriptonovo svetilko. Negotovost vrednosti rezultirajoče hitrosti svetlobe je bila skoraj 100 krat boljše kot pred tem.

Definicija metra iz leta 1960 s kriptonovo svetilko ter relativna negotovostjo  $4 \times 10^{-9}$  je začela omejevati negotovost merjenja. Prvič se je izkazalo, da definicija metra s pomočjo kriptonove svetilke ni

več zadosti točna.

Sočasno s kriptonom svetilko je bil leta 1960 skonstruiran tudi prvi laser. Do sredine sedemdesetih let 20. stoletja se je laser vedno bolj dokazoval kot primeren etalon dolžine. Leta 1983 je bila definicija metra s kriptonom nadomeščena z novo in meter je bil definiran kot »dolžina poti, ki jo prepotuje svetloba v vakuumu v času  $1/299\,792\,458$  sekunde«. Najuspešnejše realizacije metra so danes izvedene s helij-neon laserjem, stabiliziranim z atomi joda. Imajo obnovljivost boljšo od  $\pm 3 \times 10^{-11}$  [1].

Ponovno je bila definirana tudi prejšnja realizacija metra s pomočjo kriptonove svetilke, ki je ohranila negotovost  $1 \times 10^{-9}$ , vendar se je valovna dolžina spremila na  $605\,780\,210$  fm [4].

Tabela 6.4: Razvoj definicije metra [1].

Datum	Definicija metra	Negotovost realizacije v odvisnosti od definicije obdobja
1791	Četrtnina poldnevnika Zemlje	0,06 mm
1889	Mednarodni prototip metra	0,002 mm
1960	Kriptonova svetilka	0,000 007 mm
1983	Hitrost svetlobe	0,000 000 7 mm
danes	Hitrost svetlobe z izboljšano točnostjo He-Ne laserja	0,000 000 02 mm

**Realizacija metra** CIPM je predlagal tri načine realizacije metra.

#### Merjenje časa preleta elektromagnetnega valovanja $t$

Meter, oziroma razdalja  $l$  se realizira z merjenjem časa  $t$ , ki ga potrebuje ravninsko elektromagnetno valovanje za prelet  $l$  v vakuumu, pri čimer se širi s hitrostjo  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s.

$$l = c_0 t$$

Ta realizacija velja za neposredno realizacijo metra. Praktično je ta realizacija uporabna za velike razdalje v astronomiji, ko se na ta način določajo radii kroženja nebesnih teles. Za majhne razdalje je točnost močno zmanjšana, saj čas preleta dolžine 1 m znaša okoli 3 ns. Tako tudi negotovost realizacije sekunde s cezijevo uro  $2 \times 10^{-14}$  zadostuje le za neposredno realizacijo enega metra z relativno negotovostjo okoli  $10^{-5}$  [4].

#### Merjenje frekvence elektromagnetnega valovanja $\nu$

Dolžina  $l$  je realizirana z merjenjem valovne dolžine  $\lambda$  ravninskega elektromagnetnega valovanja s frekvenco  $\nu$

$$l = n \lambda,$$

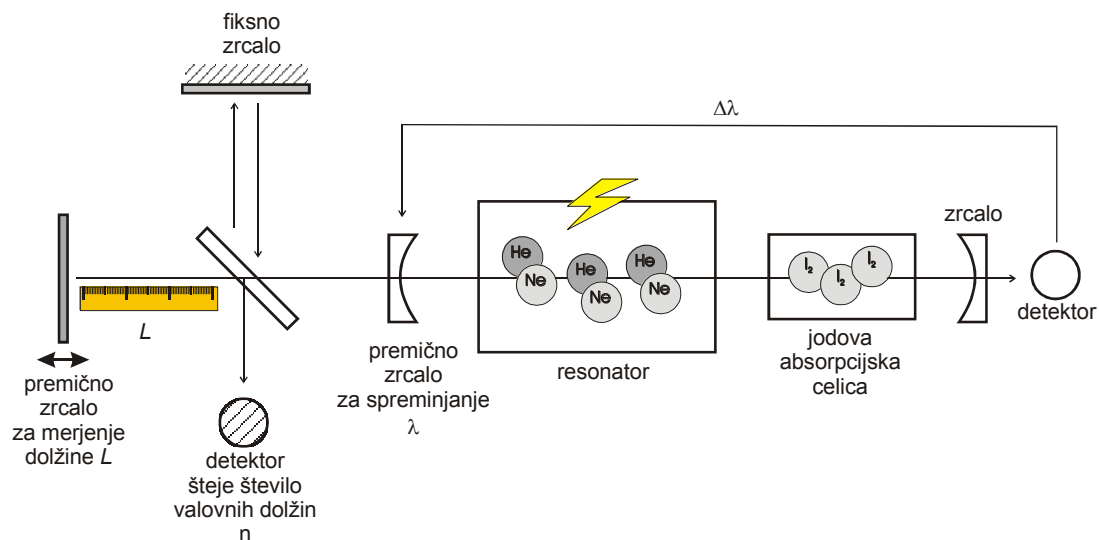
kjer je  $n$  število valovnih dolžin. Z razvojem laserske tehnologije je nastala široka množica frekvenčnih generatorjev visokih frekvenc ter izredno visoke obnovljivosti. Te generatorje imenujemo tudi optični frekvenčni etaloni. Pri tem načinu realizacije enote za dolžino se uporabljajo interferometri.

### Realizacija metra s pomočjo enega od predpisanih elektromagnetnih valovanj

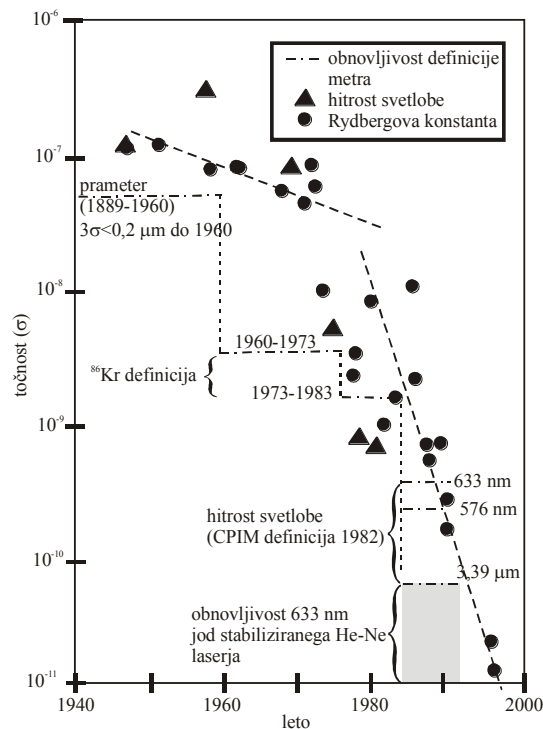
CIPM je zbral frekvence in pripadajoče valovne dolžine različnih laserjev v vakuumu. Vsi podatki so opremljeni z veliko točnostjo. Poleg tega so podani še nasveti in pogoji uporabe laserja, temperature plina in okolice, korekcijski faktorji zaradi neidealnega vakuuma, gravitacije, uklona valovanja...

### Realizacija metra s helij-neonovim laserjem, stabiliziranim z jodovimi molekulami

Za najtočnejšo realizacijo enote za dolžino se danes uporablja helij-neonov laser, ki je stabiliziran z jodovimi atomi. Svetloba, ki jo oddajajo vzbujeni helijevi in neonovi atomi, je ojačena s stimulativnim dodajanjem sevanja (Light-Amplified Stimulated Emission of Radiation - LASER). Svetloba se usmerjeno širi v resonator, ki je zaključen z dvema visoko odbojnima zrcaloma. Valovna dolžina  $\lambda$  je določena s položajem premičnega zrcala. Jodove molekule absorbirajo fiksno in točno določeno valovno dolžino svetlobe. Izhod jodove absorpcijske celice elektronsko krmili položaj zrcala in tako zaprtozračno regulira valovno dolžino  $\lambda$  na fiksno vrednost. Ta proces se imenuje stabilizacija laserja.



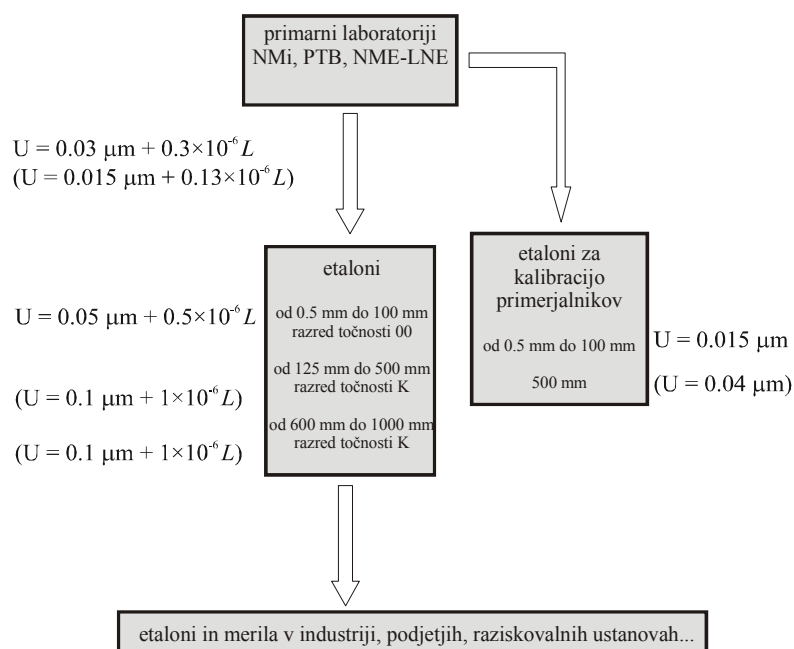
Slika 6.13: Realizacija dolžine ( $L$ ) z jod stabiliziranim helij-neonovim laserjem ( $L = n\lambda$ ).

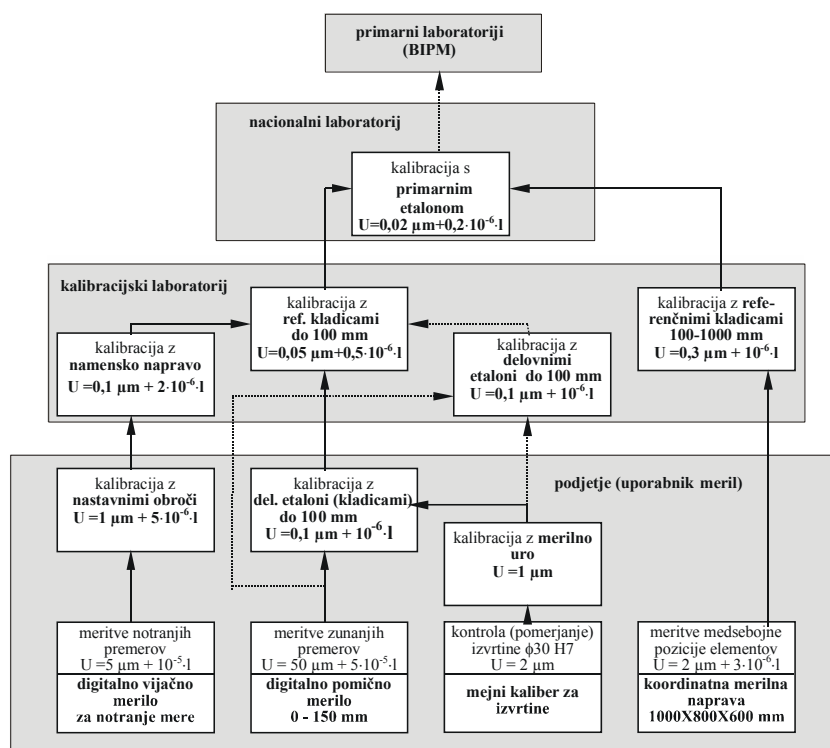


Slika 6.14: Relativna negotovost realizacije metra v odvisnosti od definicije metra [5].

**Diseminacija metra** Kalibracije in s tem navezave nižjih etalonov na višje lahko potekajo na podlagi različnih metod in principov. V postopku navezave na nacionalni etalon se metrološko nižji etaloni kalibrirajo po metodi mehanske primerjave z nacionalnim etalonom z uporabo induktivnih merilnikov. Kalibracije črtnih meril (tračna merila, merilne letve, objektni mikrometri) se izvajajo z video-pozicionirnim sistemom in laserskim interferometrom. Ne predstavljajo navezave na nacionalni etalon, ampak preko laserskega interferometra neposredno navezavo na primarni etalon.

Slika 6.15: Metrološka piramida za merjenje dolžine (prikazane vrednosti negotovosti veljajo za Laboratorij za tehnološke meritve, nosilca nacionalnega etalona za dolžino v letu 2003), vrednosti brez oklepajev predstavljajo meritve dolžin do 100 mm, vrednosti v oklepajih pa med 100 mm in 1000 mm).





Slika 6.16: Primer zagotavljanja sledljivosti posameznih meritev s pomočjo kalibracij v podjetju, v kalibracijskem laboratoriju in v nacionalnem laboratoriju [6].

Primarni nivo metrološke piramide za dolžino predstavlja frekvenca laserja, ki se pod določenimi pogoji medija, v katerem merimo, pretvarja v valovno dolžino. BIPM definira vrsto laserjev, ki se lahko uporabljajo kot primarni etaloni s stališča frekvenčne stabilnosti.

Interferenčna merjenja dolžin običajno potekajo v zraku. Le specialni interferometri merijo valovne dolžine v vakuumu. Za merjenja v zraku je potrebno poznati lomni količnik zraka, ki je odvisen od sestave zraka in njegove gostote. V praksi se zaradi enostavnosti in večje zanesljivosti namesto gostote meri temperaturo in tlak zraka. Izmerjeni vrednosti se primerja s standardiziranimi. Interferenčna merjenja dolžine normaliziramo glede na valovne dolžine etalonskega, normalnega zraka. Normalni zrak je trenutno definiran kot suh zrak s temperaturo 20 °C pri tlaku 1000 hPa in z vsebnostjo 0,04 % CO<sub>2</sub> [4].

Valovne dolžine v etalonskem zraku so posredniški etaloni dolžine in jih lahko izračunamo iz CIPM priporočenih valovnih dolžin v vakuumu s pomočjo lomnega količnika zraka  $n_{\text{zrak}}$ .

$$\lambda_{\text{zrak}} = \frac{\lambda_{\text{vac}}}{n_{\text{zrak}}}$$

kjer se lomni količnik zraka določa po enačbi

$$(n_{zrak} - 1) \cdot 10^7 = 643,28 + \frac{294981}{146 - \left(\frac{1}{\lambda_{vac}}\right)^2} + \frac{2554,0}{41 - \left(\frac{1}{\lambda_{vac}}\right)^2}.$$

Leta 1988 je bilo v popravljene enačbi za  $n_{zrak}$  upoštevano tudi počasno dvigovanje deleža CO<sub>2</sub> v atmosferi [4].

S pomočjo primarnih laserjev se kalibrirajo merilni laserji (neposredna absolutna primerjava frekvenc), ki jih uporabljamo v različnih izvedbah interferometrov (na primer za kalibracijo končnih meril - kladic ali pa za neposredno merjenje pomikov - razdalj). Kladice - končna merila potem v večini primerov služijo kot etaloni pri nadaljnjih (nižjih) nivojih kalibracije.

**Tipične negotovosti** Tipične negotovosti, ki vplivajo na skupno točnost realizacije enote za dolžino, so [4]:

- negotovost realizacije enote za čas
- negotovost merjenja frekvenčnega razmerja
- obnovljivost frekvenčnega etalona
- negotovost delovne okolice (lastnosti etalonskega zraka)

**Realizacija metra v prihodnosti** Obstoječe izvedbe stabiliziranega He-Ne laserja imajo visoko točnost, vendar je v prihodnosti možno točnost tudi do milijonkrat izboljšati.

Točnost obstoječega jod stabiliziranega He-Ne laserja omejuje dejstvo, da so jodove molekule na sobni temperaturi in trkajo med seboj tudi izven področja, obsevanega z laserjem. Posledično absorbirajo relativno širok spekter valovnih dolžin.

Trenutno potekajo raziskave v smeri nadomestitve jodovih molekul z atomi kovine, kot sta iterbij in stroncij. Atom se ionizira in shrani v ionski pasti. V notranjosti ionske pasti ga lahko z UV ali modro svetlobo ohladimo in obdržimo skoraj nepremičnega. Tak posamezen atom je odlična referenca valovne dolžine, saj absorbira svetlobo v širini ene milijoninke širine spektra jodove molekule [1].

### Literatura poglavja

- [1] <http://www.npl.co.uk/npl/publications/length/>
- [2] H. A. Klein, The Science of Measurement, A History Survey, Dover Publications, New York, 1974
- [3] <http://museum.nist.gov>
- [4] J. Bortfeld, B. Kramer, Units and Fundamental Constants in Physics and Chemistry, Subvolume A: Units in Physics and Chemistry, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1991
- [5] National Measurement System Foundation Programme 1998-2001, NPL, <http://www.dti.gov.uk/nms/prog/old/quantum.pdf>
- [6] B. Ačko, Laboratorij za tehnološke meritve, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru, 2003

# Masa

**Definicija enote za maso** *Kilogram (kg) je enota za maso in ustreza masi mednarodnega prototipa kilograma.*

Ta definicija je bila sprejeta leta 1889. Leta 1989 je bila definicija dopolnjena v smislu, da je kilogram enak masi mednarodnega prototipa »takoj po postopku čiščenja po BIPM metodi«.

**Mednarodni prototip kilograma »K«**

Po podpisu Meterske konvencije je leta 1875 BIPM izdelal 43 prototipov kilograma iz zlitine platine (90%) in iridija (10 %). V letu 1883 je bil med tremi prototipi (KI, KII in KIII) izbran Mednarodni prototip kilograma (K), med ostalimi 40 prototipi (K1 do K40) so za BIPM izbrali šest delovnih in rezervnih etalonov (Témoins), ostalih 36 prototipov pa so kot nacionalne etalone razdelili med države podpisnice Meterske konvencije. Novim članicam Meterske konvencije je bilo med letoma 1929 in 1974 dodeljenih še 23 prototipov (K41 do K63) in 10 prototipov v osemdesetih.



Slika 6.17: Prakilogram K in šest delovnih rezervnih etalonov (Témoins), ki se vsakih 12 let primerjajo s K.

Slika 6.18: Ne levi je prikazan primarni etalon kilograma iz nerjavečega jekla, na desni pa nacionalni etalon Velika Britanija (K18) iz zlitine platine in iridija.



Prakilogram K je pod tremi steklenimi zvoni v »običajno suhem zraku predmestja Pariza« shranjen v trezorju BIPM v Parizu. Ker gre za en in edini »pravi« kilogram na Zemlji, je razumljivo zelo zaščiten pred poškodbami in izredno časovno stabilen. Za neposredno primerjavo z ostalimi prototipi se ga zelo redko uporablja. Od 1890 le trikrat. Je na konstantni temperaturi  $19\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ , ki zagotavlja izredno stabilnost. V primeru prenizke temperature bi se na površini prakilograma kondenzirala voda, ki bi prodrla v zunanje plasti materiala. Pri previsoki temperaturi bi



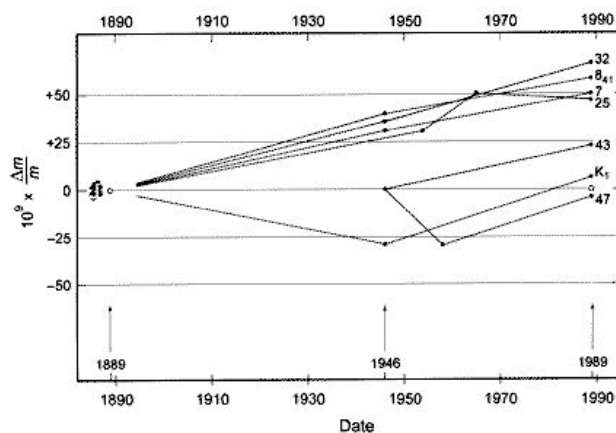
prišlo do večjega odlaganja nečistoč in absorpcije hidrokarbonatov iz okoliškega zraka. Ugotovljeno je bilo, da bi odstranitev ene same plasti atomov na spodnji ploskvi etalona K pomenila zmanjšanje kilograma za 3  $\mu\text{g}$  [6].

K se neposredno primerja s šestimi primarnimi etaloni (Témoins), ki se nato bolj pogosto primerjajo z nacionalnimi etaloni mase.

Primerjave potekajo po opravljenem čiščenju vseh prototipov z vodno paro in etrom.

Primerjave na najvišjih meroslovnih nivojih se vršijo s pomočjo prototipne tehtnice z relativno občutljivostjo pod  $1 \times 10^{-10}$ .

Slika 6.19: Témoins so bili do sedaj le trikrat primerjani s prakilogramom K (leta 1889, 1946 in 1989). Pri tem je bilo ugotovljeno, da njihove mase proti K v stotih letih povprečno rastejo za okoli 0.5  $\mu\text{g}/\text{leto}$  [1, 3].



### Zakaj potrebujemo točno merjenje mase?

Vsi starodavni merski sistemi so poleg enote za dolžino kot poglobitno enoto uporabljali tudi enote za merjenje mase teles. Merjenje mase teles je bilo široko; od teže skovanega zlatnika do mase kamnitega bloka piramide ali količine kamnja, ki je bila potrebna za obteženje galeje. Danes nas zanima, koliko tehta naš novorojenček, koliko karatov ima zaročni prstan, koliko kilogramov krompirja potrebujemo v shrambi in koliko sladkorja je treba dodati v testo najljubšega peciva. Z razvojem in tehniko se je pomembnost merjenja mase zelo razmahnila, saj je vrsta fizikalnih veličin neposredno definirana glede na merjenje mase (sila, pospeški). Danes le točna meritev mase omogoča, da vesoljske sonde uspešno pristanejo na Marsu.

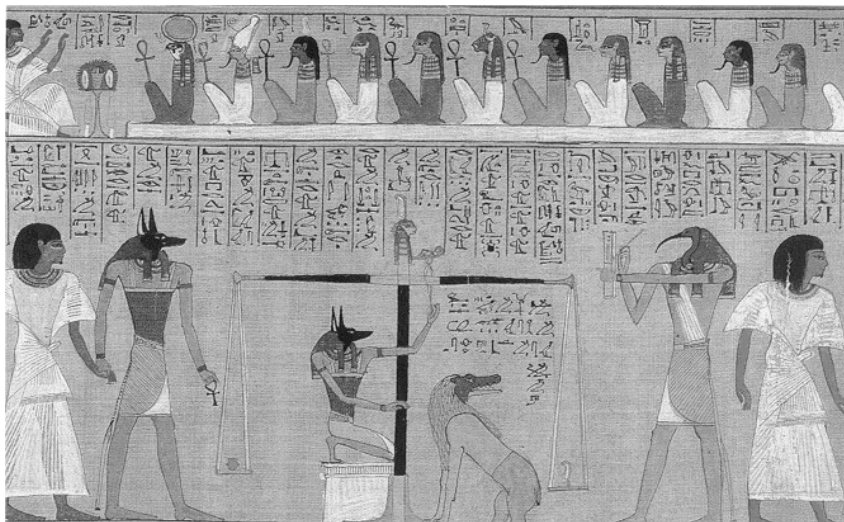
Tabela 6.5: Spekter uporabe merjenja mase ima ogromen razpon.

2 000 000 000 000 000 000 000 000 000 kg	$2 \times 10^{30}$ kg	Sonce
7 100 000 kg	$7,1 \times 10^6$ kg	Eifflov stolp
7 500 kg	$7,5 \times 10^3$ kg	afriški slon
635 kg	635 kg	uradno najdebelejši človek
0,006 4 kg	$6,4 \times 10^{-3}$ kg	kovanec za 5 tolarjev
0,000 39 kg	$3,9 \times 10^{-4}$ kg	sponka za papir
0,000 000 000 000 000 000 000 000 001 67 kg	$1,67 \times 10^{-27}$ kg	masa vodikovega atoma

## Zgodovina enote

Merjenje mase je poleg dolžine in časa verjetno najbolj osnovna in najstarejša oblika merjenja fizikalne veličine v človeški zgodovini. Skozi zgodovino je bila masa definirana na najrazličnejše načine, poenotenje merjenja pa so predstavljali začetki Metrske konvencije konec 18. stoletja.

Slika 6.20: Anijev Papirus, Tehtanje srca iz Egiptčanske knjige mrtvih, iz okoli 1350 pr. n. š. Šakalje glavi bog Anubis primerja srce umrlega s Peresom resnice. Stari Egipčani so verjeli, da bo po smrti masa njihovega srca primerjana s peresom. Pero je bil simbol za red, resnico in pravico, srce pa središče občutkov, čustev in zavesti.



Leta 1790 je francoski kralj Ludvik XVI. ukazal francoskim znanstvenikom, naj predlagajo nov enoten sistem enot. Marca 1791 je bil Francoski akademiji znanosti tako predlagan nov sistem enot, ki je vseboval tudi enoto za maso.

Enota za maso je bila definirana kot masa kubičnega decimetra vode pri temperaturi, ko ima voda največjo gostoto (4 °C). Na ta način je bila enota definirana na podlagi naravne konstante. Kasneje so izračunali, da se je ta enota od enote kilograma po današnji definiciji razlikovala za  $28 \times 10^{-6}$  [6]. Obnovljivost take enote pa je bila prešlaba tudi za takratne potrebe.

V naslednjih stotih letih se je definicija mase še bolj izpopolnila. Izdelana je bila vrsta uteži, z masami enakimi enoti mase. Leta 1793 je bil izdelana prva praenota za maso, imenovana *grave*. Enota za maso se je dve leti kasneje preimenovala v *kilogram*.

Leta 1879 je londonsko podjetje Johnson Matthey and Co. uspešno izdelalo prvi izdelek iz izredno stabilnega materiala, iz zlitine platine in iridija. Definicija mase z vodo je bila opuščena in platinasto-iridijeva utež je postala etalonski kilogram.

Leta 1883 je bil izbran prakilogram K.

Zlitina platine in iridija se je izkazala za zelo primerno že pri izdelavi prametra. Velika gostota zlitine ( $21\,500 \text{ kg/m}^3$ ) je pomenila, da je izdelek iz nje lahko majhen. To hkrati pomeni, da ima minimizirano površino, ki predstavlja odlagališče za nečistoče. Visoka gostota pomeni tudi manjši volumen zraka v prototipu, ki pri najtočnejših meritvah vnaša napako v meritev. Pri merjenjih z vrhunskimi točnostmi je treba zaradi zraka v zlitini namreč upoštevati tudi vzgon prototipa.

Prototipi so izdelani v obliki valja s premerom in višino okoli 39 mm.

**Realizacija enote za maso** Obstoječa realizacija enote za maso predstavlja navezavo na fizično telo, artefakt. To pomeni, da enota mase nikoli ne more biti bolj točno definirana od prakilograma K.

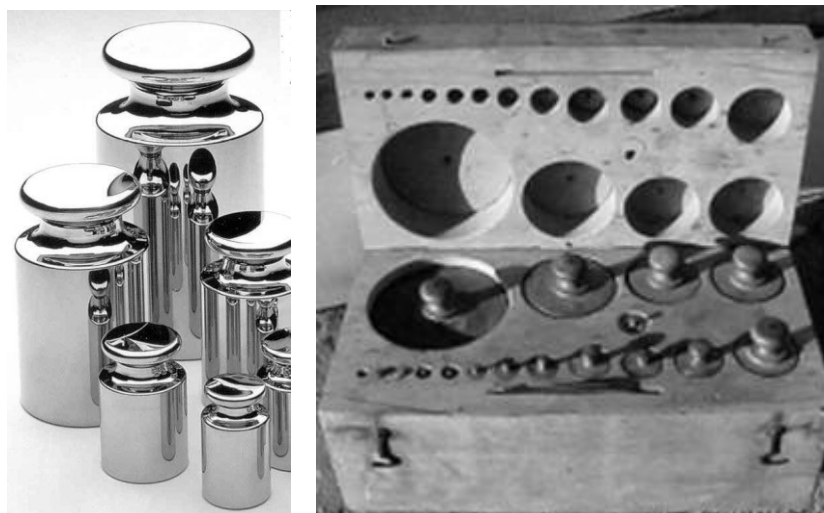
Glede na definicijo enote za maso, ki je navezana na enokilogramski artefakt, so za popolno realizacija masne skale potrebni še večkratniki in delitelji enote v obliki uteži. Uteži predstavljajo določen del enega kilograma (500 g, 200 g, 100 g). Z uporabo takih uteži lahko s pomočjo utežne sheme realiziramo vrednosti od 1 do 10 za vsako dekada masne skale. Poznamo različne utežne sheme, s katerimi realiziramo masno skalo od 1 mg do 10 ton.

rezultat opazovanja (dekada od 100 g do 1 kg)	1 kg	500g	200g	200g	100g	100g
x(1)	+	-	-	-	-	
x(2)		+	-	-		-
x(3)			+	-		
x(4)				+	-	-
x(5)					+	+
x(6)			+		-	-
x(7)		+	-	-	-	

Slika 6.21: Enostavna tehtalna shema s petimi neznanimi etaloni in sedmimi tehtanji na dekada [5]. Masa uteži, ki je v tabeli označena s +, je primerjana z masami uteži, ki so označene z -. V prvem opazovanju dekade 100 g do 1 kg je primerjan znan etalon s skupno maso uteži 500 g, 200 g, 200 g in 100 g. Rezultat primerjave je x(1). Odmike posameznih etalonov lahko izračunamo iz sistema 7 enačb s 5 neznanikami. Na ta način lahko točno določimo 100 g utež. V naslednji dekadi na enak način 100 gramsko utež primerjamo z neznanimi 50 g, 20 g, 20 g in 10 g in določimo 10 g utež.

### Stabilnost uteži

Za vzpostavljane masne skale je potrebna dolgotrajna stabilnost uporabljenih uteži. Uteži morajo biti iz nerjavečih in nemagnetnih materialov s primerno geometrijo. Tako zagotovimo stabilnost uteži in minimiziranje površine. Nujna je tudi uporaba pincet za ohranitev nepoškodovane površine. Za stabilnost uteži so pomembni tudi postopki za uporabo, vzdrževanje in čiščenje uteži (čiščenje z vodno paro, alkoholom, ultrazvokom ali posebnimi krpami). Uteži morajo biti odporne na spremembe okolice (hranjene v kontroliranih okoljih, zaščitene so s steklenimi zvoni, okoliški zrak je filtriran). Potrebno je poskrbeti, da med tehtanjem okoliške magnetne in električne sile ne vplivajo na utež. Pri optimalnih pogojih platinasto-iridijev prakilogram K in nacionalni etaloni ter etaloni iz avstenitnega (nemagnetnega nerjavečega) jekla dosegajo stabilnost mase  $\pm 10 \mu\text{g}$  v obdobju več let [5].



Slika 6.22: Set sodobnih jeklenih uteži za merilno območje do 1 kg (levo) in set uteži, ki so bile v uporabi včasih.

### Metode merjenja

Na telo, ki leži na Zemlji, delujeta dve sili : gravitacijska sila Zemlje in centrifugalna sila zaradi Zemljine rotacije. Obe sili skupaj sestavljata silo teže. Sila teže  $F_g$  je definirana kot

$$F_g = m g_{\text{lokal}} \quad (6.2)$$

kjer je  $m$  masa telesa,  $g_{\text{lokal}}$  pa gravitacijski pospešek na kraju merjenja. Ta formula je tudi osnova za primerjavo mas s tehtnicami.

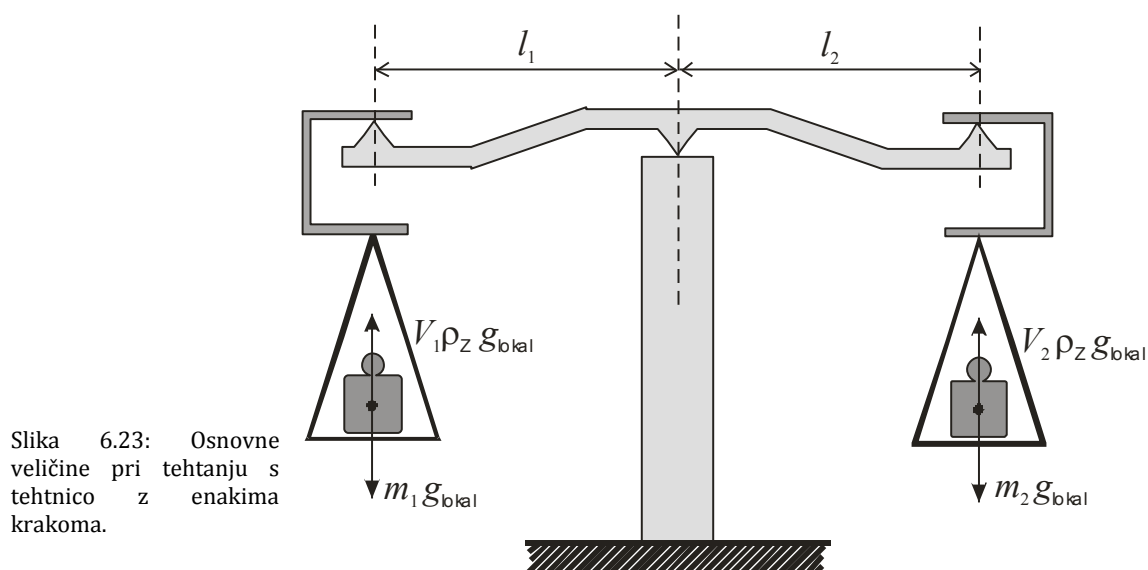
### Tehtnice

Za meritev mase potrebujemo referenčni etalon (prakilogram K), merilni inštrument (tehtnica) in primerno merilno metodo. Tehtnice uporabljamo v postopku primerjave mas več teles. Masi dveh teles enačimo, ko imata enaki sili zaradi teže pri istih gravitacijskih pospeških, to je če sta merjeni na istem kraju. Primerjava mas teoretično poteka v brezračnem prostoru. Običajno pa v praksi primerjave potekajo v zraku, zato moramo primerjati vsote sil zaradi gravitacije in sil vzgona.



Tabela 6.6: Tabela različnih tipov tehtnic z njihovimi standardnimi odkloni [5]. Danes najbolj točni tehtnici sta posebna prototipna precizijska tehtnica, ki jo v BIPM uporabljajo za primerjave najvišjih točnosti pri masi 1 kg, z relativnim standardnim odklonom, ocenjenim na približno  $10^{-10}$ , in tehtnica za mase do 50 kg z relativnim standardnim odklonom  $<10^{-8}$ , ki jo hranijo v nemškem PTB.

merilno območje	tip tehtnice	tipični standardni odklon tehtnice (v oklepaju so navedeni najmanjši relativni standardni odkloni)
< 4 g	elektromehanske ultramikro tehtnice	0,2 $\mu\text{g}$ ( $5 \times 10^{-8}$ )
od 4 g do 50 g	mikrotehtnica	1,5 $\mu\text{g}$ ( $3 \times 10^{-8}$ )
od 50 g do 200 g	makrotehtnica	8 $\mu\text{g}$ ( $4 \times 10^{-8}$ )
od 200 g do 50 kg	komparatorska tehtnica	2 $\mu\text{g}$ - 10 $\mu\text{g}$ ( $2 \times 10^{-7}$ - $1 \times 10^{-10}$ )
od 50 kg do 500 kg	tehtnica s pomičnimi utežmi	100 mg ( $2 \times 10^{-7}$ )
od 500 kg do 5 t	gredna tehtnica	200 mg ( $2 \times 10^{-8}$ )
od 5 t do 100 t	tehtnica za vozila in železniške vagona	1 kg ( $10^{-5}$ )



Za tehtnico z enakima krakoma v ravnotežju velja

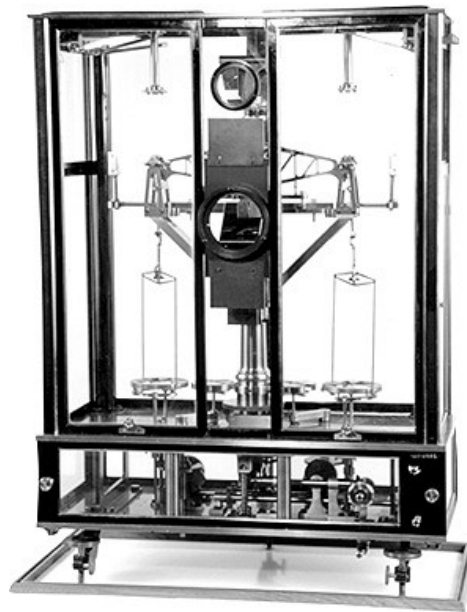
$$l_1 (m_1 g_{\text{lokal}} - V_1 \rho_z g_{\text{lokal}}) = l_2 (m_2 g_{\text{lokal}} - V_2 \rho_z g_{\text{lokal}}) \quad (6.3)$$

kjer sta  $m_1$  in  $m_2$  masi teles,  $V_1$  in  $V_2$  prostornini teles,  $\rho_1$  in  $\rho_2$  gostoti teles,  $l_1$  in  $l_2$  efektivni dolžini krakov tehtnice in  $\rho_z$  gostota zraka v trenutku merjenja.

Če velja, da so veličine  $l_1 = l_2$  in  $g_{\text{lokal}}$  konstantne in je  $\rho = m/V$ , lahko zapišemo

$$m_1 = m_2 \frac{1 - \frac{\rho_z}{\rho_2}}{1 - \frac{\rho_z}{\rho_1}} \quad (6.4)$$

Ugotovimo, da moramo v primeru, ko uporabljamo telesi s precejšnjo razliko v masi, ali kadar želimo narediti zelo točno meritev, upoštevati gostoti teles in zraka v trenutku primerjave. V splošnem vzgona zraka ni potrebno upoštevati pri meritvah z relativnimi merilnimi negotovostmi do  $10^{-4}$  [5].



Slika 6.24: Precizijska enakokraka tehtnica, ki so jo v ameriškem NIST uporabljali med leti 1945 in 1960 [7].

### Osnovna metoda tehtanja

Osnovna metoda tehtanja je substitucijska ali zamenjalna metoda. Etalon in tehtano telo sta pri enakokraki tehtnici zaporedoma primerjana s tretjo utežjo, oziroma z vgrajeno utežjo pri komparatorskih tehtnicah. Druga različica te metode je vrsta zaporednih tehtanj merjenega telesa in etalona.

## Problematika obstoječe definicije enote za maso s prototipom



Največji problem obstoječe definicije kilograma je, da se navezuje neposredno na fizikalno telo. Medtem ko sta meter ali sekunda definirana z naravnimi konstantami, kot je hitrost svetlobe ali kvantne lastnosti atomov, je uradni kilogram le telo iz zlitine platine in iridija, ki je skrbno varovano v trezorju v Parizu. Mednarodni prototip kilograma je torej dostopen samo na enem mestu na Zemlji, v BIPM. Lahko se poškoduje. Verjetno se njegova masa s časom spreminja. Časovno spreminjanje lastnosti K in njegovih kopij ni popolnoma poznano. Površina Pt-Ir zlitine ni popolnoma stabilna, saj se s časom na njej nalagajo nečistoče. Ta dodatna masa se deloma odpravi s posebnimi postopki čiščenja, vendar stopnja odstranjevanja nečistoč ni popolnoma jasno določena.

Obstoječa definicija kilograma je vedno bolj neustrezna osnovnemu vodilu sodobne metrologije, da naj bodo osnovne enote definirane tako, da je njihova realizacija mogoča v kateremkoli dobro opremljenem laboratoriju kjerkoli na svetu. Definicija in realizacija kilograma temeljita na fizičnem telesu (Pt-Ir valj v BIPM), zato enote mase ne moremo nikoli določiti bolj točno kot je točnost primerjave z mednarodnim prototipom K.

Lahko zaključimo, da je sedanja definicija kilograma kot lastnosti fizičnega objekta dolgoročno problematična zaradi omejene stabilnosti, realizacije in diseminacije. Preko enote za maso so definirane tudi osnovne SI enote mol, kandela in amper, tako da realizacija kilograma predstavlja tudi omejitev za realizacijo teh treh enot.

## Realizacija kilograma v prihodnosti

Osnovni cilj vsake realizacije kilograma je navezava enote za maso na točno določen fizikalni pojav oziroma fizikalno konstanto. Standardna negotovost prakilograma K je definirana kot 0. Relativna negotovost nacionalnih etalonov mase znaša tipično okoli  $1 \times 10^{-8}$  [1]. In k takim vrednostim z enakimi stabilnostmi realizacije morajo težiti vse nove metode nove realizacije kilograma z navezavo na stabilen naravni pojav ali fizikalno konstanto.

Trenutno poteka več različnih načinov in raziskav za novo realizacijo kilograma, ki pa so še v začetni preizkuševalni fazi in še ne dosegajo zadovoljive negotovosti. Glavna principa sta realizacija mase s pomočjo primerjave mehanske veličine z električno in štetje elementarnih delcev z znano maso (atomi).

- **Primerjava mehanske in električne moči** – ti poskusi temeljijo na navezavi kilograma na naravne konstante s pomočjo precizijske primerjave mehanske in električne enote za energijo. Na tej ideji temeljita poskusa kot sta vatna tehtnica in magnetno lebdenje.
- **Štetje elementarnih delcev** – pri teh poskusih gre za navezavo enote mase na maso atoma oziroma na maso elektrona ali protona. Kilogram bi bil na ta način definiran kot točno določeno število delcev. Posledično je seveda

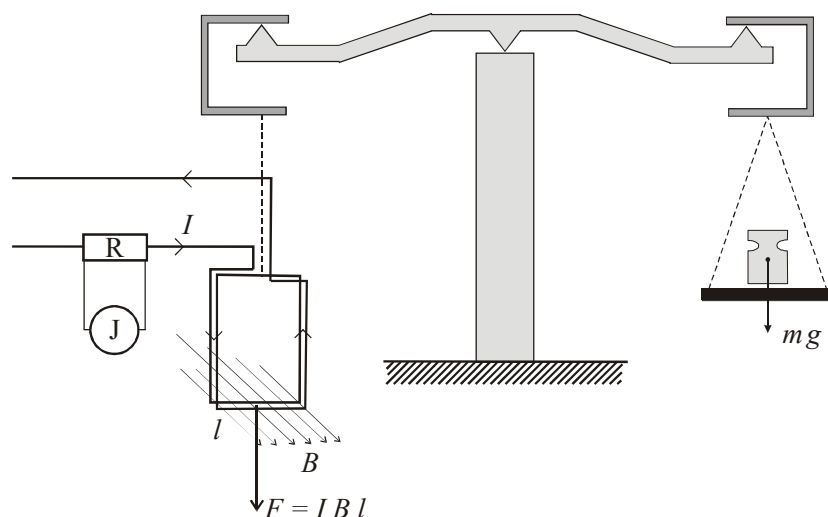
potrebno z zadostno točnostjo poznati maso delcev in z veliko točnostjo znati šteti število delcev. Na teh idejah temeljita dva poskusa realizacije kilograma – Avogadrov projekt in štetje ionov.

- **Primerjava drugih mehanskih in električnih veličin** – eden od tipičnih poskusov je napetostna tehtnica, ki primerja elektrostatično silo med dvema ploščama kondenzatorja z gravitacijsko silo uteži.

Glede velikosti pričakovane relativne negotovosti realizacije kilograma se morebitni novi definiciji kilograma najbolj približujejo poskusi z vatno tehtnico. Z znižanjem negotovosti pod  $10^{-8}$  bi bila možna sledljivost enote za maso na naravne konstante. V prvi fazi bi vatne tehtnice lahko uporabljali za opazovanje časovne stabilnosti obstoječih etalonov za maso. Kasneje, z izpopolnjeno metodologijo in tehnologijo vatne tehtnice bi bila realizacija možna v različnih meroslovnih institucijah po svetu. Tako bi bila tudi osnovna enota mase definirana, realizirana in diseminirana v smislu sodobnega SI sistema.

## Vatna tehtnica

Realizacija kilograma z vatno tehtnico temelji na precizni primerjavi mehanskega in električnega vata. Najbolj znani poskus z vatno tehtnico, imenovan tudi Eksperiment premikajoče tuljave, je objavil B. Kibble iz britanskega inštituta NPL leta 1976. Vatna tehtnica je v osnovi tokovna tehtnica, ki je uporabljena tudi za realizacijo ampera. Danes se poleg NPL z vatno tehtnico ukvarjajo tudi v primarnih laboratorijih, kot je ameriški NIST ali švicarski METAS.



Slika 6.25: Prvi del poskusa z vatno tehtnico.

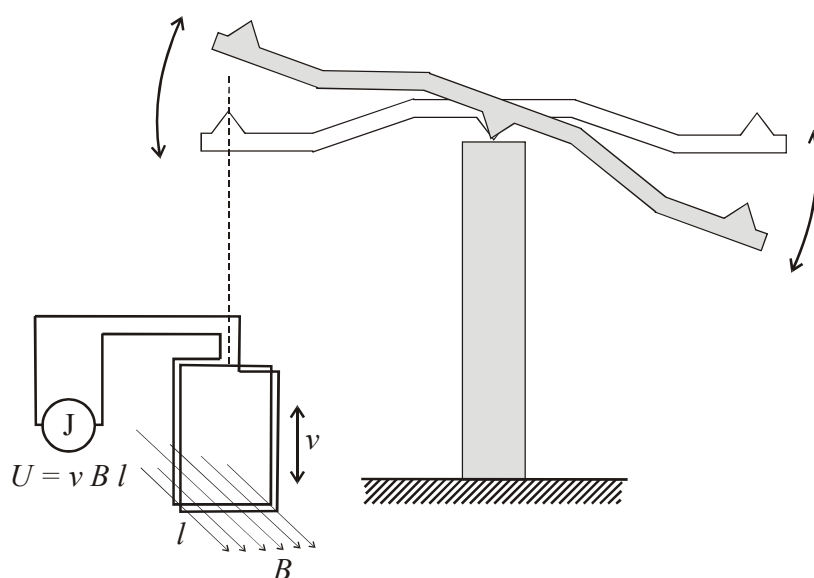


Poskus je sestavljen iz dveh zaporednih delov. V prvem delu s pomočjo precizne tehtnice s spreminjanjem toka  $I$  uravnatežimo gravitacijsko silo merjene uteži  $mg$  in magnetno silo  $F$  na vodnik dolžine  $l$ , ki je v homogenem magnetnem polju  $B$ . Ravnotežna enačba je

$$I B l = m g \quad (6.5)$$

kjer je  $g$  gravitacijski pospešek.

V drugem delu poskusa tuljavo z enakomerno hitrostjo  $v$  premikamo v pravokotnem homogenem magnetnem polju  $B$  in merimo napetost  $U$ , ki se inducira v tuljavi.



Slika 6.26: Drugi del poskusa z vatno tehtnico.

Zapišemo

$$U = v B l \quad (6.6)$$

S kombinacijo obeh delov poskusa lahko sestavimo enačbo

$$U I = m g v \quad (6.7)$$

iz katere lahko opazimo, da ni nobene odvisnosti od geometrijskih razmer ali gostote magnetnega pretoka.

Električno moč določimo s pomočjo Josephsonovega efekta in kvantnega Hallovega pojava, kot najtočnejšima metodama za merjenje napetosti in upornosti.

$$P = U I = C f_j^2 h, \quad (6.8)$$

kjer je  $f_j$  Josephsonova frekvenca,  $C$  konstanta,  $h$  pa Planckova konstanta.

Z izenačenjem mehanske in električne moči dobimo končno enačbo za določevanje mase uteži

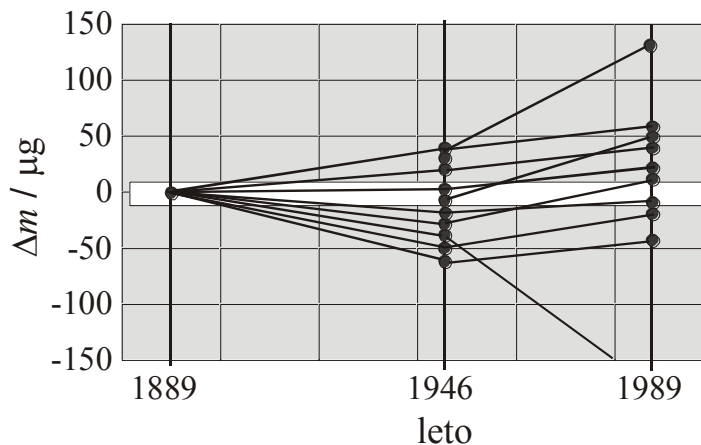
$$m = \frac{UI}{g v} \quad \text{oziroma} \quad m = C f_J^2 \frac{1}{g v} h.$$

Gravitacijski pospešek  $g$ , ki je krajevno in časovno odvisen, danes lahko izmerimo z relativno negotovostjo manjšo od  $10^{-8}$ . Hitrost premikajoče tuljave  $v$  lahko izmerimo z laserskim interferometrom. Konstanto  $C$  lahko določimo s pomočjo Josephsonovega in kvantnega Hall pojava (negotovosti Josephsonove in von Klitzingove konstante  $3,9 \times 10^{-8}$  in  $3,7 \times 10^{-9}$ ) in Planckove konstante (negotovost  $7,8 \times 10^{-8}$ ) je mogoča popolna navezava mase na naravne konstante [2].



Slika 6.27: Watna tehtnica v britanskem NPL.

Dosedaj najtočnejši poskus je bil objavljen v NPL z negotovostjo  $1,5 \times 10^{-7}$  [3], vendar je poskus z watno tehtnico najbolj obetaven od vseh ostalih poskusov realizacije kilograma, saj je ocenjeno, da bo mogoče negotovost z izboljšanimi metodami in uporabljeno tehniko zmanjšati pod  $1 \times 10^{-8}$ .



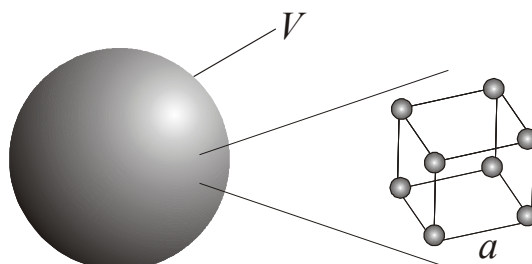
Slika 6.28: Povprečni odmik mas nacionalnih etalonov od mase K. Z belo je označena ciljna negotovost watne tehtnice [8].

## Avogadrov projekt

Avogadrov projekt je mednarodni projekt realizacije kilograma z navezavo na atomsko maso. Glavna aktivnost je določitev fiksnega števila atomov določene snovi.

Posebno ugodna izbira atoma je silicij s svojo izredno pravilno kristalno strukturo in dejstvom, da je mogoče vzgojiti velike silicijeve monokristale v zelo čisti obliki. Kristalna struktura je sestavljena iz kubičnih elementov, ki so sestavljeni iz 8 silicijevih atomov in imajo stranico dolžine  $a$ .

Slika 6.29: Silicijeva krogla in osnovni parametri za določanje njene mase.



Uporabljena je silicijeva krogla mase  $m$  in premera okoli 10 cm, z maso približno 1 kg. Danes je z interferometričnimi metodami mogoče doseči tako pravilno obliko krogle, da se naključni premeri 10 cm krogle razlikujejo le za okoli 10 nm [3].

Masa  $m$  je produkt mase enega silicijevega atoma s številom vseh silicijevih atomov v krogli

$$m = m_{Si} n_{Si} \quad (6.9)$$

$$n_{Si} = 8 \frac{V}{a^3} \quad (6.10)$$

$$m = 8 \frac{M_{Si} V}{N_A a^3}, \quad (6.11)$$

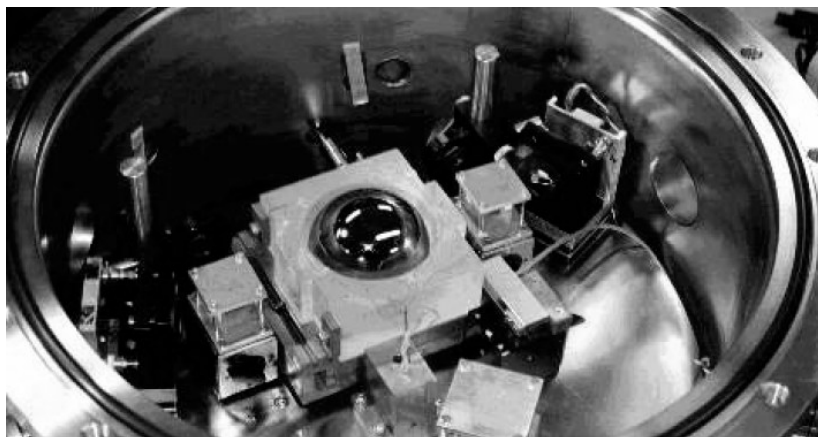
kjer je  $M_{Si}$  molarna masa izotopa silicija, ki jo izmerimo z masno spektrometrijo in jo danes lahko izmerimo z od vseh elementov v periodnem sistemu najnižjo negotovostjo, manjšo od  $1 \times 10^{-8}$ ,  $N_A$  je Avogadrovo število, definirano s negotovostjo  $7,9 \times 10^{-8}$ ,  $V$  pa prostornina silicijeve krogle.  $V$  lahko določimo z optično interferometrijo, tako da večkrat izmerimo premer krogle, določimo povprečni premer ter izračunamo volumen. Dosežene negotovosti so okoli  $5 \times 10^{-8}$ . Z rentgensko interferometrijo lahko izmerimo stranico kubičnega elementa osmih silicijevih atomov  $a$  z negotovostjo manjšo od  $1 \times 10^{-7}$  [3].



Silicijeva krogla je tako gladko spolirana, da se s prostim očesom niti ne opazi, če se vrti na mestu. Celo lomljenje svetlobe na minimalnih neravninah je neopazno. Če bi silicijevo kroglo povečali na velikost Zemlje, bi bile posamezne neravnine nižje od 5 m.

1 mol silicija bi imel obliko kvadra s približno  $3 \times 4 \times 1,5$  cm dolgimi stranicami.

Slika 6.30: Merjenje premera silicijeve kroglice z lasersko interferometrijo. Premer kroglice se lahko določi z relativno negotovostjo  $10^{-7}$  [9].



Največji problem te realizacije kilograma so nepravilnosti v strukturi kristala in obloge silicijevih oksidov, ki se naberejo na površju kroglice in so nehomogeno razporejene in časovno nestabilne.

Skupna dosežena negotovost realizacije kilograma s tem principom je  $2 \times 10^{-7}$  in še ne zadostuje za novo definicijo enote za maso [4].

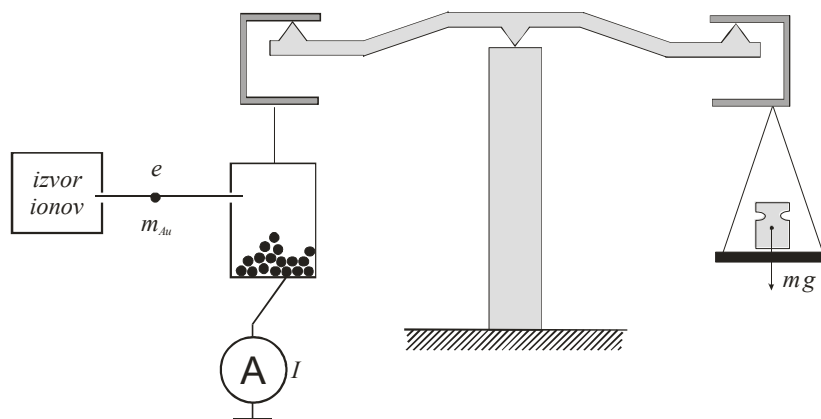
## Štetje ionov

Projekt realizacije kilograma s štetjem ionov temelji na principu kopičenja ionov zlata. Etalon mase  $m$  se s pomočjo precizne tehtnice primerja z maso določenega števila ionov zlata, ki se nakopičijo v času  $t$ .

Med nabiranjem ionov teče električni tok  $I$ , ki je proporcionalen številu nakopičenih ionov. Tok lahko z veliko točnostjo izmerimo z merjenjem padca napetosti na kvantnem Hallovem uporju s pomočjo Josephsonovega efekta. Velja

$$I = C e f_J, \quad (6.12)$$

kjer je  $e$  naboj iona zlata,  $f_J$  Josephsonova frekvenca,  $C$  pa konstanta.



Slika 6.31: Štetje ionov.

Ko je tehtnica v ravnovesju, velja, da je merjena masa enaka masi nakopičenih ionov. Maso nakopičenih ionov izračunamo s produktom molarne mase zlata  $m_{Au}$  in številom ionov. Število ionov lahko določimo s pomočjo celotnega pretečenega naboja ionov  $Q$

$$Q = \int_0^t I(t) dt, \quad (6.13)$$

ki ga delimo z nabojem posameznega iona  $e$ .

$$m = m_{Au} \frac{Q}{e} \quad (6.14)$$

Enačbo lahko poenostavimo, če vstavimo enačbo za merjenje toka ionov. Velja

$$m = m_{Au} k \int_0^t f_J(t) dt. \quad (6.15)$$

Problematika te metode ni točno merjenje toka ionov, ampak predvsem kontrolirano proizvodnjanje in kopičenje ionov. Izvor ionov mora proizvodjati zelo visok tok ionov zlata z zanemarljivimi dodatki nečistoč. Metoda je tudi časovno dolgotrajna, saj je za nakopičenje potrebnih 10 g zlata potrebno 6 dni ionskega toka 10 mA. Problematično je tudi zanesljivo akumuliranje nakopičenih ionov, brez izgub posameznih ionov.

V nemškem PTB je poskus še v fazi izdelave, zato še ni uradno objavljenih rezultatov merilne negotovosti realizacije kilograma po tej metodi, ocenjena pa je na manj kot  $1 \times 10^{-8}$  [1].

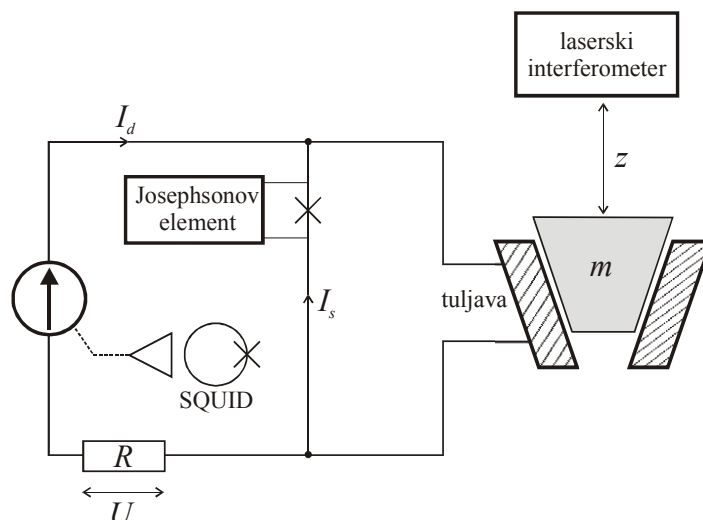
## Magnetno lebdenje superprevodnika

Poskus realizacije kilograma z magnetnim lebdenjem je še ena metoda, ki izkorišča izenačevanje mehanske in električne moči. Osnova poskusa so lastnosti superprevodnikov.

Merjena masa je iz superprevodnega materiala. V magnetnem polju tuljave jo lahko uravnovesimo da lebdi. Če je uporabljena tuljava prav tako iz superprevodnih materialov, velja, da je tok, potreben za napajanje tuljave, proporcionalen bremenu lebdeče mase.

S to metodo se ukvarjata japonski NRLM in ruski Mendeleev metrološki institut.

Slika 6.32: Magnetno lebdenje superprevodnika.



Na sliki sta prikazani dve tokovni zanki. Tokovna zanka s tokom  $I_s$  je superprevodna in brez padca napetosti napaja superprevodno tuljavo. Tok  $I_s$  in z njim generirana gostota magnetnega pretoka v tuljavi sta tako velika, da omogočata stabilno lebdenje superprevodnega telesa z maso  $m$ . Položaj telesa izmerimo z laserskim interferometrom in označimo z  $z_L$ .

Za dovajanje potrebne energije skrbi zunanji tokovni vir, ki generira tok  $I_d$ . Tok  $I_d$  je z veliko točnostjo enak toku  $I_s$ . Za to poskrbi notranja regulacija toka s pomočjo SQUID detektorja. Napajalni tok  $I_d$  lahko izmerimo z merjenjem padca napetosti preko upora  $R$ .

V tokovni zanki  $I_s$  je dodan tudi Josephsonov element, ki je obsevan s frekvenco  $f_J$  in lahko zavzame napetostni stanji 0 in  $\pm 1$ . V stanju +1 je Josephsonova napetost enaka

$$U_J = f_J \frac{h}{2e} = f_J \Phi_0, \quad (6.16)$$

kjer je  $\Phi_0$  kvant magnetne gostote. Če želimo v času  $t$  ohraniti isto napetostno stanje, se mora magnetni pretok tuljave spremeniti iz  $\Phi_L$  na  $\Phi_H$ , oziroma za  $\Delta\Phi_0 = f_J t \Phi_0$ . Tok v obeh zankah se mora povečati iz  $I_L$  na  $I_H$ , zato se gostota magnetnega pretoka v tuljavi dvigne ter povzroči spremembo položaja lebdečega telesa iz  $z_L$  na  $z_H$ .

Ob predpostavki, da se med časom  $t$  vložena električna energija popolnoma pretvori v magnetno energijo tuljave in potencialno energijo telesa z maso  $m$ , velja

$$\int_L^H U_J I(t) dt = \frac{1}{2} (\Phi_H I_H - \Phi_L I_L) + (z_H - z_L) mg. \quad (6.17)$$

Gravitacijski pospešek  $g$  in kvant magnetnega pretoka  $\Phi$  sta naravni konstanti, merjenje dolžine pa je sledljivo na svetlobno hitrost  $c_0$ . Glavna ideja realizacije kilograma z magnetnim lebdenjem je, da bi prišli do realizacije mase  $m$ , ki bi temeljila

samo na naravnih konstantah, če bi merili električni tok s pomočjo kvantnega Hallovega pojava in Josephsonove napetosti.

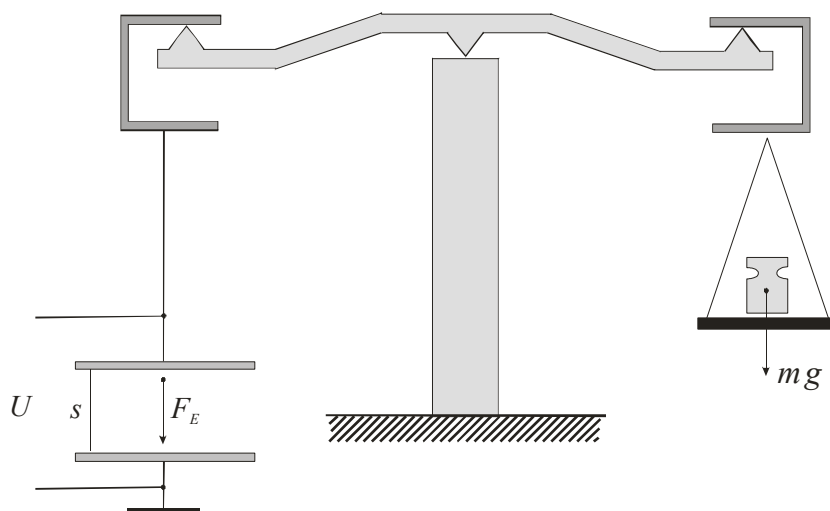
Najboljša objavljena relativna negotovost tega poskusa znaša trenutno nekaj pod  $10^{-6}$  [3].

### Meissnerjev pojav

Meissnerjev pojav je lebdenje magneta nad ohlajenim superprevodnikom. Če superprevodnik ohladimo pod njegovo kritično temperaturo in ga postavimo v magnetno polje, gostotnice magnetnega polja ne prodrejo več v superprevodnik. Magnet inducira tok v superprevodniku, ki povzroči nasprotno odbojno silo in povzroči, da se oba materiala odbijata. Če je odbojna sila večja od gravitacijske sile magneta, se pojav izrazi z lebdenjem superprevodnika nad magnetom. Pojav je možen le dokler magnetna poljska jakost magneta ne preseže kritične vrednosti superprevodnika. Če se to zgodi, material izgubi superprevodne lastnosti.

## Napetostna tehtnica

Po tej metodi se primerja elektrostatična sila, ki nastane pri priključitvi napetosti med ploščama kondenzatorja, z gravitacijsko silo uteži. Kapaciteto kondenzatorja lahko z veliko točnostjo izmerimo z impedančnimi mostički s pomočjo kvantnega Hallovega upora. Za merjenje napetosti se zopet poslužujemo Josephsonovega pojava kot reference. Napetostna tehtnica je bila v preteklosti izdelana za realizacijo enote električne napetosti volt.



Slika 6.33: Napetostna tehtnica.

Osnovni princip delovanja je uravnoteženje gravitacijske sile uteži z maso  $m$  in elektrostatične sile  $F_E$  kondenzatorja s kapacitivnostjo  $C$  in razmakom med ploščama  $s$ . Sili uravnotežimo s spreminjanjem napetosti  $U$  na kondenzatorju.

$$mg = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{ds} \quad (6.18)$$

Napetost  $U$ , ki ima tipične vrednosti 10 kV, določimo s primerjavo z napetostjo Josephsonovega člana s pomočjo napetostnega delilnika. Spremembo kapacitivnosti glede na spremembo razmika med ploščama kondenzatorja je mogoče izmeriti s pomočjo

impedančnega mostička z vključenim kvantnim Hallovim uporom.

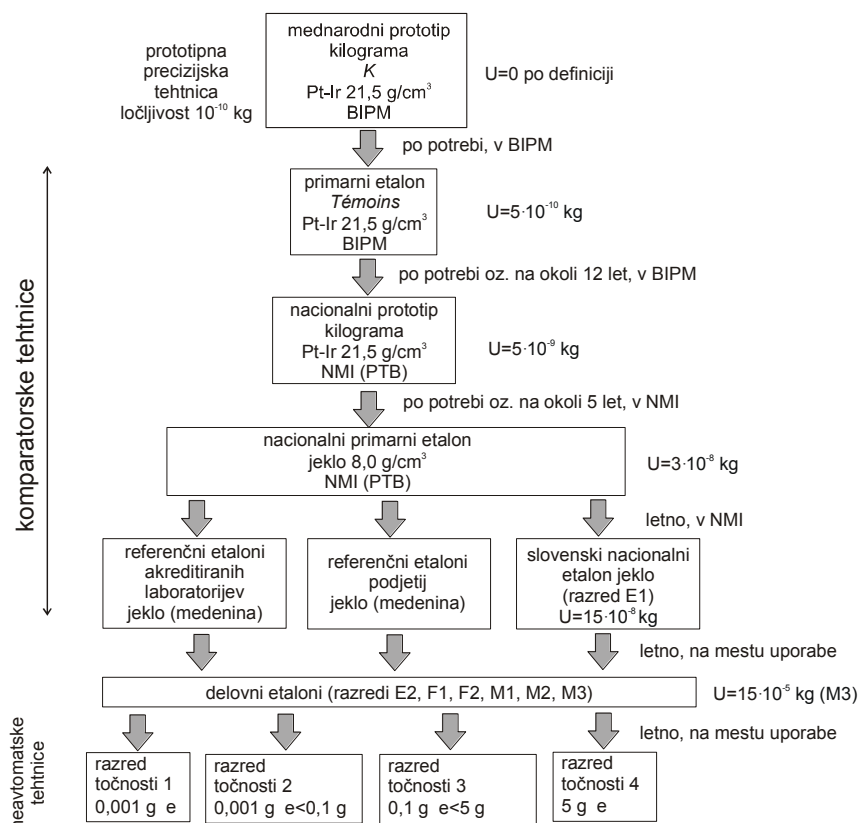
Poglavitni problemi pri realizaciji kilograma na tem principu je šibkost elektrostatične sile, kar pomeni, da moramo uporabljati zelo visoke napetosti in majhne mase. Danes ta princip preučujejo le še na Univerzi v Zagrebu. Dosegajo relativne negotovosti  $2 \times 10^{-7}$ , vendar se ocenjuje, da nadaljnje izboljšave poskusa niso več možne.

## Diseminacija kilograma

Problematična diseminacija enote za maso je ena največjih slabosti, ki izhaja iz obstoječe definicije SI kilograma. Vsi etaloni mase so sledljivi na eno samo telo – na prakilogram K, ki je shranjen v Parizu.

Diseminacija poteka s primerjavo med etaloni na različnih nivojih metrološke piramide. Negotovosti etalonov se ugotavljajo s pomočjo precizijskih tehtnic. Posebna prototipna precizijska tehtnica, ki jo v BIPM uporabljajo za primerjave najvišjih točnosti, ima danes najvišjo relativno občutljivost ocenjeno na približno  $10^{-10}$  pri masi 1 kg [5]. Tehtnica z najvišjo občutljivostjo za mase do 50 kg je postavljena v nemškem PTB in doseže občutljivost manjšo od  $1 \times 10^{-8}$ .

Slika 6.34: Slika prikazuje diseminacijo enote za maso s pripadajočimi časovnimi intervali ponovnih kalibracij etalonov (NMI – nacionalni metrološki institut).





**Vplivne veličine  
in negotovost pri  
meritvah mase**

Na merilno negotovost vplivajo predvsem:

- časovna stabilnost masnih etalonov
- lastnosti tehtnice (so odvisne od zgradbe, principa delovanja, točnosti izdelave, izdelave, izvajanja meritev, občutljivosti, izkušenj operatorja, dodatnih naprav (sistem za avtomatsko zamenjavo uteži). Lastnosti so opisane s parametrom standardni odklon).
- podvrženost postopka tehtanja spremembam okolja (zračni tlak, temperatura, relativna vlaga zraka, nehomogenost gravitacijskega polja).
- korekcija zračnega vzgona (zavzema postopke določevanja prostornine in gostote telesa in gostote zraka).

**Literatura poglavja**

- [1] <http://www.ptb.de/en/org/1/11/111/>
- [2] D. Kestenbaum, Recipe for a Kilogram, Science, Volume 280, Number 5365, 823 - 824, The American Association for the Advancement of Science, 8. maj 1998
- [3] B. Jeckelmann, W. Beer, Hat das Urkilogramm ausgedient?, <ftp://www.metas.ch/pdf/Labors/research/wattwage.pdf>
- [4] V. Kose, B. R. L. Siebert, W. Wöger, General principles for the definition of the base units in the SI, Metrologia 40 (2003) 146-153
- [5] J. Bortfeld, B. Kramer, Units and Fundamental Constants in Physics and Chemistry, Subvolume A: Units in Physics and Chemistry, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1991
- [6] R. Davis, Mass Metrology, BIPM Summer School, 2003
- [7] <http://museum.nist.gov>
- [8] G. Girard, International Report: The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988-1992), Metrologia 31 (1994) 317-336
- [9] G. Mana, The Avogadro constant, BIPM Metrology Summer School 2003

## Električni tok

**Definicija enote za električni tok** *Amper (A) je konstantni enosmerni električni tok, ki v vakuumu pri prehodu skozi dva ravna, en meter oddaljena, neskončno dolga, vzporedna vodnika z zanemarljivo majhnim krožnim prerezom, povzroča silo  $2 \times 10^{-7}$  N/m.*

Enota je bila določena na 9. zasedanju CPIM leta 1948. Z definicijo je enota električnega toka vezana na mehanske enote (meter, kilogram in sekunda), istočasno pa je bila fiksirana vrednost permeabilnosti v vakuumu  $\mu_0$ , ki je tako definirana kot točno  $4\pi \times 10^{-7}$  N/A<sup>2</sup>.

### Zakaj potrebujemo točna merjenja električnega toka?

Potreba po morjenju električnih veličin se v sodobnem življenju pojavlja vedno pogosteje. Poleg enega najočitnejših področij uporabe merjenja električnega toka – štetja električne energije, ki jo uporabnikom zaračunavajo elektrodistribucijska podjetja, je merjenje toka in posledično tudi ostalih električnih veličin ena izmed pomembnejših dejavnosti v današnji družbi. V vsakodnevnem življenju moramo poznati napajalno napetost za našo mikrovalovno pečico, našo televizijo in polnilec za mobilni telefon. Pozimi nas zanima kapaciteta akumulatorja našega starega vozila. V nas samih je električni tok tudi osnova fiziološkega dogajanja v našem živčnem sistemu. Na še nižjem nivoju je od potencialne razlike med medceličnino in notranjostjo celice odvisen prehod hranilnih in drugih snovi preko celične membrane, in s tem komunikacija organizma z okolico.

Tabela 6.7: Spekter uporabe merjenja električnega toka ima velik razpon.

30 000 A	$3 \times 10^4$ A	tipični tok strele
10 A	10 A	grelnik vode
1 A	1 A	osebni računalnik
0,5 A	$5 \times 10^{-1}$ A	100 W žarnica
0,2 A	$2 \times 10^{-1}$ A	smrtno nevaren tok
0,07 A	$7 \times 10^{-2}$ A	električna jegulja
0,000 000 001 A	$1 \times 10^{-9}$ A	tok v živčnem sistemu
0,000 000 000 000 000 000 16 A	$1,6 \times 10^{-19}$ A	tok, ki ustreza elektronom, ki na vsako sekundo preletijo določeno točko

**Zgodovina ampera** Že 600 let p.n.št. je Tales ugotovil, da je mogoče z drgnjenjem jantarja s svilo privlačiti perje ali slamo.

Okoli leta 1600 je William Gilbert, znanstvenik in zdravnik angleške kraljice Elizabete I, iz grške besede za jantar – elektroni izpeljal besedo elektrika, opisal Zemljino magnetno polje in ugotovil, da obstaja zveza med elektriko in magnetizmom.

Leta 1745 je ameriški politik in znanstvenik Benjamin Franklin s

Leta 1705 je Francis Hauksbee nalil živo srebro v stekleno kroglo, izsesal zrak in kroglo vrtel. Če je to počel v temi in potem kroglo drgnil z rokami, je svetila. Izumil je neonsko žarnico.

poskusi s papirnatimi zmaji s kovinsko konico med nevihtami pokazal električni izvor strele. Predvideval je tudi dve obliki naboja – pozitivnega in negativnega.

Luigi Galvani je leta 1780 ugotovil, da žabji kraki mrtve žabe na krožniku trznejo, če se jih dotakne s konico nože. Volta je kasneje pokazal, da je vzrok v elektriki, ki nastane zaradi vlažnega tkiva med dvema kovinama – krožnikom in noževo konico.

Italijanski znanstvenik Alessandro Volta je leta 1800 proizvedel konstantni električni tok, tako da je v solno raztopino potopil srebrne in cinkove ploščice. Njegova naprava, ki jo je po Galvaniju poimenoval galvanski stolp, je bila prva moderna baterija.

V letu 1820 je Danec Hans Christian Oersted ugotovil, da električni tok, ki teče preko žice, vpliva na iglo kompasa v bližini.

Leta 1826 je Andre-Marie Ampère opisal povezavo med elektriko in magnetizmom.

Leta 1827 je nemški učitelj Georg Ohm kot prvi objavil popolno matematično teorijo elektrike.

Leta 1831 pa je Michael Faraday opisal elektromagnetno indukcijo, ko je uspel s premikanjem magneta skozi svitek žice spremeniti magnetizem v elektriko. To je bila tudi osnova za razvoj električnih generatorjev in leta 1881 prvo javno električno oskrbo za cestno razsvetljavo v Godalmingu v Angliji na vodni pogon bližnjega mlina.

Leta 1896 je Nikola Tesla zgradil hidrolektrični generator električne energije na Niagarskih slapovih, s katerim je z elektriko oskrboval New York.

Leta 1901 je Giovanni Giorgi predlagal razširitev SI sistema z dodatkom električne veličine (upornost) k osnovnim enotam.

V letu 1905 je Albert Einstein pokazal uporabnost svetlobne energije za proizvodnjo elektrike.



Slika 6.35: Nikola Tesla.

## Nikola Tesla (1856-1943)

Srbski znanstvenik iz hrvaške Like, sin pravoslavnega duhovnika in neverjetno inovativne matere, študent graške univerze, velik praktik in elektrotehniški genij, ki je s svojim inženirskim delom v Združenih državah Amerike dobesedno podaril človeštvu luč (njegove prve hidroelektrarne na Niagarskih slapovih so oskrbovale New York z elektriko).

V osebnem življenju je bil samotar in ekscentrik, ki je znal navdušiti gledalce z različnimi bliskajočimi eksperimenti, v katerih je ponavadi s svojimi lasmi in telesom sodeloval sam. Ko je poskus enkrat pokazal, ga iz principa ni hotel nikoli več ponoviti, ampak si je zamislil novega.

Bil je obdarjen s fotografskim spominom in za seboj ni pustil veliko zapiskov, saj je vse svoje zapletene električne stroje hranil v glavi.

V laboratoriju je delal 20 ur na dan. Bil je slab ekonomist in je kljub ogromnemu napredku, ki so ga njegovi izumi prinesli človeštvu, umrl reven in pozabljen.

Že kot študent je nasprotoval tedanjim razlagam o električnem toku kot enosmerni veličini in v »vojni tokov« porazil velikega Thomasa Edisona, izumitelja žarnice in zagovornika enosmernege toka.

Leta 1897 je Guglielmo Marconi kot uradno prvi s svojo napravo, ki je bila sumljivo podobna Teslovim zamislim, poslal radijsko sporočilo 20 milj daleč. Tesla je bil ogorčen, vendar se je Marconi zagovarjal, da ni poznal Teslovega dela, čeprav je bilo to že nekaj let prej objavljeno. Marconi, danes v javnosti znan kot izumitelj telegrafije, je za brezžično telegrafijo leta 1909 dobil Nobelovo nagrado.

Nikola Tesla je Nobelovo nagrado leta 1912 vnaprej zavrnil, češ da je prišla prepozno. Vrhovno sodišče ZDA je leta 1943 razsodilo, da je Nikola Tesla pravi oče brezžične telegrafije in radia. Tesla bi lahko dobil Nobelovo nagrado za kateregakoli izmed svojih odkritij na področju električnih strojev, visokofrekvenčne tehnike, telekomunikacij, začetkov radarja.

Njegovo skrivnostno življenje se je nadaljevalo tudi po njegovi smrti, ko je FBI zaplenil vse njegove zapiske in iskal zapiske o »žarkih smrti, ki so sposobni izbrisati cele vojske in komunicirati z drugimi planeti«.

Je edini znanstvenik slovanskega rodu, po katerem se imenuje enota veličine SI sistema (gostota magnetnega pretoka). Eden najzaslužnejših za sprejetje tega imena je svetovljanski profesor ljubljanske Fakultete za elektrotehniko Franc Avčin.

## Realizacija ampera

Že v besedilu definicije ampera najdemo pojme, kot so »v vakuumu«, »neskončno«, »zanemarljivo majhnim«, ki kažejo na to, da realizacija ne more biti izvedena neposredno na osnovi definicije.

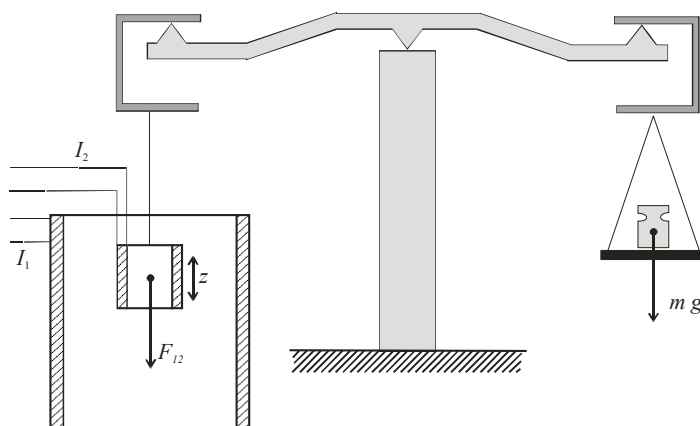
Praktična realizacija ampera v splošnem poteka na dva načina.

- Neposredne metode izkoriščajo delovanje elektrodinamičnih pretvornikov tok-sila – tokovnih (vatnih) tehtnic.
- Drugi način so realizacije, ki temeljijo na posrednih metodah, ki realizirajo enoto električnega toka preko električne napetosti in upornosti z osnovnimi fizikalnimi konstantami. Klasična realizacija ohma poteka s Thompson-Lampardovim kondenzatorjem, katerega kapacitivnost je odvisna le od linearnega razmika med elektrodama. Realizacija volta poteka z metodo z napetostno tehtnico, ki izkorišča merjenje elektrostatične z mehansko silo. Obe metodi omogočata realizacijo ampera z relativno negotovostjo nekaj  $10^{-7}$ . Sodobne posredne metode realizacije, ki izkoriščajo kvantne pojave, imajo neprimerno boljšo stabilnost in obnovljivost. Primerne so za izvedbo v vsakem dobro opremljenem laboratoriju in se danes uporabljajo v vseh primarnih medlaboratorijskih primerjavah.

Definiciji volta in ohma, ki temeljita na kvantni realizaciji napetosti in upornosti, bi bili veliko primernejši in v skladu z modernim SI sistemom, ki skuša definirati fizikalne veličine z osnovnimi fizikalnimi konstantami. Vendar bi nadomestitev ampera v SI sistemu osnovnih enot z voltom ali ohmom izničila prednost obstoječe definicije, to je povezave mehanske moči z električno močjo, in hkrati potrditev zakona o ohranitvi energije ter spremenila status permeabilnosti  $\mu_0$ , ki ima danes dogovorjeno negotovost 0 in je osnova definicije ampera.

**Tokovna tehtnica** Tokovna ali vatna tehtnica je naprava, ki izkorišča princip izenačevanja mehanske in električne energije.

V prvem delu poskusa tuljavica z električnim tokom  $I_2$  visi v magnetnem polju večje tuljave, ki ga ustvarja tok  $I_1$ .



Slika 6.36: Shema tokovne tehtnice.

Elektrodinamično silo med obema tuljavama  $F_{12}$ , ki se pri tem generira, lahko zapišemo kot odvod magnetne energije od navpične komponente v osi tuljave.

$$F_{12} = \frac{\partial W_{12}}{\partial z} = I_1 I_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial z}, \quad (6.19)$$

kjer je  $M_{12}$  medsebojna induktivnost tuljav. Sila  $F_{12}$  je primerjana z gravitacijsko silo uteži  $mg$  na drugem koncu precizijske tehtnice in, ko je tehtnica v ravnotežju, velja

$$I_1 I_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial z} = m g. \quad (6.20)$$

V drugem delu poskusa se izmeri odvod medsebojne induktivnosti po osi tuljave z enakomernim premikanjem viseče tuljavice v magnetnem polju fiksne tuljave. Pri tem se v tuljavici inducira napetost  $U_i$ .

$$U_i = \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \frac{dz}{dt} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} v = v \frac{\partial (M_{12} I_1)}{\partial z} \quad (6.21)$$

$$U_i = v I_1 \frac{\partial M_{12}}{\partial z}$$

kjer je  $\Phi$  magnetni pretok v tuljavi,  $v$  pa hitrost premikanja tuljavice v magnetnem polju.

Po izenačitvi obeh sil tehtnice lahko definiramo tok, ki teče v tuljavico

$$I_2 = \frac{m g v}{U_i}. \quad (6.22)$$

Po tej metodi amper realizirajo v treh primarnih laboratorijih – v britanskem NPL, ameriškem NIST in v japonskem ETL. Najboljša relativna negotovost realizacije znaša  $7,7 \times 10^{-8}$  [4].

### Posredne metode realizacije ampera

Poleg neposrednih metod, kamor uvrščamo realizacijo ampera z vatnimi tehtnicami, poznamo tudi posredne metode realizacije ampera.

Pred odkritjem kvantnih pojavov je posredno merjenje električnega toka v splošnem potekalo na štiri načine. Negotovost štirih metod je povezana z osnovnimi fizikalnimi konstantami (giromagnetno razmerje protona  $\gamma_p$ , Faradayeva konstanta  $F$ , Avogadrovo število  $N_A$  in kvant magnetnega pretoka  $\Phi_0$ ).

Danes so osnova realizacije ampera kvantni pojavi.

Odkritje kvantnih pojavov Josephsonovega spoja in kvantnega Hallovega pojava je prineslo ogromen napredek v negotovosti realizacije enote električnega toka.

Odslej je amper namesto zahtevnega mehanskega poskusa realiziran preko električne napetosti in upornosti, ki ju lahko realiziramo z veliko točnostjo s pomočjo dveh kvantnih pojavov – Josephsonovega spoja in kvantnega Hallovega pojava.

### Električni kvantni pojavi

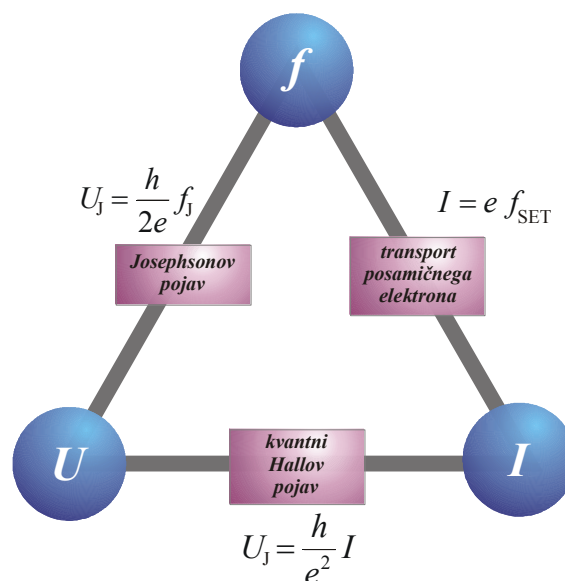
Z definiranjem ampera v okviru sistema SI je bila določena tudi definicija enot ostalih električnih veličin. Realizacije električnih enot potekajo z uporabo fizikalnih zakonov, ki opisujejo elektromagnetiko. Realizacije so izvedene s pomočjo napetostnih, tokovnih, vatnih tehtnic in izračunljivih kondenzatorjev, ki z velikimi točnostmi omogočajo realizacijo ampera, volta, farada in ohma. Realizacije so zelo drage in tehnično zahtevne ter jih lahko izvajajo le posamezne nacionalne metrološke institucije.

Z odkritjem kvantnih pojavov, kot je Josephsonov pojav in kasneje kvantni Hallov pojav, se je pojavila možnost za realizacijo električnega toka velikih točnosti, in to brez uporabe zahtevnih mehanskih poskusov. Obnovljivost teh referenčnih vrednosti je kmalu postala boljša od njihovih absolutnih realizacij. Za to je CIPM definiral standardno vrednost za Josephsonovo in von Klitzingovo konstanto. Tretji kvantni pojav, ki postaja vedno bolj zanimiv, je transport posameznega elektrona (SET – single electron tunneling). Gre za pojav, s katerim bi bilo mogoče realizirati kvantni tokovni etalon, ki bi temeljil na štetju posamičnih elektronov in bi hkrati predstavljal tudi realizacijo etalona za kapacitivnost.

$$I = e f \quad (6.23)$$

Trenutno raziskujejo dva načina realizacije SET. Eden od načinov je merjenje napetosti na ploščah kondenzatorja, ki je nabit z znanim številom elektronov. Drugi način pa je uporaba kriogenskega tokovnega primerjalnika (CCC – Cryogenic Current Comparator). CCC je naprava, ki meri razmerje dveh enosmernih tokov. Skupaj s SQUIDom (Superconducting Quantum Interference Device) kot ničnim indikatorjem in etalom kvantne Hallove upornosti je vključen v merilni mostiček, ki omogoča merjenje tokov do 100 A s pogreškom razmerja do  $1 \times 10^{-12}$  [2, 4].

Uporaba kvantnih pojavov je povzročila precejšnjo izboljšavo točnosti realizacije enot električnih veličin. Amper lahko z Josephsonovim spojem in kvantno Hallovo upornostjo realiziramo z negotovostmi okoli  $4 \times 10^{-8}$  [3].



Slika 6.37: Kvantni metrološki trikotnik.

V prihodnosti, ko bodo vsi trije členi metrološkega trikotnika raziskani, bo mogoče z dvema potrditi tretji pojav. Z osnovnim pravilom Ohmovega zakona bo eksperiment metrološkega trikotnika povezal razmerje Josephsonove mikrovalovne frekvence  $f_J$  in SET frekvence  $f_{SET}$  v obliki brezdimenzijskega parametra, ki bo opisoval številko Josephsonovega nivoja  $n$ , številko kvantnega Hallovega nivoja  $i$  in število elektronov na enoto časa. Ali enostavnije, padec napetosti na kvantni Hallovi upornosti  $R_H = R_K/i$ , ko bo preko nje tekel tok  $I = e f_{SET}$ , bomo lahko primerjali z Josephsonovo napetostjo  $U_J = n f_J / K_J$ . Trenutno je negotovost SET pojava okoli  $10^{-6}$  [7].

### Realizacija volta z Josephsonovim spojem

Leta 1962 je 22 letni Valižan Brian Josephson, študent univerze v Cambridgu, izpeljal enačbe za tok in napetost na spoju dveh superprevodnikov, ohlajenih na 4,2 K in ločenih z električnim izolatorjem. Eksperimentalno je bil njegov opis pojava potrjen naslednje leto. Josephson je leta 1973 dobil Nobelovo nagrado za fiziko.

Osnova pojava je Josephsonov spoj, ki ga sestavljata dve ločeni plasti superprevodnika. Ugotovljeno je bilo, da ima potencialna razlika  $U$  obeh plasti superprevodnika, ko je spoj obsevan z elektromagnetnim valovanjem visokih frekvenc  $f$ , diskretne vrednosti, ki so preko Josephsonove konstante  $K_J$  proporcionalne le frekvenci  $f$ .

$$U = \frac{h}{2e} f \quad (6.24)$$

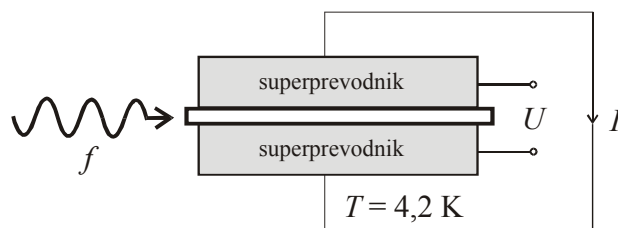
Josephsonova konstanta je v fizikalni teoriji navezana na osnovni naboj in Planckovo konstanto.

$$K_J = \frac{h}{2e} \quad (6.25)$$

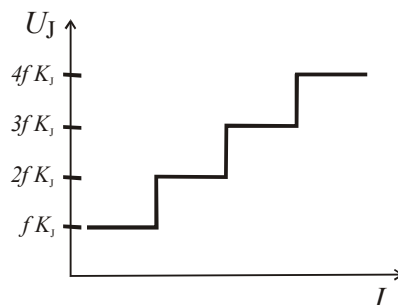
Na ta način je volt lahko realiziran z negotovostjo  $1 \times 10^{-8}$  [2]. Enačba predstavlja morda najtočnejše merjenje na svetu. Velja neodvisno od



uporabljenega materiala, temperature in gravitacije v razredu velikosti manj kot  $10^{-16}$ ! [8].



Slika 6.38: Josephsonov spoj in funkcijska odvisnost njegove upornosti  $U_J$ .



CIPM je leta 1988 izdala priporočila za vrednost Josephsonove konstante ( $K_J = 483597,898 \text{ GHz/V}$  z negotovostjo  $3,9 \times 10^{-8}$ ). CIPM je hkrati podala oceno, da se v predvidljivi prihodnosti ta konstanta ne bo spreminjala. Obnovljivost pojava je skoraj 100 krat večja kot negotovost realizacije konstante v SI sistemu, zato je CIPM v letu 1990 določila dogovorjena vrednost  $K_{J,90} = 483\,597,9 \text{ GHz/V}$  z negotovostjo 0 [1].

Potencialna razlika posameznega Josephsonovega spoja ima nizke vrednosti (pri  $f = 70 \text{ GHz}$ , nivoju = 2 je napetost spoja okoli  $3 \text{ mV}$ ), zato je potrebna mreža okoli 20000 zaporednih spojev, da dosežemo običajno referenčno napetost 10 voltov [4]. V nemškem PTB pri 73 GHz en spoj predstavlja okoli  $150 \mu\text{V}$  napetosti (podatek iz leta 2005).



Slika 6.39: Sistem naprav in instrumentov za izvedbo etalona napetosti z Josephsonovim spojem [6].

### Realizacija ohma s kvantnim

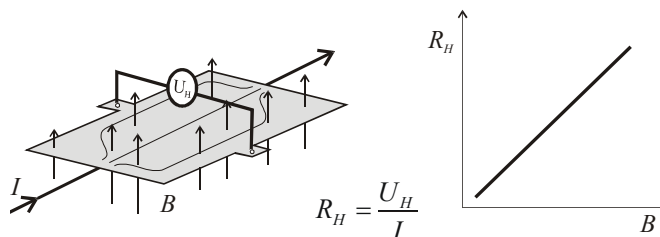
Kvantiziran Hallov efekt je bil prvič odkrit leta 1980. Objavili so ga K. von Klitzing, G. Dorda in M. Pepper. Ugotovili so, da je Hallova

## Hallovim pojavom

upornost, izmerjena v silicijevem MOSFET-u pri nizkih temperaturah (vrelišče helija) in v velikih magnetnih poljih (10 do 20 T), kvantizirana. Danes je bil pojav pokazan tudi pri drugih materialih, posebno zlitinah kot je galijev arzenid (GaAs). Von Klizing je za opis pojava prejel tudi Nobelovo nagrado za fiziko leta 1985.

### Klasični Hallov pojav

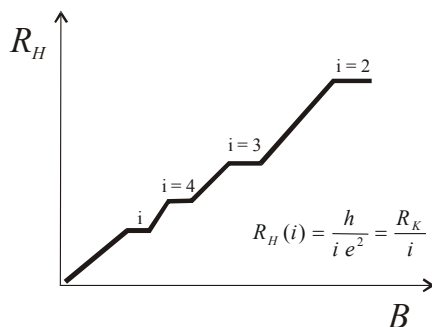
Pojav je odkril in prvi opisal E. H. Hall leta 1879. Magnetno polje  $B$ , ki prebada prevodnik, ustvari Hallovo napetost  $U_H$  pravokotno na smer magnetnega polja in smer toka.



Slika 6.40: Klasični Hallov pojav

### Kvantni Hallov pojav

V bližini temperature absolutne ničle, v močnem magnetnem polju superprevodnih magnetov (gostote okoli 14 T) in z elektroni, ki so se prisiljeni premikati v ravnini (Hallov element je ploščica), se Hallova upornost  $R_H$  spreminja stopničasto, diskretno.



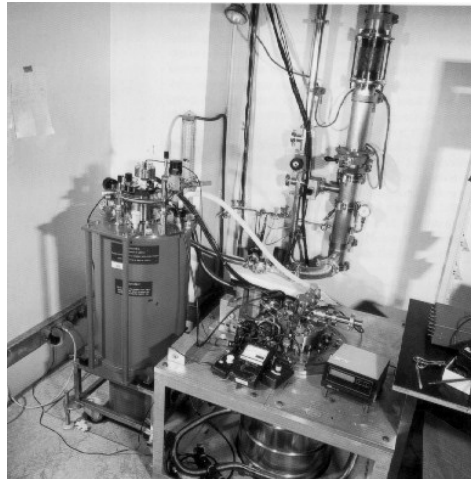
Slika 6.41: Kvantni Hallov pojav.

$R_H$  je kvantizirana, vrednosti na posameznih nivojih pa so neodvisne od magnetnega polja in geometrije Hallovega elementa. Ugotovljeno je bilo, da so kvantizirane vrednosti upornosti celoštevilčni večkratniki določene konstante. Ta konstanta je neposredno vezana na osnovni naboj in Planckovo konstanto. Imenovana je von Klitzingova konstanta  $R_K$ .

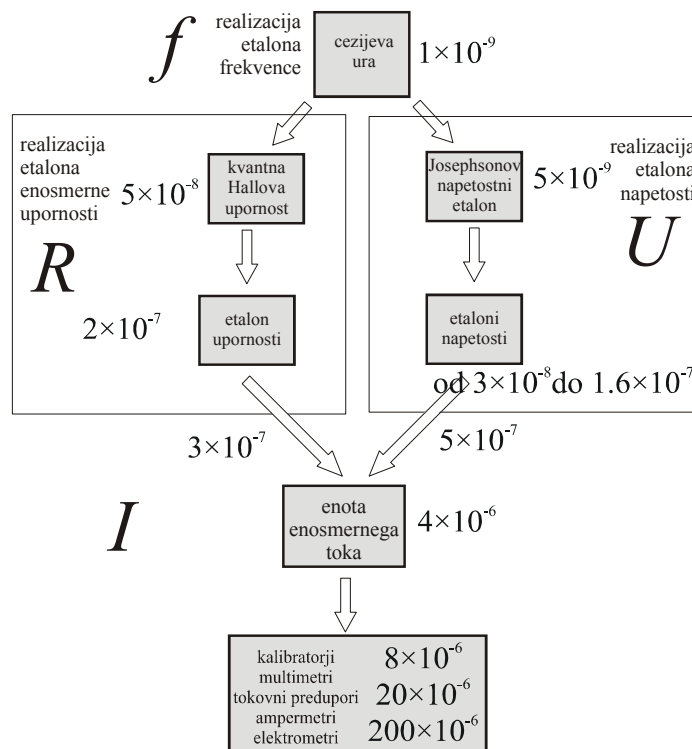
$$R_K = \frac{h}{e^2} \quad (6.26)$$

CIPM je leta 1988 izdala priporočila za von Klitzingove konstante  $R_K = 25812,807572 \Omega$  (negotovost  $3,7 \times 10^{-9}$ ) in hkrati podala oceno, da se v predvidljivi prihodnosti konstanta ne bo spreminjala. Obnovljivost pojava je skoraj 100 krat večja kot negotovost realizacije konstante v SI sistemu, zato je CIPM v letu 1990 določil dogovorjena vrednost  $R_{K-90} = 25812,807 \Omega$  z negotovostjo 0 [1].

Slika 6.42: Sistem naprav in inštrumentov za izvedbo etalona upornosti, ki temelji na kvantnem Hallovem pojavu [6].



**Diseminacija ampera**



Slika 6.43: Sledljivostna shema enosmernega električnega toka (vrednosti negotovosti veljajo za švedski NMI SP [5]).

Trenutno se za generiranje časovno stabilnega električnega toka in posledično za njegovo realizacijo uporabljata dve metodi. Prva metoda je vztrajnostna supertokovna metoda. Ta izkorišča izredno ločljivost SQUID naprave, ki preko magnetnega pretoka s pomočjo CCC zaznava razliko med tokom zelo stabilnega superotokovnega generatorja in zunanjega tokovnega vira. S pomočjo zaprtozančnega sistema je mogoče stabilizirati zunanji tokovni vir na stabilnosti, boljše od  $2 \times 10^{-9}/h$ , s temperaturnim koeficientom, manjšim od  $2 \times 10^{-11}/K$  [4].

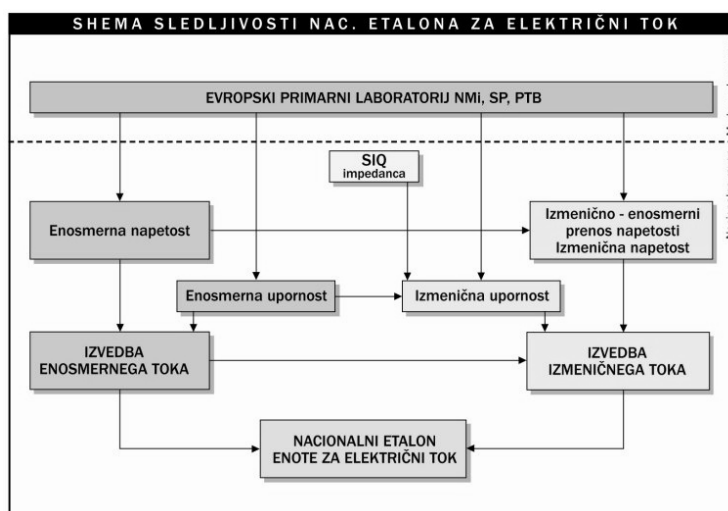
Druga metoda izkorišča fizikalni pojav jedrske magnetne resonance (NMR- Nuclear Magnetic Resonance), s pomočjo katerega je mogoče generirati zelo stabilna magnetna polja ( $<10^{-9}$ ). Ta metoda je uporabna za stabilizacijo velikih tokov do 100 A in ne potrebuje kriogenega ohlajevanja. Tokovni vir napaja elektromagnet, v katerem se ustvarja magnetno polje. NMR magnetometer to magnetno polje meri in povratno vpliva na tokovni vir in tako zagotovi zaprtozančno regulacijo toka (v temperaturnem ravnotežju so tokovi okoli 1 A lahko stabilizirani boljše od  $2 \times 10^{-7}/h$ ) [4].

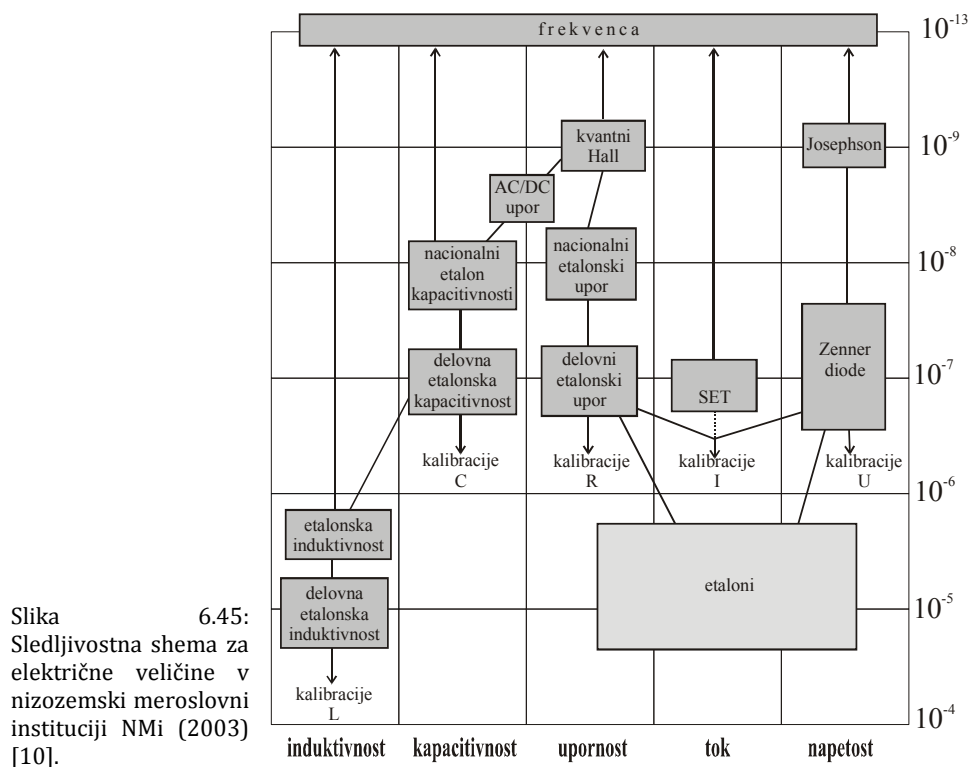
### Vplivne fizikalne veličine

Tipične fizikalne veličine, ki vplivajo na skupno točnost realizacije enote za električni tok [4].

- temperatura
- zračni tlak
- obremenitev etalonskih uporov
- časovne spremembe

Slika 6.44: Sledljivostna shema za električni tok v nosilcu nacionalnega etalona SIQ [9].





### Realizacija ampera v prihodnosti

Osnovne raziskave bodo potekale v smeri zaprtja kvantnega metrološkega trikotnika, to je nadaljnega preučevanja SET pojava. Zaprti trikotnik bi preko Ohmovega zakona omogočil definicijo in realizacijo električnega toka, napetosti in upornosti. Nadaljevanje razvoja kvantnih metod zajema tudi raziskave kvantnega Hallovega pojava z uporabo izmeničnega toka [2].

### Literatura poglavja

- [1] P. J. Mohr, B. N. Taylor, CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 1998, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 72, No. 2, pp. 351-495, 2000.
- [2] <http://www.npl.co.uk/electromagnetic/dclf/index.html>
- [3] [http://www.bipm.fr/enus/3\\_SI/si\\_fig.html](http://www.bipm.fr/enus/3_SI/si_fig.html), T.J Quinn, Base units of the Système international d'unités, their accuracy, dissemination and international traceability, *Metrologia*, 1995, 31, 515-527, D. Kind, T. J. Quinn, *Metrology: Quo Vadis?*, *Physics Today*, August 1998, 15-17.
- [4] J. Bortfeld, B. Kramer, Units and Fundamental Constants in Physics and Chemistry, Subvolume A: Units in Physics and Chemistry, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1991.
- [5] <http://www.sp.se/metrology/eng/mt.htm>
- [6] [http://www.bipm.fr/enus/5\\_Scientific/d\\_electricity/](http://www.bipm.fr/enus/5_Scientific/d_electricity/)
- [7] F. Piquemal, Quantum Metrological Triangle experiments, BIPM Summer School, 2003
- [8] J. Gallop, Quantum Electrical Standards, BIPM Summer School, 2003
- [9] <http://www.mirs.si>
- [10] <http://www.nmi.nl>

# Temperatura

## Definicija enote za temperaturo

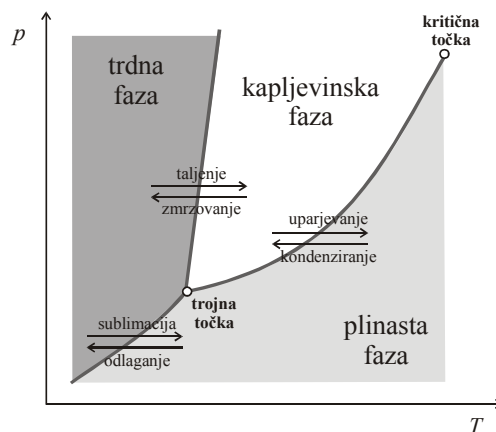
*Kelvin (K) je enota termodinamične temperature, ki je enaka 1/273,16 delu termodinamične temperature trojne točke vode.*

Enota je bila določena na 13. zasedanju CIPM leta 1967. Temperatura trojne točke v faznem diagramu stanj ustreza trojnemu stanju, v katerem pri določenem tlaku in temperaturi v ravnovesju nastopijo hkrati vsa tri agregatna stanja čiste snovi: pri vodi trdno (led), tekočinsko (voda) in plinsko (vodna para).

## Fazni diagram

Fazni diagram je grafični prikaz vpliva temperature in tlaka na agregatno stanje snovi v zaprtem prostoru. Sestavljen je iz treh delov, ki predstavljajo snov v plinasti, tekoči in trdni fazi. Prikazuje temperature in tlake, pri katerih snov prehaja iz ene faze v drugo.

Slika 6.46: Slika prikazuje fazni diagram snovi. Dodani so fizikalni pojavi med posameznimi fazami. Kritična točka snovi je največja temperatura in tlak, pri katerih kapljevinna in plin še lahko obstojata v ravnotežju. Nad kritično točko se molekule ne morejo več utekočiniti.

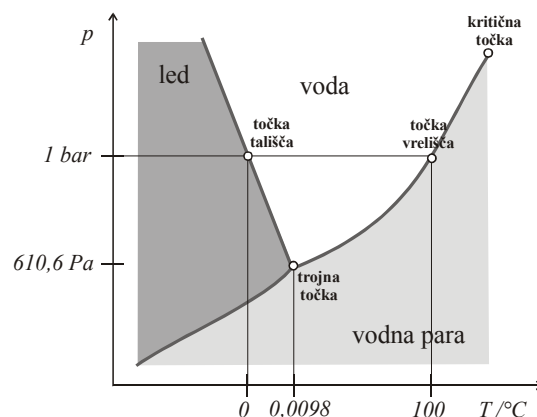


## Fazni diagram vode

Za fazni diagram vode je značilen negativen naklon meje med trdno in kapljevinno fazo vode. Trojna točka vode je točka, pri kateri pri določeni temperaturi in tlaku nastopa voda istočasno v vseh agregatnih stanjih.

Meja med trdnim in tekočim agregatnim stanjem snovi ima pri večini snovi pozitiven naklon. Pri vodi pa je naklon negativen. To pomeni, da se voda lahko tali celo blizu točke tališča (ledišča), če je v prostoru z znižanim tlakom.

Negativen naklon te meje (verjetno nevede) izkoriščajo tudi drsalci na ledu. Velik tlak pod njihovimi drsalkami spreminja led v vodo. Tako se lahko po ledu lahkotno premikajo na vodni blazini. Pri drugih snoveh povečan tlak ne bi spremenil trdne snovi v drugo agregatno stanje. Druga posledica te značilnosti vode je ledena gora. Običajno ima trdna faza večjo gostoto kot kapljevinna. S povečevanjem tlaka trdna faza postaja le še gostejša. Pri vodi pa to ne drži. Led plava na vodi, ker je ta bolj gost.



### Zakaj potrebujemo točno merjenje temperature?

V vsakdanjem življenju je merjenje temperature prisotno praktično na vsakem koraku. Zjutraj, ko si primerno zunanji temperaturi, ki nam jo sporočijo po radiu, natakne več ali manj oblačil, med kosilom, ko pazljivo poskusimo prevroč juho, in zvečer, ko si natočimo blagodejno kopel z ravno pravšnjo temperaturo. Ko pečemo potico, pečico nastavimo na 200 °C, klimatsko napravo v avtu nastavimo na 23 °C. Ko zunaj pade temperatura pod 10 °C, nam še kako prav pridejo zimske gume na vozilu, ki so iz takega materiala, da omogočajo najboljši stik s mrzlim cestiščem. Ko imamo telesno temperaturo čez 39 °C, je čas, da obiščemo zdravnika. Ko se notranja temperatura pokvarjene zamrzovalne skrinje dvigne nad 20 °C, je skrajni čas, da začnemo odstranjevati pokvarjena živila v smeti.

Tabela 6.8: Razpon temperatur, ki jih danes lahko izmerimo ali ocenimo.

200 000 000 °C	$2 \times 10^8$ °C	Joint European Torus (JET) – projekt jedrske fuzije
15 000 000 °C	$1,5 \times 10^7$ °C	temperatura v središču Sonca
6000 °C	$6 \times 10^3$ °C	temperatura na površju Sonca
1500 °C	$1,5 \times 10^3$ °C	taljeno jeklo
1064 °C	$1,064 \times 10^3$ °C	točka tališča zlata
100 °C	$10^2$ °C	vrelišče vode pri atmosferskem tlaku
0 °C	0 °C	točka ledišča kemično čiste vode
-89,2 °C	$-0,89 \times 10^2$ °C	do sedaj najnižja izmerjena temperatura zraka
-196 °C	$-1,96 \times 10^2$ °C	kriogeno shranjevanje v tekočem dušiku
-270 °C	$-2,7 \times 10^2$ °C	kozmično sevanje

**Zgodovina kelvina** Razdelitev širokega temperaturnega območja poteka s pomočjo temperaturnih lestvic.

Prvo temperaturno lestvico pripisujejo starogrškemu zdravniku Galenu (130 – 200 n.š.), ki je določil osem stopinj »temperamenta«, s katerim je opisoval stanje svojih pacientov, ko je preučeval učinke svojih zdravil. Ker termometrov še niso poznali, domnevajo, da jo je meril zdravnik z roko.

V času renesanse, v poznem šestnajstem stoletju, so se pojavili prvi termoskopi. Termoskope pripisujejo Galileju.

Leta 1641 je vojvoda Ferdinand II. Toskanski sestavil prvi zaprti termometer, ki je izkoriščal lastnosti alkohola. To je bila prva naprava za merjenje temperature, ki je imela vrsto prednosti. Uporabljala je kapljevinski senzor, ki je bil hermetično zaprt. S tem je bil neobčutljiv na spremembe zračnega tlaka in izhlapevanje. Na ohišju so bile stopinje temperature tudi prvič označene. Kasnejše izboljšave termometrov so temeljile na uporabi primernejšega stekla in tekočine ter izbiri primernejše metode za določevanje temperaturne lestvice.

Ugotovljeno je bilo, da se živo srebro razteza bolj linearno kot alkohol.

Slika 6.47: Zračni termometer ali termoskop – Sestavljen je bil iz steklene bučke, v kateri je bila pritrjena steklena cevka, potopljena v vodo ali olje. Zaradi temperaturne spremembe se je prostornina zraka v bučki spremenila in izpodrinila tekočino po cevki, na kateri so bile označene stopinje. Temperaturna lestvica je bila označena z nitkama.



Že v osemnajstem stoletju so bile temperaturne lestvice določene s pomočjo fiksnih točk, kot so recimo taleči sneg, človeška temperatura ali vrela voda. Med temi točkami so bile lestvice razdeljene na razdelke ali stopinje. Na ta način sta nastali Fahrenheitova in Celsiusova lestvica.

Konec osemnajstega stoletja sta Gay-Lussac in Charles, sto let po genialnemu začetniku termometrije Amontonsu, nadaljevala njegovo delo in dokazala, da se različni plini skoraj identično raztezajo zaradi temperaturnih sprememb.

Plinsko termometrijo je v okviru BIPM-a raziskoval Chappuis, ki je pokazal rahle razlike med posameznimi plini in predlagal temperaturno lestvico, osnovano na vodiku. Za vodikovo lestvico je dokazal točnosti pod 0,01 °C. Določil je tudi gostoto vode in to s tako točnostjo, da je ostala veljavna celo do leta 2000!

Tako je leta 1889 CIPM na svojem prvem zasedanju predlagal prvo uradno temperaturno lestvico – etalonsko vodikovo lestvico. Ta je temeljila na dveh fiksnih točkah (ledišču in vrelišču vode).

Začetniki uporabe spremembe električne upornosti za merjenje temperature so bili Davy leta 1821, Siemens leta 1861, z vrhuncem leta 1899, ko je Callendar primerjal platinaste uporovne termometre s plinskimi. Predlagal je temperaturno lestvico, ki bi temeljila na treh fiksnih točkah – ledišču, vrelišču vode in tališču žvepla. Lestvica je bila definirana s 100 enotami med lediščem in vreliščem ter temperaturo tališča žvepla 444,5 °C, ki je bila izmerjena s plinskim termometrom, kalibriranim v obeh drugih

#### **Anders Celsius (1701-1744)**

Švedski astronom, ki je vodil odpravo na Laponsko, kjer so z meritvami ugotavljali Newtonovo domnevo, da je Zemlja sploščena krogla. Prvi je povezal polarni sij z magnetnim poljem Zemlje. Leta 1742 je definiral temperaturno lestvico s stotimi enakimi deli med lediščem in vreliščem vode.

#### **Gabriel D. Fahrenheit (1686-1736)**

Nemški znanstvenik, ki je danes znan predvsem po nelogični temperaturni lestvici, je leta 1714 izdelal prvi živosrebrni termometer. Ta je pomenil ogromen napredek v primerjavi s tedanjim alkoholnim ali vodnim termometrom. Izdelal je tudi hipsometer, prednik višinometra, in z njim dokazal, da je temperatura vrelišča kapljavine odvisna od tlaka.



točkah. Izsledki Callendarja in njegovi predlogi so bili leta 1927 uporabljeni za določitev nove temperaturne lestvice ITS-27 (International Temperature Scale of 1927).

Temperaturna lestvica ni povsem ustrezala fizikalni lestvici termodinamične temperature, ki je določena s plinskimi termometri. Meritve termodinamične temperature so še danes izredno zahtevne in drage, zato je bila predlagana bolj praktična lestvica. Ta je bila osnovana na visoko obnovljivih meritvah s termometri, kalibriranimi v fiksnih točkah, v katerih je bila temperatura določena s termodinamičnimi postopki. Prednost Callendarjeve lestvice platinastih uporovnih termometrov pred

termodinamično lestvico je bila predvsem v njeni visoki obnovljivosti, enostavnosti in praktičnosti realizacije.

Z razvojem znanosti in tehnologije je bilo predlaganih vse več fiksnih točk, ki so pokrivalo vse širše temperaturno območje. Temperatura med fiksnimi točkami se izračunava z dogovorjenimi interpolacijskimi enačbami. V letih 1948, 1968 in 1976 so bile definirani obnovljene temperaturne lestvice, ki so se še bolj približale idealni obliki termodinamične temperature.

Trenutno veljavna lestvica je ITS-90, ki je bila definirana 1990.

Leta 1960 je bila definirana enota kelvin . Od tega leta so se zapisi temperature poenotili in se uporablja kelvin in ne več temperatura kelvina ( $^{\circ}\text{K}$ ).

Termodinamično temperaturo  $T$  (v enotah kelvin K) lahko zapišemo v stopinjah Celzija po enačbi

$$t = T - 273,15 \quad (6.27)$$

Temperatura 273,15 K je temperatura točke tališča ledu pri 101,325 kPa in je 0,01 K nižja od temperature trojne točke vode [1]. Enota Celzijeve temperature  $t$  je stopinja Celzija ( $^{\circ}\text{C}$ ), katere velikost je po definiciji enaka velikosti kelvina. Razlika temperatur sme biti izražena v stopinjah Celzija ali v kelvinih.

#### **William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907)**

Škotski matematik in fizik, ki je prispeval številna nova spoznanja k različnim vejam fizike, je bil znan po svoji samozavesti.

Ko je študiral na Univerzi v Cambridgu, je bil povsem gotov, da bo kot najboljši matematik v letniku on dobil naziv "Senior Wrangler". Poslal je svojega služabnika, naj gre pogledat rezultate tekmovanja in mu pride povedat, kdo je zasedel drugo mesto. Služabnik se je vrnil in mu je dejal: »Vi, gospod!«.

Leta 1895 je pospremil izjavo avstralskega instituta za fiziko »leteči stroji, težji od zraka, so mogoči« z besedami: »Razen balonov nimam niti molekule upanja v letenje. Nikoli ne bi hotel biti član kakšnega letalskega združenja.«. Kelvin je znan tudi po nagovoru Britanskega združenja za napredek znanosti leta 1900, kjer je povedal: »V fiziki je odkrito že vse. Vse kar je še preostalo, so bolj in bolj točna merjenja«.

## Realizacija temperature

Termodinamična temperatura je merilo povprečne kinetične energije delcev fizikalnega sistema. Dovajanje toplote v sistem povzroči povišanje temperature. Medtem ko maksimalna teoretična temperatura ne obstoji, obstoji najnižja temperatura – absolutna ničla – pri kateri se vsako gibanje molekul ustavi (0 K).

Temperatura  $T$  je pomembna fizikalna veličina v termodinamični in kinetični teoriji. Nastopa v fizikalnem zakonu, ki ga je v osnovni obliki zapisal lord Kelvin in kateremu se podreja idealni plin. Velja

$$pV = n R T, \quad (6.28)$$

kjer je  $p$  tlak plina,  $V$  prostornina plina,  $n$  število molov plina,  $R$  pa plinska konstanta, značilna za plin.

Maxwell, Boltzmann in Gibb so s svojimi poskusi nadaljevali Kelvinovo delo. Upoštevali so gibanje in trke posamičnih atomov plina v zaprtem prostoru in pokazali, da plin v ravnotežju pomeni, da je povprečna kinetična energija vseh njegovih atomov enaka. Danes imenujemo to področje fizike statistična mehanika. V primeru idealnega plina so ugotovili, da velja

$$pV \propto \frac{mv^2}{2}, \quad (6.29)$$

kjer je faktor  $mv^2/2$  povprečna kinetična energija vsakega atoma plina.

S primerjavo obeh enačb so ugotovili, da je temperatura sorazmerna povprečni kinetični energiji atomov, kar je tudi danes osnova za razlago narave temperature kot fizikalne veličine.

Termodinamični termometri temeljijo na uporabi principov termodinamike in statistične mehanike. Za različna temperaturna območja se uporabljajo različni termodinamični termometri. Točnost teh termometrov je precej boljša od njihove ponovljivosti in stabilnosti. Njihova pomanjkljivost je tudi ozko področje uporabe.

Termodinamično temperaturo merimo s primarnimi termometri, za katere velja, da lahko zanje princip delovanja eksplicitno opišemo z enačbo, v kateri ne nastopa nobena neznana, temperaturno odvisna veličina.

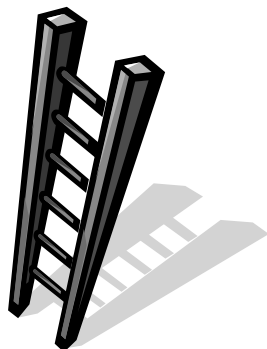
Termodinamična temperatura nastopa v vrsti takih fizikalnih in termodinamičnih enačb oziroma zakonov.

Na primer, povezavo med termodinamično temperaturo in tlakom ter številom molekul idealnega plina v danem volumnu podaja enačba stanja idealnega plina, na osnovi katere deluje plinski termometer. Na podlagi drugih termodinamičnih pojavov so bili razviti še ostali primarni termometri, in sicer sevalni termometer, akustični termometer ter šumni termometer.

Tabela 6.9: Tabela različnih tipov termometrov, s katerimi merimo termodinamično temperaturo v različnih temperaturnih območjih.  $R$ ,  $c$ ,  $h$  in  $k$  so molarna plinska konstanta, hitrost svetlobe v vakuumu, Planckova konstanta in Boltzmannova konstanta [1, 2].

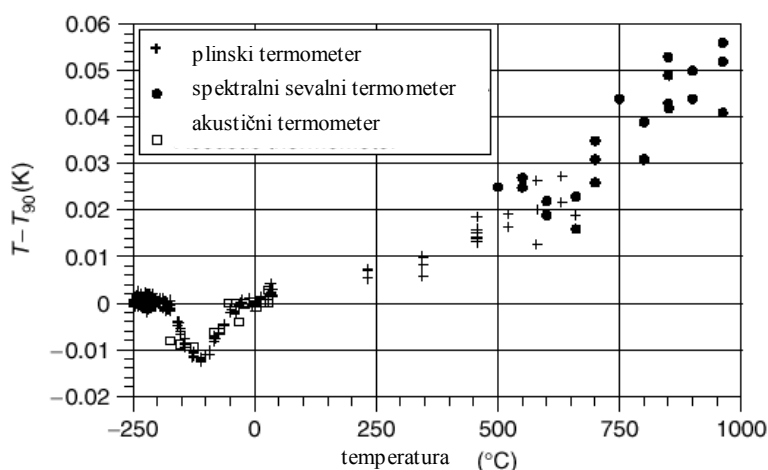
tip termometra (princip delovanja)	enačba fizikalnega procesa	merilno območje (K)	merilna negotovost (mK)
<b>plinski termometer</b> (tlak $p$ in prostornina $V$ idealnega plina)	$pV = nRT$ (tlak $p$ in prostornina $V$ plina, množina plina $n$ in temperatura $T$ )	od 2,4 do 700	od 0,3 do 15
<b>akustični termometer</b> (hitrost zvoka $v$ idealnem plinu)	$c_s^2 = \frac{\gamma RT}{M}$ (hitrost zvoka $c_s$ , razmerje specifičnih toplot pri konstantnem tlaku in volumnu $\gamma$ , molska masa $M$ in temperatura $T$ )	od 2 do 20	od 0,3 do 1
<b>šumni termometer</b> (šumna napetost na električnem uporu)	$V_T^2 = 4kTR\Delta f$ (srednja kvadratična šumna napetost $V_T^2$ , upornost $R$ , pasovna širina $\Delta f$ in temperatura $T$ )	od 3 do 1100	od 0,3 do 100
<b>termometer celotnega sevanja</b> (skupno sevanje črnega telesa)	$L = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4$ (totalno sevanje $L$ , temperatura $T$ )	od 200 do 420	od 0,5 do 2
<b>monokromatski sevalni termometer</b> (spektralno sevanje črnega telesa)	$L_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \left( e^{\frac{c_2}{T\lambda}} - 1 \right)^{-1}$ (spektralno sevanje $L_\lambda$ , valovna dolžina $\lambda$ , prva in druga sevalna konstanta $c_1$ in $c_2$ ter temperatura $T$ )	od 1200 do 6000	od 10 do 2000

## Temperaturne lestvice



Termodinamično temperaturo merimo s primarnimi termometri, za katere velja, da lahko njihov princip delovanja opišemo z enačbo, v kateri ne nastopa nobena neznana, temperaturno odvisna veličina. Primarni termometri so plinski termometer, akustični termometer, šumni termometer in termometer celotnega sevanja. Pri praktičnih merjenjih temperature se, razen pri zelo nizkih in zelo visokih temperaturah, primarni termometri zaradi različnih vplivnih parametrov praviloma izkažejo za neprimerne, saj so netočni, nepraktični in dragi. Primarne termometre zato zamenjamo z bolj točnimi, bolj praktičnimi in cenejšimi sekundarnimi termometri, pri katerih princip delovanja opišemo empirično na osnovi meritev s primarnimi termometri.

Zato je v praktične namene znanosti in stroke mednarodna merska skupnost v okviru Mednarodnega urada za mere in uteži (BIPM), razvila in sprejela uporabo empirične ali praktične temperaturne lestvice, ki predstavlja trenutno najboljši približek termodinamični temperaturni lestvici.



Slika 6.48. Razlike med termodinamično temperaturno lestvico in temperaturno lestvico ITS-90 [2].

## Mednarodna temperaturna lestvica ITS-90

Danes je v veljavi mednarodna temperaturna lestvica ITS-90 (International Temperature Scale of 1990), ki je že peta praktična temperaturna lestvica. Vzpostavitev lestvice temelji na treh stopnjah:

- Fiksne točke, in sicer točke tališč, točka strdišča in trojne točke različnih materialov ali substanc, vzpostavljene v skladu z navodili BIPM.
- Odčitki predpisanih termometrov, določeni za vsako fiksno točko.
- Temperatura med fiksnimi točkami, izračunana s pomočjo dogovorjenih interpolacijskih enačb.

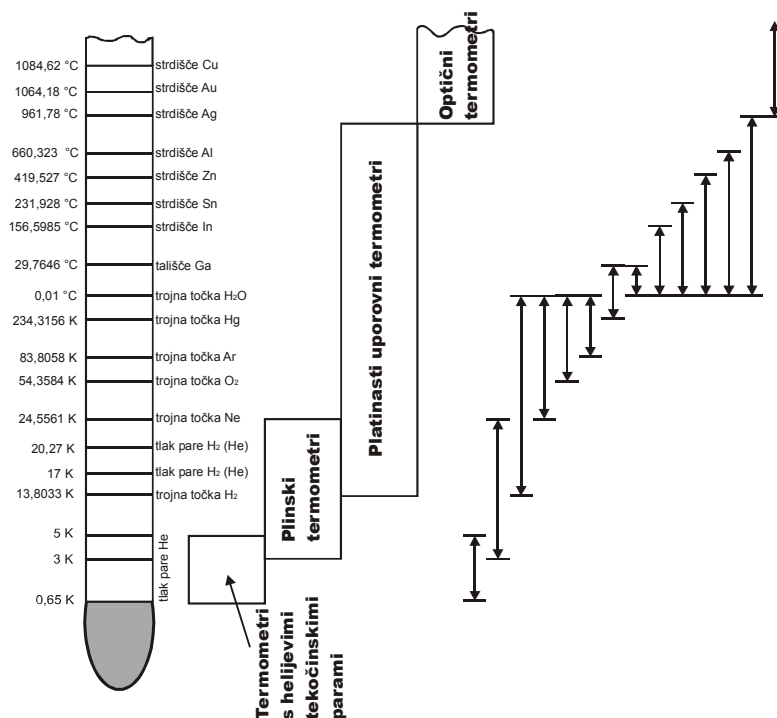
ITS-90 pokriva temperaturno območje od 0,65 K do najvišjih praktično merljivih temperatur. Lestvica je razdeljena na štiri glavna podobmočja, ki se med seboj deloma prekrivajo:

- med 0,65 K in 5,0 K je definirana na osnovi povezave temperature s tlakom helijevih par
- med 3,0 K in trojno točko neona (24,5561 K) je definirana na osnovi helijevega plinskega termometra, kalibriranega v treh

temperaturnih točkah s predpisanimi temperaturami in z uporabo predpisanega interpolacijskega postopka.

- med trojno točko vodika (13,8033 K) in točko strdišča srebra (961,78 °C) je definirana na osnovi platinastih uporovnih termometrov, kalibriranih v predpisanem naboru fiksnih točk in z uporabo predpisanih interpolacijskih postopkov.
- nad strdiščem srebra (961,78 °C) je definirana na osnovi predpisane fiksne točke (strdišče srebra, zlata ali bakra) in Planckovega sevalnega zakona.

### Fiksne točke      Termometri      Interpolacijska območja



Slika 6.49: Realizacija temperaturne lestvice ITS-90.

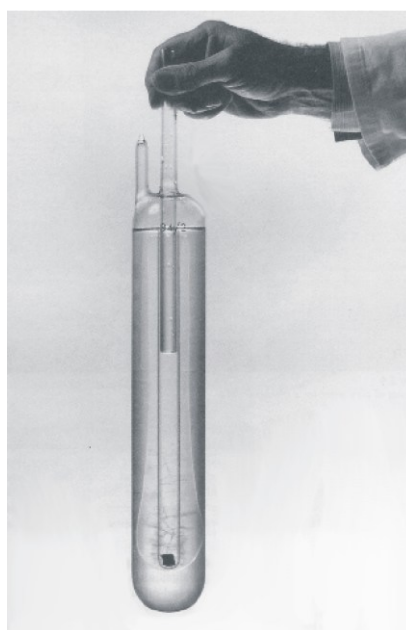
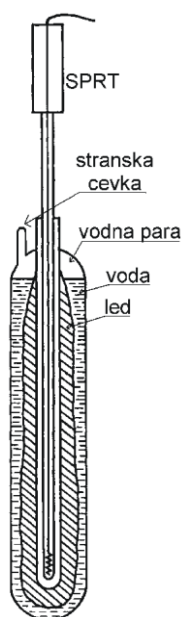
### Fiksne točke

Fiksna točka je fizikalni sistem, katerega temperatura je konstantna med določenim fizikalnim procesom. Fizikalni procesi so običajno spremembe agregatnega stanja snovi pri določeni temperaturi. Ta temperatura je odvisna predvsem od snovi in ne od aparatur, ki se uporabljajo za realizacijo fiksne točke.

Prehodi so lahko iz tekočega v plinasto stanje ali obratno in prehodi iz trdnega v tekoče stanje ali obratno. Nekatere omogočajo vzdrževanje vseh treh agregatnih stanj hkrati. To so trojne točke, ki pri določenem tlaku in temperaturi ustvarjajo fiksne točke ob hkratnem nastopu trdne, tekoče in plinaste faze. Sisteme vzdržujemo v stanju s konstantno temperaturo z dovajanjem ali odvajanjem toplote. Točke vrelišč se ne uporabljajo več, ker so v preveliki meri odvisne od tlaka.

Tabela 6.10: Fiksne točke ITS-90 in njihove vrednosti. P – para, PL – plin, T - trojna točka, TA - tališče (pri tlaku 101,325 kPa), ST - strdišče (pri tlaku 101,325 kPa).

Št. točke	Temperatura		Snov	Stanje
	$T_{90}$ [K]	$t_{90}$ [°C]		
1	3 do 5	-270,15 do -268,15	He	P
2	13,8033	-259,3467	e-H <sub>2</sub>	T
3	≈17	-256,15	e-H <sub>2</sub> (ali He)	P ali PL
4	≈20,3	-252,85	e-H <sub>2</sub> (ali He)	P ali PL
5	24,5561	-248,5939	Ne	T
6	54,3584	-218,7916	O <sub>2</sub>	T
7	83,8058	-189,3442	Ar	T
8	243,3156	-38,8344	Hg	T
9	273,16	0,01	H <sub>2</sub> O	T
10	302,9146	29,7646	Ga	TA
11	429,7485	156,5985	In	ST
12	505,078	231,928	Sn	ST
13	692,677	419,527	Zn	ST
14	933,473	660,323	Al	ST
15	1234,93	961,78	Ag	ST
16	1337,33	1064,18	Au	ST
17	1357,77	1084,62	Cu	ST



Slika 6.50: Trojna točka vode kot osnova za realizacijo etalona termodinamične temperature.

**Tipi termometrov** Poznamo različne tipe termometrov. Najbolj razširjeni so tekočinski termometri, platinasti uporovni termometri, termočleni in sevalni termometri.

### Tekočinski termometri

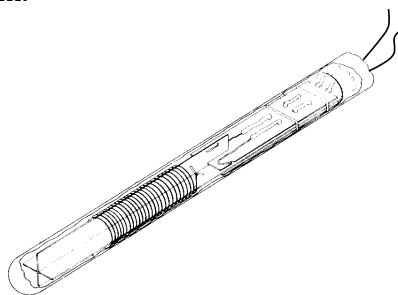
V fiziki, medicini, metrologiji in industriji so v uporabi že več kot 300 let. Tekočinski termometri so naprave, ki v stekleni posodici (bučki s cevko) hranijo tekočino, katere raztezek je odvisen od temperature. Osnova delovanja je raztezanje tekočine s temperaturo. Tekočina je zaprta v stekleni posodici. Na posodici je označena skala, s katere razberemo merjeno temperaturo. Običajno je tekočina živo srebro, ki ima linearen koeficient temperaturnega raztezka.



Slika 6.51: Termometer iz sredine 18. stoletja. Zaradi debele kapilare ima veliko bučko. Skala je obrnjena, kot je bilo običajno v deželah s hladnejšim podnebjem (Švedska), kjer je bilo število stopinj mraza pomembnejše od števila stopinj toplega vremena [2].

**Platinasti uporovni termometri** V sodobnem svetu so živosrebrni in alkoholni termometer že skoraj popolnoma nadomestile električne naprave. Platinasti uporovni termometri so naprave, ki izkoriščajo temperaturno odvisnost električne upornosti čiste platine. So zelo občutljive naprave, ki omogočajo zelo točna merjenja (tudi bolje od tisočine stopinje Celzija).

V najenostavnejši obliki je platinasti uporovni termometer platinasta tuljava, ki je navita na keramično jedro in zaščitena s steklenim plaščem.



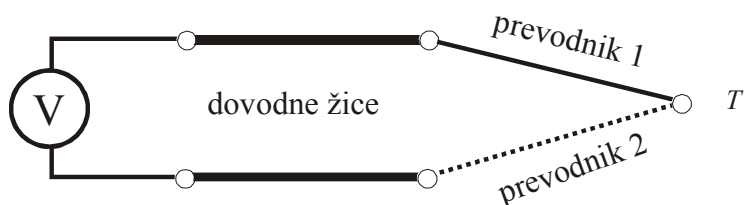
Slika 6.52: Zgradba platinastega uporovnega termometra.

T

## Termočleni

Termočleni so v industriji najbolj pogosti merilniki temperature. Že leta 1822 je Seebeck objavil prvi članek o termoelektričnosti. Osnova termočlena je stik dveh različnih kovinskih žic, ki ga postavimo v točko merjenja. Med prostima koncema žice se generira električna napetost, ki je sorazmerna merjeni temperaturi.

Slika 6.53: Shema delovanja termočlena.

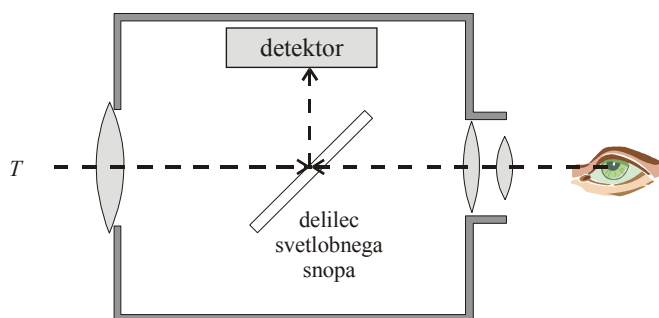


## Sevalni termometri

Sevalni termometri ali pirometri izkoriščajo fizikalno dejstvo, da vsi objekti sevajo termično energijo.

Količino sevanja nekega telesa lahko izmerimo. Iz nje lahko sklepamo na temperaturo telesa s pomočjo Planckovega zakona. Temperature lahko na ta način merimo brezkontaktno, kar je posebno uporabno za merjenje temperatur zelo vročih, težko dostopnih ali premikajočih teles v nevarnih okoljih.

Slika 6.54: Shema delovanja sevalnega termometri. Opazovalec nameri inštrument na telo s temperaturo  $T$ .



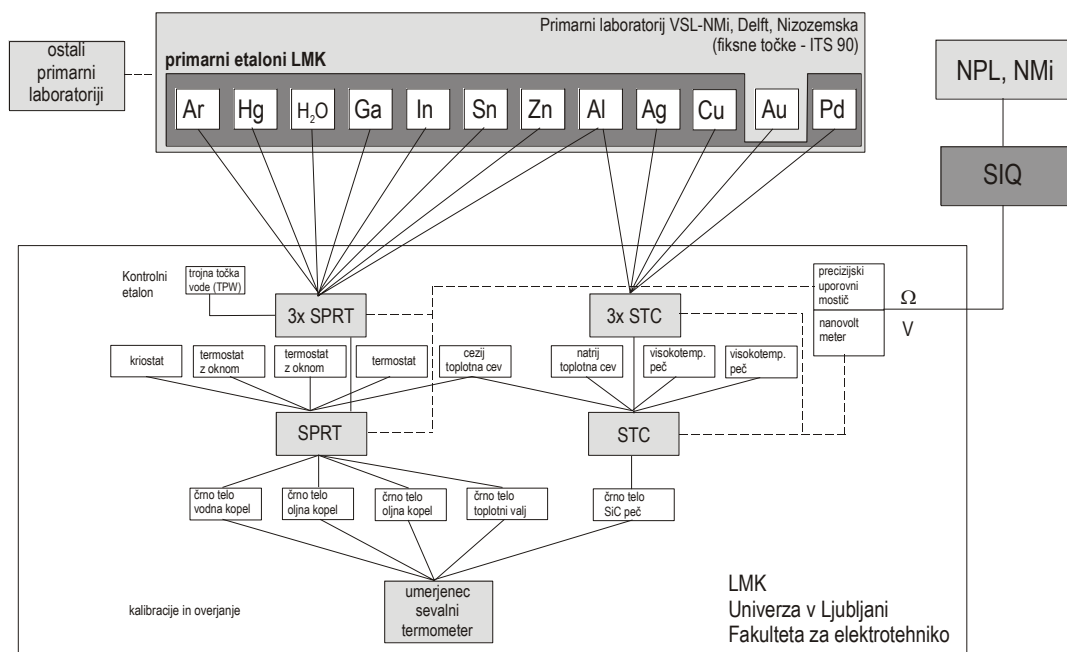
Slika 6.55: Uporaba sevalnega termometra (termovizijske kamere) pri ugotavljanju kvalitete izdelave gretja avtomobilskih sedežev [3].





## Diseminacija kelvina

Diseminacija enote za temperaturo v običajnem območju od 14 K do 962 °C poteka s pomočjo kalibracije uporabnih termometrov v fiksni točkah. Izven tega območja se diseminacija izvaja z uporabo drugih termometrov (plinski, akustični, šumni, sevalni).



Slika 6.56: Sledljivostna shema nosilca nacionalnega etalona za termodinamično temperaturo, Laboratorija za metrologijo in kakovost (LMK).

## Realizacija kelvina v prihodnosti

Praktična realizacija kelvina bo v prihodnosti temeljila na izboljšanju merilne negotovosti primarnih termometrov in s tem določanju novih temperaturnih lestvic. Nove lestvice bodo bolj ustrezale termodinamični temperaturni lestvici, tako da bodo pokrivala tudi določene manjkajoče temperaturne fiksne točke (trenutno veljavna lestvica ITS-90 nima dogovorjene fiksne točke med trojno točko živega srebra (-38 °C) in trojno točko argona (-189 °C)).

Po drugi strani potekajo raziskave tudi v smeri realizacije kelvina z navezavo na Boltzmannovo konstanto. S pomočjo novih dognanj na področju akustičnih termometrov in termometrov celotnega sevanja je danes Boltzmannova konstanta in s tem temperatura izračunana z relativno negotovostjo nekaj  $10^{-6}$ .

## Literatura poglavja

- [1] J. Bortfeld, B. Kramer, Units and Fundamental Constants in Physics and Chemistry, Subvolume A: Units in Physics and Chemistry, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1991
- [2] J.V. Nicholas, D.R. White, Traceable Temperatures - An Introduction to Temperature Measurement and Calibration, John Wiley & Sons, 1994
- [3] <http://www.flir.com>

## Množina snovi

**Definicija enote za množino snovi** *Mol (mol) je množina snovi sistema, ki vsebuje toliko elementarnih enot, kolikor je atomov v 0,012 kg ogljika  $^{12}\text{C}$ . Ogljik mora biti v nevezanem stanju, v mirovanju in v osnovnem stanju. Kadar uporabljamo enoto mol morajo biti elementarne enote točno označene ter so lahko atomi, molekule, ioni, elektroni ali drugi delci ali skupine delcev.*

Enota je bila določena na 14. zasedanju CPIM leta 1971.

**Zgodovina mola** Enota mol je neposredno povezana z maso atomov (atomska teža) in molekul (molekulska teža). Atomska teža je včasih označevala atomsko maso kisika, ki je bila dogovorjena kot 16. Z razvojem masnih spektrometrov so fiziki ločili izotope kemičnih elementov in dodelili vrednost 16 enemu od kisikovih izotopov. Istočasno so kemiki dodelili isto vrednost (rahlo spremenljivi) mešanici kisikovih izotopov 16, 17 in 18, ki je zanje pomenil kisik, kot ga najdemo v naravi. Zaradi te dvojnosti sta se leta 1959 organizaciji IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics) in IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) dogovorili o skupnih definicijah. Dogovorili sta se, da izotopu ogljika  $^{12}\text{C}$  pripišejo vrednost 12 [2]. Danes skupna skala opisuje relativne atomske mase glede na ta izotop ogljika.

**Realizacija in diseminacija mola** Kvantitativno merjenje množine snovi bi bilo zelo zahtevno, saj gre v splošnem na makroskopskem nivoju za nepredstavljivo veliko sestavnih delcev snovi ali z drugimi besedami za nepredstavljivo majhne delce. Merjenje množine snovi z enostavnim štetjem elementarnih enot ni mogoče. Zato so bile uvedene molske mase, ki izkoriščajo meritve mase snovi. Molske mase predstavljajo maso snovi, v kateri je točno določeno število delcev. To število imenujemo Avogardovo število ali Avogadrova konstanta.

**Avogardovo število  $N_A$**  je bilo včasih imenovano Loschmidtovo število po Avstrijcu Josefu Loschmidtu (1821-1895), ki je prvi uporabil dve oz. tri črte za označevanje dvojnih in trojnih vezi v molekulah. Avogardovo število je imenovano po italijanskem fiziku Amadeu Avogadru (1776-1856), ki je kot prvi predvideval, da imajo različni plini pri istem tlaku in temperaturi enako število molekul.

Primer, kako veliko je Avogadrovo število, je pokrivanje Zemlje s pločevinkami piva. Če bi jih postavili drugo ob drugo, bi lahko pokrili celo Zemljo, višina take skladovnice pa bi bila 300 km.

Diseminacija in realizacija mola pomeni merjenje Avogadrovega števila.

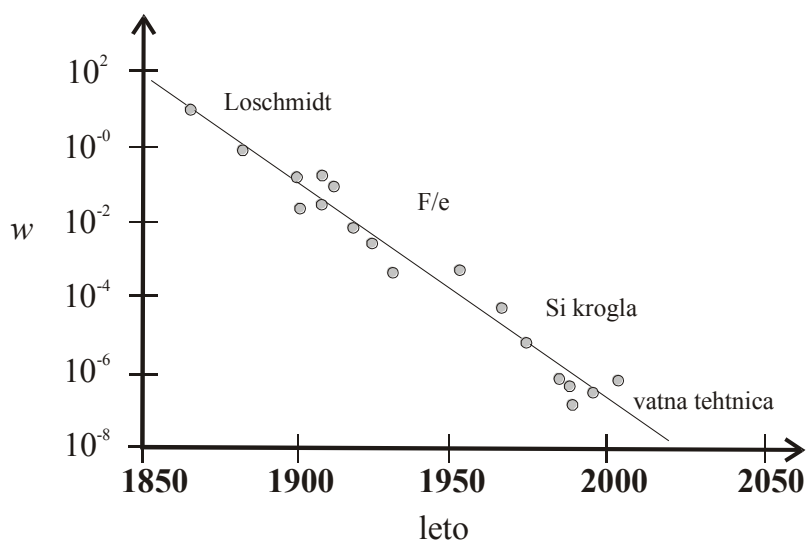
V splošnem predstavlja realizacija mola proces štetja delcev. Merjenje Avogadrovega števila je v tesni povezavi s predlagano realizacijo enote za maso kilograma (Avogadrov projekt). Običajno gre za pravilne oblike monokristalov elementov z zelo pravilno strukturo (silicij). Glavna problematika raziskav je izdelava zelo čistih kristalov ali pa razvoj zelo

dobrih metod za štetje delcev (štetje števila delcev v delu kristala, nato ekstrapoliranje njihovega števila na celotni kristal).

Realizacija mola z veliko točnostjo na podlagi osnovne fizikalne konstante, kot je Avogadrovo število, bo hkrati pomenila tudi realizacijo kilograma, ki bi morda lahko nadomestila obstoječo definicijo kilograma. Obe enoti sta namreč realizirani s primerjavo. Masa neznanega telesa je primerjana z maso prakilograma K. Množina poljubne snovi pa se lahko določi s primerjavo z molarno maso ogljika  $^{12}\text{C}$ , ki se jo lahko določi z veliko negotovostjo z masno spektrometrijo ( $8 \times 10^{-8}$ ) [1].

Danes je dogovorjena vrednost Avogadrovega števila  $N_A = 6,022\,141\,99 \times 10^{23}$  /mol in ima negotovost  $7,9 \times 10^{-8}$  [3].

Slika 6.57: Izboljševanje relativne negotovosti določevanja Avogadrovega števila  $N_A$  v odvisnosti od leta. Pripisane so osnovne metode določevanja  $N_A$  od prve, ki jo je izvedel Loschmidt, razmerja med Faradayevo konstanto in osnovnim nabojem do novejših poskusov s silicijevo kroglo in vatno tehtnico [3].



### Referenčni material

Referenčni material (RM) je definiran kot material ali snov, ki je dovolj homogena in katere ena ali več lastnosti je dovolj dobro ugotovljenih, da se lahko uporablja za umerjanje naprave, ocenjevanje merilne metode ali za pripisovanje vrednosti materialom [4]. Referenčni material je lahko v obliki čistega plina, kapljevine ali trdne snovi, lahko pa je tudi mešanice vseh.

Primeri referenčnih materialov so raztopine, ki se uporabljajo za umerjanje v kemični analizi, voda za umerjanje viskozimetrov itd.

### Certificirani referenčni material

Certificirani referenčni material (CRM) je definiran kot RM s priloženim certifikatom, katerega ena ali več vrednosti določene lastnosti je certificiranih s postopkom, ki vzpostavlja sledljivost do točne realizacije enote, v kateri so vrednosti te lastnosti izražene, in pri kateri vsako certificirano vrednost spremlja negotovost z navedeno stopnjo zaupanja [4]. CRM se ponavadi pripravlja v šaržah. Lastnosti materiala se ugotavljajo z merjenji na vzorcih in veljajo za celotno šaržo.

CRM so lahko tudi naprave – trojna točka vode v termometriji (CRM je v tem primeru čista voda v stekleni celici), prepustni filter (CRM je steklo z znano optično gostoto), objektno stekelce mikroskopa (CRM so kroglice enake zrnatosti) itd.

## Sledljivost v kemiji

Nekateri RM in CRM imajo lastnosti, ki jih ni mogoče ugotoviti s točno določenimi fizikalnimi ali kemičnimi merilnimi metodami, ker jih ni mogoče povezati z ustaljeno kemično zgradbo ali iz drugih razlogov. Gre največkrat za različne biološke snovi (beljakovine, cepiva).

Zagotavljanje sledljivosti večine fizikalnih veličin na osnovne SI enote je splošno uveljavljeno in mednarodno organizirano. Zagotavlja verodostojne meritve na vseh nivojih. Sledljivost v kemičnih meritvah je vezana na osnovni enoti kilogram in mol.

Mol je definiran kot določeno število delcev. Posledično predstavlja meritev množine snovi štetje delcev. V praksi je enostavno neposredno štetje delcev seveda zelo težavno, zato se poslužujemo posrednih metod. Posredne metode so na primer primerjave razmerij množine snovi ali odziv merilnih instrumentov na različna števila delcev. Zato so merjenja v kemiji običajno sledljiva na določen referenčni material ali pa referenčno metodo.

Po drugi strani je mol definiran kot število atomov v 12 gramih čistega izotopa ogljika 12. Ogljik pa je zelo nereaktiven, zaradi česar je manj uporaben v praksi. Tako v praksi preostane edini način izdelava različnih čistih snovi (CRM) in prikaz njihove sledljivosti na mol.

Potekajo tudi raziskave v smeri iskanja kemičnega elementa, ki bi bil podobno stabilen kot ogljik, a bolj praktičen in dostopen. Angleško podjetje Romil je tako izdelalo ultračisto srebro in dokazalo neposredno sledljivost na mol. Srebro je primeren element, ker se mu tako kot ogljiku kemične lastnosti bistveno ne spreminjajo s časom, hkrati pa je topljiv v kislinah, kar je pomembno pri raznovrstnih kemijskih reakcijah [5].

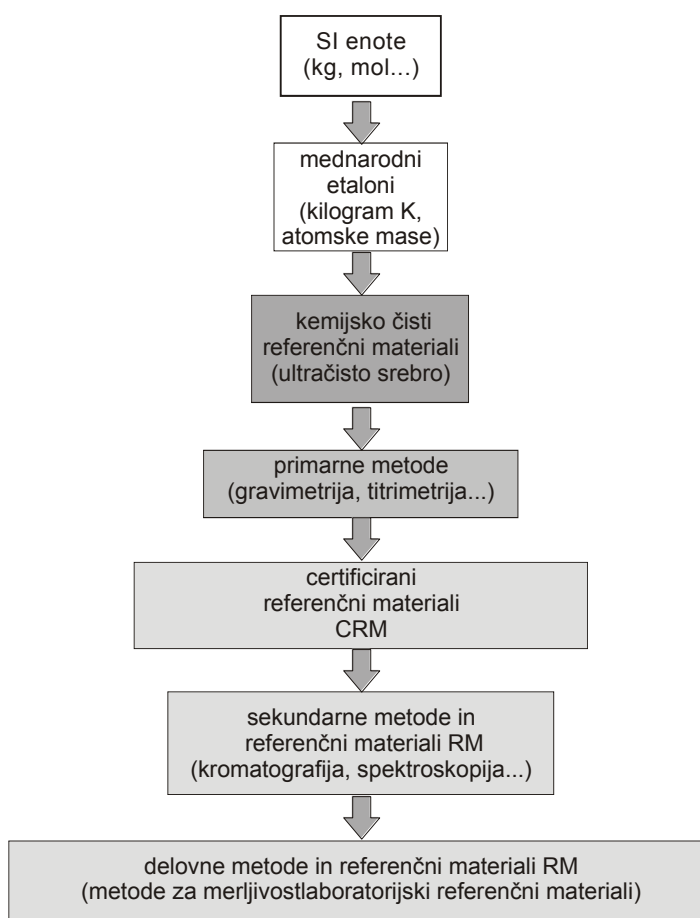
Primarni referenčni materiali, kot so ultračiste snovi, so sicer manj primerni za praktično uporabo v običajnih analitskih laboratorijih, saj so zelo dragi in ne upoštevajo matričnih pojavov (lastnosti čistih materialov se spremenijo, če materiali nastopajo v obliki mešanice snovi in reagirajo med seboj). Trenutno je v svetu zelo malo kemijskih metroloških institucij, ki se ukvarjajo s pripravljavanjem CRM in RM. Najvažnejše so evropska IRMM – Institute for Reference Materials and Measurements, ki se ukvarja s pridobivanjem izredno čistega železa, katerega atomsko maso bi poznali z visoko točnostjo (za povezovanje enot mase in množine snovi), ameriški NIST, ki izdeluje celo vrsto CRM, kanadski INMS – Institute for National Measurement Standards in avstralski NARL – National Analytical Reference Laboratory.

Vse metode, ki jih proizvajalci uporabljajo za certificiranje svojih materialov, morajo biti ovrednotene in dokazano točne. Negotovost mora biti navedena v certifikatu.

## Zakaj sledljivost meritev tudi v kemiji?

Pomembnost sledljivosti v kemiji lahko najdemo v ekonomskih razlogih. Nemčija na primer porabi okoli 170 bilijonov evrov na leto za zdravstvo (podatki iz 1994), kar predstavlja okoli 10 % nemškega BDP. Ena tretjina tega zneska gre za zdravstvene storitve – 56 milijonov evrov. 10 % tega zneska se porabi za laboratorijske storitve (5,6 milijonov evrov). Za ponavljanje meritev, ki je potrebno, kadar so rezultati dvomljivi in morebiti napačni, pa Nemčija porabi kar 30 % tega zneska (1,7 milijonov evrov) [6]. S pravilno izračunanimi merilnimi negotovostmi in sledljivimi meritvami bi bili ti izdatki manjši.

Zaradi ogromnega števila različnih kemijskih analiz za zagotavljanje sledljivosti seveda potrebujemo tudi ogromno število merilnih metod in referenčnih materialov. V kemiji je prisoten tudi problem, da so kemične lastnosti zelo velikega števila snovi nezadostno dobro definirane (recimo v prehrabeni industriji vlaga, količina beljakovin v hrani) in zato ni možna navezava na SI enoto mol. V tem primeru so merjenja vezana na dogovorjeno mednarodno priznano primarno merilno metodo ali material. Kot primarne metode je danes priznanih le nekaj metod (izotopsko redčenje z masno spektroskopijo – mešanje atomov snovi z enim ali več atomovih izotopov, coulometrija – določanje množine snovi iz električnega naboja, titrimetrija – titriranje snovi, gravimetrija – tehtanje čiste snovi).



Slika 6.58: Sledljivost meritev v kemiji (Measurement Standards Laboratory, Nova Zelandija) [7].

## Literatura poglavja

- [1] [http://www.bipm.fr/enus/3\\_SI/si\\_fig.html](http://www.bipm.fr/enus/3_SI/si_fig.html)  
T.J Quinn, Base units of the Système international d'unités, their accuracy, dissemination and international traceability, Metrologia, 1995, 31, 515-527, D. Kind, T. J. Quinn, Metrology: Quo Vadis?, Physics Today, August 1998, 15-17
- [2] J. Bortfeld, B. Kramer, Units and Fundamental Constants in Physics and Chemistry, Subvolume A: Units in Physics and Chemistry, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1991
- [3] P. J. Mohr, B. N. Taylor, CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 1998, Reviews of Modern Physics, Vol. 72, No. 2, pp. 351-495, 2000
- [3] G. Mana, The Avogadro constant, BIPM Summer School 2003
- [4] Mednarodni slovar osnovnih in splošnih izrazov s področja meroslovja - VIM (Vocabulaire International des Termes Fondamentaux et Généraux de Métrologie), 1999
- [5] <http://www.romil.com>
- [6] G. Dube, Metrology in Chemistry – a public task, Accred Qual Assur (2001), 6:3-7
- [7] <http://www.irl.cri.nz/msl>

# Svetilnost

**Definicija enote za svetilnost vira sevanja** *Kandela (cd) je svetilnost vira sevanja, ki v določeno smer oddaja monokromatsko sevanje s frekvenco 540 THz in ima v tej smeri energijsko jakost sevanja  $1/683$  W na steradian.*

Enota je bila določena na 16. zasedanju CPIM leta 1979. Z definicijo je enota svetilnosti vezana na mehanske enote (meter, kilogram in sekunda).

**Zgodovina kande** Viri svetlobe se bili skozi zgodovino vedno med seboj primerjani na podlagi svetilnosti vira. V začetki 20. stoletja so v nacionalnih laboratorijih kot etalone uporabljali različne oblike virov s plamenom. Ena izmed takih etalonov je bila Hefnerjeva sveča, ki je imela točno določene dimenzije in precej veliko ponovljivost [1]. Hefnerjeva sveča je ostala etalon v nekaterih evropskih laboratorijih do leta 1940. V Veliki Britaniji, Franciji in Združenih državah Amerike je bila osnovna enota enaka, vendar vzdrževana v obliki žarilne svetilke.

Leta 1931 je CPIM predlagal novo definicijo primarnega etalona za svetilnost kot določeno površino črnega telesa kot grelca pri točki tališča platine. Realizacija po tej definiciji je bila nadvse tehnično zahtevna in draga, tako da je bila kandela realizirana le v redkih laboratorijih sveta. Zato je bila leta 1979 predlagana nova definicija svetilnosti.

Danes je fotometrična enota kandela definirana na osnovi radiometrije in omogoča različne načine in metode realizacije.

## Realizacija in diseminacija kande

Fizikalno merjenje svetlobe ne potrebuje posebne enote, kajti vidna svetloba je le oblika elektromagnetnega sevanja in jo lahko izrazimo z že obstoječimi fizikalnimi enotami. Merjenje fizikalnih lastnosti svetlobe je izraženo z radiometričnimi enotami.

Pomembnost človeškega čuta za vid in zgodovinski razlogi so podlaga za dodatno osnovno enoto SI sistema – enoto za svetilnost vira sevanja.

Tako imenovane fotometrične enote ne merijo izključno fizikalne lastnosti svetlobe, ampak upoštevajo tudi fiziološke lastnosti človeškega organa za vid, ki je v veliki meri odvisno od posameznega človeka.

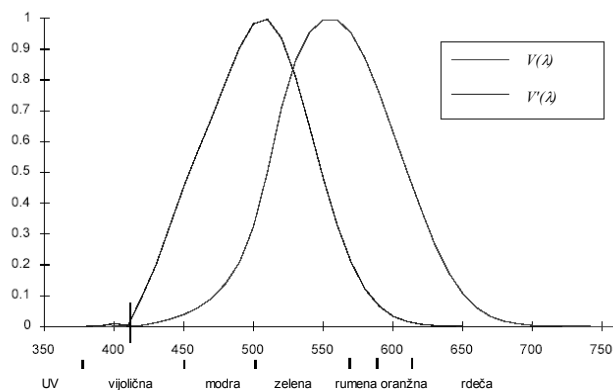
Človeškemu očesu se rumena svetloba zdi svetlejša od rdeče ali modre, čeprav bi inštrument, ki meri sevanje svetlobe (radiometer), izmeril isto svetilnost. Če želimo izmeriti, kako svetlo se zdi človeškemu očesu neko sevanje, potrebujemo inštrumente, ki na



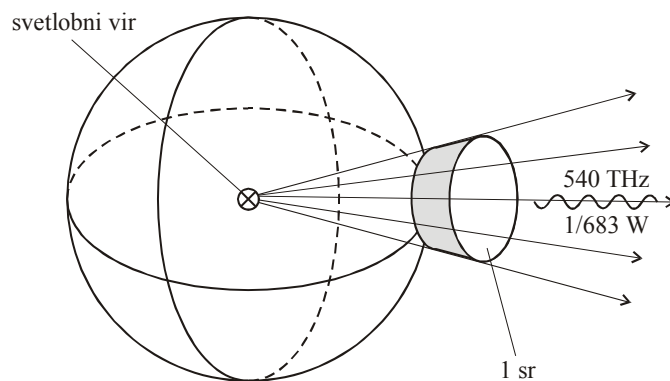
V letu 1948 je bila enota svetilnosti vira poimenovana po latinski besedi za svečo - kandela. Svetilnost ene kande je približno enaka svetilnosti običajne sveče.

različne valovne dolžine svetlobe reagirajo podobno kot človeško oko. Taki inštrumenti so imenovani fotometri.

Slika 6.59: Selektivna občutljivost človeškega očesa je predstavljena z dogovorjenima krivuljama. Krivulji sta dogovorjeni za človeško oko, ki se je adaptiralo na visoko osvetljenost  $V(\lambda)$  in na nizko osvetljenost  $V'(\lambda)$  [2].



Kandela je enota svetilnosti, lastnosti svetlobnega vira, ki oddaja optično sevanje v vidnem delu spektra. Realizacija kandelega tako predstavlja določevanje svetilnosti vira s pomočjo radiometričnih etalonov. Svetlobni vir lahko imenujemo tudi sekundarna etalonska svetilka. Svetilke, ki temeljijo na principu žarilne nitke, imajo izredno stabilnost (0,02 %) in obnovljivost in jih zato uporabljamo za vzdrževanje in diseminacijo enote svetilnosti in za izpeljavo ostalih fotometričnih enot (lux, lumen) [1].



Slika 6.60: Definicija kandelega.

Kandela je običajno realizirana in vzdrževana s sistemom več fotometrov in žarilnih svetilk.

Fotometri so v osnovi iz dveh osnovnih delov – filtra in fotodetektorja. Svetloba pade skozi zaslonko točno določene površine na fotodetektor (fotodioda), opremljen s filtrom, ki ima karakteristiko  $V(\lambda)$  krivulje. Signal se nato ojači in izmeri z voltmetrom.



Najtočnejše merjenje optičnega sevanja, oziroma najtočnejša realizacija kandelega poteka z absolutnimi detektorji termičnega sevanja. Absolutni detektorji sevanja primerjajo sevalno energijo vira z električno energijo segrevanja. Ena od takih realizacij kandelega merjenja s kriogenskimi radiometri. Kriogeni radiometri z veliko točnostjo merijo Stefan-Boltzmannovo konstanto in na ta način omogočajo, da je merjenje optičnega sevanja sledljivo na osnovno fizikalno konstanto.

Tipične razširjene negotovosti, ki vplivajo na skupno točnost realizacije enote za svetilnost, so okoli 0,3 % [1] in upoštevajo:

- absolutno občutljivost fotometra,
- pogrešek barvnega korekcijskega faktorja,
- pogrešek geometrijskih dimenzij in postavitev,
- merjenje svetlobnega toka in vpliv IR,
- merjenje toka svetilke.

## Literatura poglavja

[1] J. Bortfeld, B. Kramer, Units and Fundamental Constants in Physics and Chemistry, Subvolume A: Units in Physics and Chemistry, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1991.

[2] Casimer DeCusatis, Handbook of Applied Photometry, Springer-Verlag New York, 1997, [http://www.bipm.fr/enus/5\\_Scientific/e\\_rad\\_phot/photometry/handbook.html](http://www.bipm.fr/enus/5_Scientific/e_rad_phot/photometry/handbook.html)

## Nekatere izpeljane veličine SI sistema

Ena izmed osnovnih lastnosti koherentnega sistema enot je, da skupina osnovnih fizikalnih veličin zadostuje za izpeljavo vseh ostalih, ki jih zato imenujemo izpeljane fizikalne veličine.

SI sistem je koherentni sistem enot.

Izpeljane fizikalne veličine so veličine, ki jih lahko dobimo z linearno kombinacijo sedmih osnovnih SI enot, pri čimer so konstante vedno enake 1.

Na primer, enota za električno upornost (ohm) je definirana kot

$$1 \Omega = 1 \text{ m}^2 \cdot 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ s}^{-3} \cdot 1 \text{ A}^{-2} \quad (6.30)$$

Nekatere tipične izpeljane fizikalne veličine so frekvenca z enoto hertz ( $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ), sila z enoto newton ( $\text{N} = \text{m kg/s}^2$ ), tlak z enoto pascal ( $\text{Pa} = \text{N/m}^2 = \text{kg/m s}^2$ ), električni potencial z enoto volt ( $\text{V} = \text{W/A} = \text{m}^2 \text{ kg/s}^3 \text{ A}$ ), gostota magnetnega pretoka z enoto tesla ( $\text{T} = \text{Wb/m}^2 = \text{kg/s}^2 \text{ A}$ )...

## Sila

**Definicija enote za silo** Po drugem Newtonovem zakonu

$$F = m a \quad (6.31)$$

velja, da je sila  $F$ , ki deluje na telo, odvisna od mase telesa  $m$  in od njegovega pospeška  $a$ . Enoto sile, newton (N), lahko izrazimo z osnovnimi enotami kg, m in s ( $1 \text{ N} = 1 \text{ m kg/s}^2$ ).

**Realizacija newtona**

Enota za silo je realizirana s etalonskimi napravami, ki izkoriščajo nosilnost, gravitacijsko silo in hidravlično ter vzvodno ojačevanje sile. Te naprave realizirajo sile v širokem območju in omogočajo generiranje serije rastočih ali padajočih sil brez vmesnih razbremenitev in brez spreminjanja smeri obremenitve.

Sile lahko merimo in med seboj primerjamo s pomočjo nateznih in tlačnih pretvornikov sile (na primer uporovni lističi), ki jih uporabljamo tudi kot prenosniške etalone. Pri praktičnih merjenjih se poleg ostalih prispevkov negotovosti (negotovost mase, vzgon zraka, gravitacijsko polje, geometrija, trenje) vedno pojavljajo tudi medsebojni vplivi med pretvorniki sile in etalonskimi napravami.

Tabela 6.11: Etalonske naprave za realizacijo sile.

Princip etalonske naprave za silo	območje	rel. negotovost	metoda	prispevki negotovosti
nosilnost	od 0,1 N do 2 MN	$2 \times 10^{-5}$	sila znane mase v gravitacijskem polju Zemlje	masa, vzgon zraka, lokalno gravitacijsko polje
hidravlika	$> 1$ MN	$5 \times 10^{-4}$	izenačevanje hidravlične sile in sile znane mase v gravitacijskem polju Zemlje (razmerje od 10:1 do 1000:1)	geometrija, lastnosti olja, trenje
vzvod	$\leq 3$ MN	$4 \times 10^{-4}$	vzvodno ojačevanje sile (razmerje od 10:1 do 2000:1)	geometrija, trenje

## Tlak

**Definicija enote za tlak** Tlak  $p$  z enoto pascal ( $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$ ) je definiran kot razmerje normalne komponente sile  $F$  na tekočino na površini  $A$ .

$$p = \frac{F}{A} \quad (6.32)$$

V osnovi ločimo dva osnovna načina merjenja tlaka. Prvi je merjenje tlaka kot razmerja med silo in površino, na katero sila deluje. Drugi pa je merjenje tlaka  $p$  na dnu stolpca tekočine z gostoto  $\rho$  in višino  $h$ .

$$p = \rho g h \quad (6.33)$$

kjer je  $g$  gravitacijski pospešek na kraju merjenja.

**Merjenje tlaka** Območje tlačnih merjenj lahko v osnovi delimo na merjenje vakuumu (tlaki po 1 barom) in tlaka (tlaki nad 1 barom). Merjenje tlakov običajno poteka neposredno po definiciji, za merjenje vakuumu pa izkoriščamo posredne metode, saj je sila na površino premajhna.

Tabela 6.12: Osnovne merilne metode za merjenje tlaka.

<b>merjenje višine tekočinskega stolpca znane gostote</b> (živo srebro)
<b>merjenje mehanske deformacije</b> membran, open, Bourdonovih cevi, itd (uporaba vzvodov, uporovnih lističev, kapacitivnih merilnikov, spremembe resonančne frekvence merilnega elementa...)
<b>posredne metode</b> (merjenje fizikalnih lastnosti, kot je toplotna prevodnost, ionizacija plina, viskoznost)

Za zelo široko območje tlakov od nekaj tisoč Pa do GPa se uporabljajo tlačne tehtnice s pomočjo pnevmatskih in hidravličnih sistemov. Srednje tlake merimo s tekočinskimi manometri in mehanskimi

merilniki.

Etaloni za najnižje tlake izkoriščajo proporcionalnost merjenega tlaka s številom molekul zraka v prostoru. Za merjenje zelo nizkih vakuumov med  $10^{-8}$  Pa in 100 Pa se uporablja metoda ionizacije zraka. Med vodnikom in kovinsko mrežico, ki obdaja prostor z neznanim tlakom, priključimo napetost. Napetost okoli 100 V ionizira zrak, steče tok ionov (nA), ki je proporcionalen številu molekul zraka v prostoru. Število molekul je proporcionalno merjenemu tlaku.

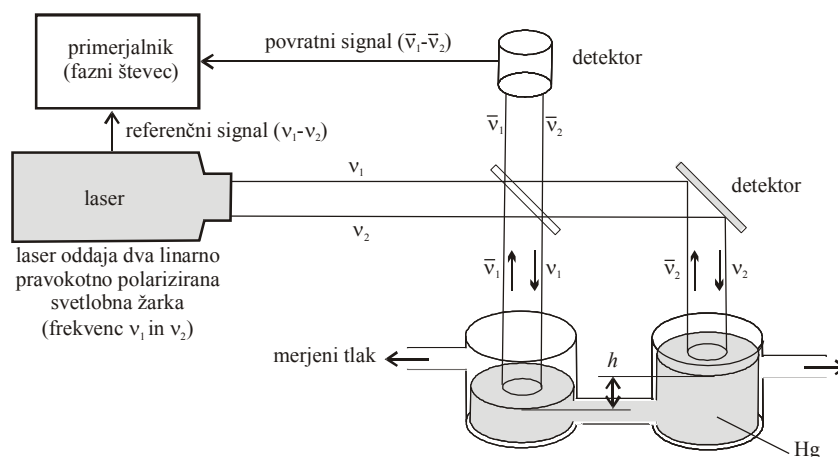
Za isto območje je bila razvita tudi metoda, ki temelji na sili trenja na vrtečo se kroglico. Kroglica se vrti v valju. Ko valj sunkovito zaustavimo, se kroglica zaradi centrifugalne sile vrti naprej. Število njenih vrtljajev je sorazmerno številu molekul zraka, to je tlaku, ki mu je izpostavljena.

## Realizacija pascala

Definicija tlaka kot sile na enoto površine je realizirana s primarnimi etaloni, kot so manometri s tekočinskimi stolpci in tlačne tehtnice. Ti inštrumenti realizirajo tlake od nizkega vakuumskega območja (100 Pa) do najmanj 1 GPa.

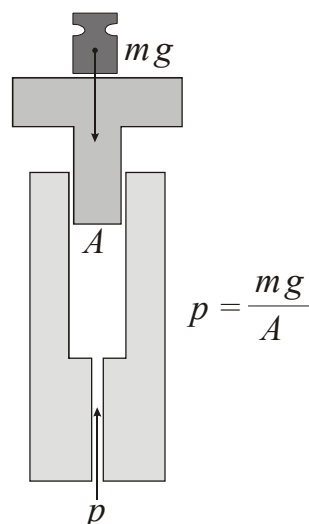
Realizacija s tekočinskimi manometri je osnovana na točnem poznavanju gostote uporabljene tekočine (živo srebro, voda), medtem ko realizacija s tlačno tehtnico vzpostavlja sledljivost neposredno na osnovne SI enote.

Slika 6.61: Princip delovanja tekočinskega U manometra, ki uporablja laserski interferometer za merjenje višine tekočinskega stolpca.



Tlačne tehtnice so najtočnejši inštrumenti za umerjanje elektronskih in mehanskih merilnikov tlaka. Uporabljajo se tudi kot etaloni za silo. Temeljijo na neposrednem merjenju tlaka v skladu z definicijo kot razmerju sile na površino. Osnovni del tehtnice sta bat in cilindar iz visokokvalitetnih materialov (volframov karbid). Bat je vstavljen v cilindar. Na bat nalagamo nemagnetne uteži iz nerjavečega jekla in s tem večamo silo (gravitacije) na spodnjo površino bata. Če dobro poznamo površino bata v cilindru, lahko iz razmerja sile teže in površine izračunamo tlak.

Slika 6.62: Shematični prikaz delovanja tlačne tehtnice. Utež je postavljena na bat, ki se tesno prilega cilindru, kamor dovajamo tlak, ki ga želimo meriti.



V praktični izvedbi merjeni tlak priključimo na spodnji del cilindra, na bat pa nalagamo uteži, dokler ni bat v ravnovesju. Takrat je razmerje sile teže in površine enako merjenem tlaku. Bat se tesno prilega cilindru, vendar med njima ni nobenega kontakta (minimizirana sila trenja), saj pretok plina poskrbi za konstantno zračno režo (okoli  $1 \mu\text{m}$ ) med njima. V ravnovesju bat prosto plava v toku plina, ki poskrbi tudi za njegovo točno centriranje v cilindru.

### Diseminacija pascala

Diseminacija enote za tlak poteka preko primarnih etalonov, če pa je to zaradi njihovih dimenzij ali tehnoloških potreb prezahtevno, se kot prenosniške etalone uporabljajo tlačne tehtnice, ker imajo dobro stabilnost metroloških lastnosti in visoko ločljivost ter ponovljivost.

## Kapacitivnost

### Definicija enote za kapacitivnost

Kondenzator je naprava za shranjevanje električnega naboja. Količina naboja, ki ga je mogoče v njem shraniti, je sorazmerna napetosti. Kapacitivnost (C) z enoto farad ( $F = \text{As}/\text{V}$ ) je definirana kot razmerje električnega naboja Q in napetosti U.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (6.34)$$

Enota farad je v praktičnih razmerah velika, zato se uporabljajo manjši deli enote – pikofarad ( $\text{pF} = 10^{-12} \text{ F}$ ) ali nanofarad ( $\text{nF} = 10^{-9} \text{ F}$ ).

### Realizacija in diseminacija farada

Realizacija farada trenutno poteka s pomočjo izračunljivega kondenzatorja. Leta 1956 sta Avstralca A. M. Thompson in D. G. Lampard razvila to posebno izvedbo kondenzatorja, katerega kapacitivnost je bila proporcionalna eni sami fizikalni veličini – dolžini.

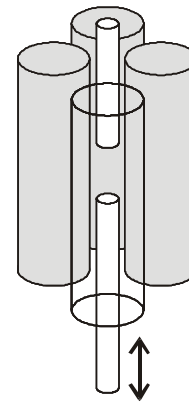
Štiri elektrode v obliki okroglih palic so postavljene v oglišča kvadrata tako, da se skoraj dotikajo. Izračunljiva kapacitivnost je kapacitivnost med obema srednjima elektrodama. Obe cevni elektrodi sta v osi

kondenzatorja in se jih lahko razmakne. Razdalja med njima je merilo za kapacitivnost.

Thompson in Lampard sta pokazala, da je sprememba kapacitete sorazmerna razdalji med osnima elektrodama in da je sorazmernostni faktor odvisen le od hitrosti svetlobe in permeabilnosti praznega prostora  $\mu_0$ .

Praktične izvedbe takih kondenzatorjev omogočajo razmik elektrod 50 cm, pri čemer se kapacitivnost spremeni za 1 pF. Razmik med elektrodama se meri z laserskim interferometrom.

Najboljše dosežene negotovosti pri določevanju kapacitivnost so okoli  $1 \times 10^{-8}$ .



Diseminacija kapacitivnosti poteka z različnimi izvedbami mostičnih vezij.

S pomočjo precizijskega merilnega mostička se izračunljivi kondenzator 10 nF pri frekvenci 1233 Hz lahko uporablja za kalibracijo kvantiziranega Hallovega upora, to je za določevanje von Klitzing konstante oziroma konstante finih struktur.

### **Realizacija farada v prihodnosti**

Trenutno potekajo raziskave kondenzatorja, ki bi temeljil na SET kvantnemu pojavu. Kondenzator bi lahko nabili s posamičnimi elektroni (100 milijonov elektronov bi pomenilo 16 pAs), njegovo napetost pa bi merili z Josephsonovim spojem.

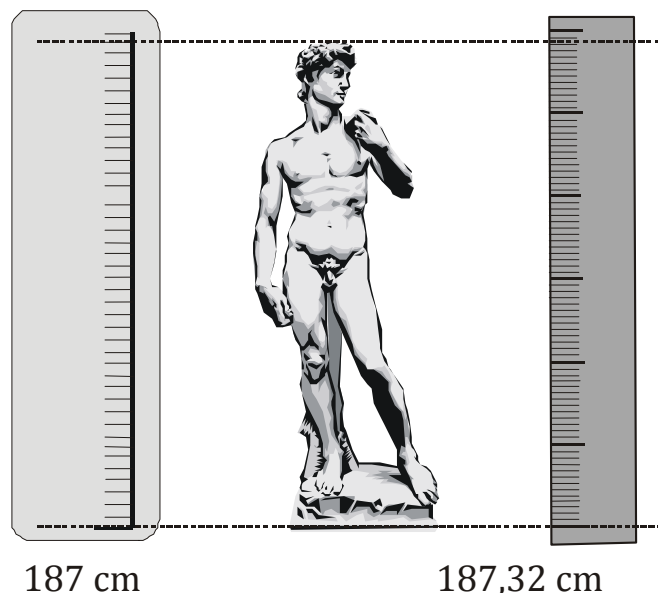
## 7. Izmerjena vrednost in merilna negotovost

### Uvod

Meritev je proces, v katerem se fizikalni veličini nekega objekta dodeli število in enota. Vsaka meritev je podvržena negotovostim. Merjeni fizikalni veličini nikoli ni možno pripisati prave vrednosti z absolutno točnostjo, zato imamo opravka z merilno negotovostjo, ki je po definiciji tisti nenegativni parameter, ki opisuje raztros vrednosti veličine in ki ga pripisujemo merjencu [1].

Merilni rezultat brez podatka o merilni negotovosti je pomanjkljiv rezultat. Merilna negotovost merilnega rezultata je edini način določanja, v kolikšni meri so različni rezultati v resnici različni (ali enaki). Kadar hočemo meriti z najmanjšo merilno negotovostjo, rabimo točno in zato drago opremo. Če postavimo previsoke zahteve, se nam lahko zgodi, da kupimo predrago opremo.

Slika 7.1: Meritev višine, izvedena z dvema tračnima meriloma z različno ločljivostjo. Odčitavanje skale je eden glavnih virov merilne napake. Desno merilo je opremljeno z bolj gostimi razdelki, ima zato večjo ločljivost in običajno manjšo merilno negotovost. Zato lahko z njim višino Davidovega kipa določimo z večjo točnostjo kot z levim merilom.



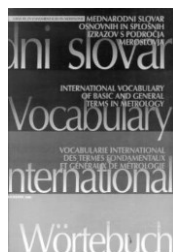
Glavni razlogi za uporabo točnih meritev so ekonomski razlogi. Čim bolj točne so meritve, tem manjše so merilne negotovosti in posledično manjše finančno tveganje.

Na primer, za določanje kakovosti zemeljskega plina in njegove cene so pomembne meritve, kot je merjenje pretoka zemeljskega plina znotraj plinovodov s pomočjo turbin, kemijska analiza plina in določanje kalorijske vrednosti plina.

Če za našo meritev velja, da uporabljamo G1600 turbinski merilnik pretoka plina ( $Q_{max}=2500 \text{ m}^3/\text{h}$ ), zemeljski plin s ceno 0,35 EUR/ $\text{m}^3$  pri tlaku enega bara, absolutni tlak 40 barov, da je srednja vrednost obremenjenosti 50 % in da je merilna napaka merilnika pretoka plina 0,1 %, lahko izračunamo, da napaka kazanja merilnika pretoka plina pomeni izgubo ali dobiček 17,5 EUR na uro, kar je pomeni približno 150 tisoč EUR na leto.

Pravilno ovrednotenje izvedene meritve omogočata le temeljita analiza uporabljene opreme in natančna analiza vseh negotovosti, ki se pojavijo pri merilnem procesu.

Pri procesu umerjanja ali kalibriranja naprave uporabljamo etalone. Merilna negotovost naprave, ki jo kalibriramo, v nobenem primeru ne more biti manjša od merilnih negotovosti uporabljenih etalonov.



Definicije vseh parametrov so povzete po Mednarodnem slovarju osnovnih in splošnih izrazov s področja meroslovja (VIM) (Vocabulaire International des Termes Fondamentaux et Généraux de Métrologie), ki je leta 2008 doživel tretjo izdajo. Ta zadnja izdaja še ni bila prevedena v slovenščino, tako da smo avtorji definicije v nadaljevanju poslovenili sami.

## Meritev in negotovosti

### Merilni sistem

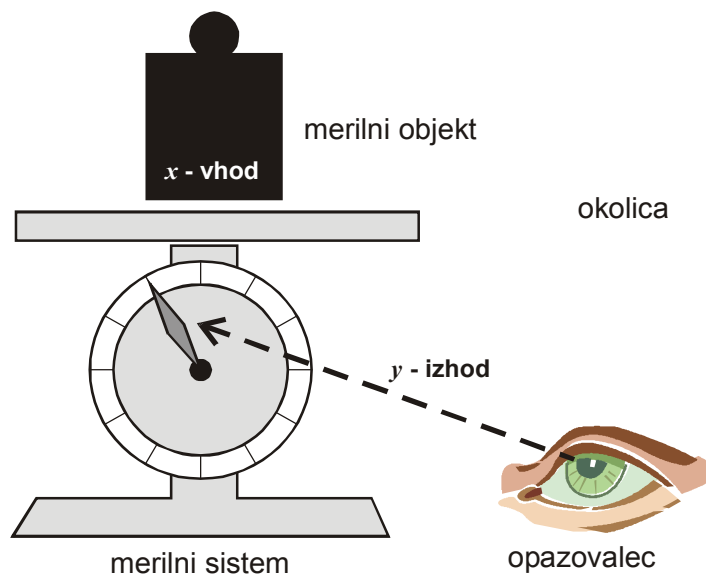
Merilni sistem si v večini primerov lahko predstavljamo kot zaporedje štirih procesov, in sicer zajemanja podatkov, prilagajanja podatkov, obdelovanja podatkov ter odčitavanja.



Slika 7.2: Merilni sistem.

### Meritev

Meritev je po VIM slovarju proces eksperimentalnega ugotavljanja ene ali več vrednosti določene veličine [1]. Pogoji okolja in osebe, ki izvajajo merilni proces, lahko vplivajo na merilni objekt in na merilni sistem (slika 7.3).



Slika 7.3: Merilni proces in vplivne veličine pri procesu tehtanja uteži.



## Umerjanje ali kalibracija

Umerjanje ali kalibracija je postopek, s katerim v prvem koraku pod določenimi pogoji vzpostavljamo povezavo med vrednostjo veličine z merilno negotovostjo, ugotovljeno z merilnim etalonom, ter pripadajočimi kazanji z merilno negotovostjo. V drugem koraku uporabimo to informacijo za pridobitev merilnega rezultata iz kazanja.

Viri negotovosti vplivajo na merilni sistem, merilni proces ali kalibracijski proces.

## Osnovni parametri v procesu merjenja po VIM slovarju [1]

Merjenje ni eksakten proces. Ponovitev meritve z uporabo iste ali različne opreme, postopka in izvajalca bo pripeljala do različnih rezultatov. Porazdelitev merilnih rezultatov je posledica spremembe vseh veličin, ki vplivajo na rezultat merilnega procesa. **Ponovljivost** predstavlja **merilno natančnost ali preciznost** pod nizom ponovljivih pogojev merjenja. Ponovljivi pogoji merjenja predstavljajo isti merilni postopek, istega izvajalca, isti merilni sistem, iste delovne pogoje ter lokacijo. Če je tem pogojem le delno zadoščeno, govorimo o **obnovljivosti**.

Prave vrednosti nikoli ne moremo izmeriti. **Prava vrednost** veličine je vrednost, ki ustreza definiciji določene veličine [1]. Je tista teoretična vrednost, ki bi jo dobili, če bi izločili popolnoma vse pomanjkljivosti v definicijah fizikalnih veličin, v merilnih procedurah in v merilnem procesu.

Najboljši približek pravi vrednosti običajno predstavlja srednja vrednost večjega števila meritev, čemur pravimo dogovorjena prava vrednost. **Dogovorjena prava vrednost ali referenčna vrednost** je vrednost, pripisana določeni veličini za določen namen [1].

**Merilna točnost** je ujemanje izmerjene vrednosti veličine s pravo vrednostjo veličine.

Točnost je povezana z **merilno negotovostjo**.

**Merilni pogrešek ali napaka meritve**  $E$  je izmerjena vrednost  $V_i$  minus referenčna vrednost merjene veličine  $V_N$ . Pogrešek lahko izrazimo kot absolutni pogrešek  $E$  ali relativni pogrešek  $e$ . Pogrešek je lahko sistematične ali pa naključne narave. Pogrešek lahko določimo s pomočjo umerjanja ali kalibracije.

$$E = V_i - V_N \quad e = \frac{V_i - V_N}{V_N} \quad (7.1)$$

**Sistematični pogrešek** je komponenta merilnega pogreška, ki pri ponavljanju meritev ostaja konstantna ali pa se spreminja na predvidljiv način (VIM). Ko poznamo sistematični pogrešek, lahko merilni rezultat z njim matematično kompenziramo oz. popravimo ali pa instrument namesto tega fizično naravnamo, tako da kaže pravilno brez sistematičnega pogreška.

**Korekcija ali popravek** tako predstavlja kompenzacijo za ocenjen sistematičen pogrešek. **Naravnavanje ali justiranje** pa, zopet po definiciji iz VIM, predstavlja niz operacij, ki jih izvedemo na merilnem sistemu, tako da zagotovimo predpisan prikaz, ki ustreza dani vrednosti merjene veličine.

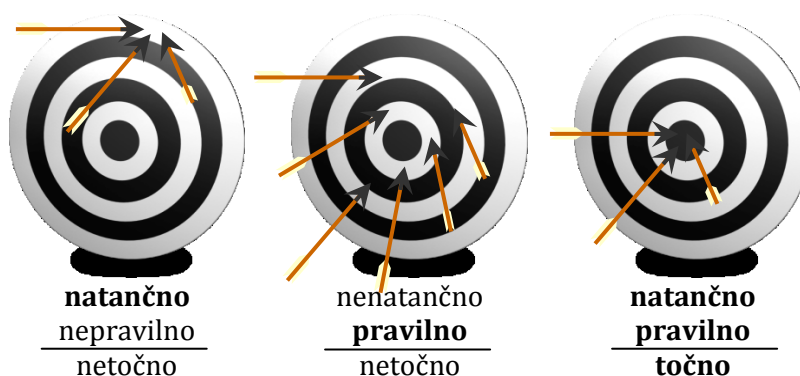
**Naključni pogrešek** je komponenta merilnega pogreška, ki se pri ponavljanju meritev spreminja na nepredvidljiv način.

Merilni pogrešek izračunamo kot vsoto sistematičnega pogreška in naključnega pogreška.

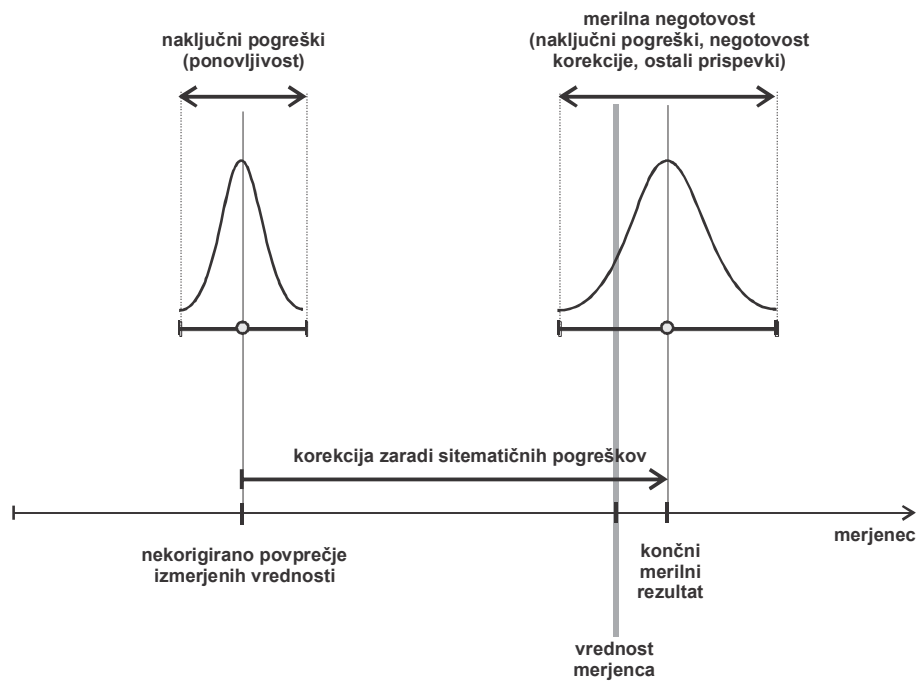
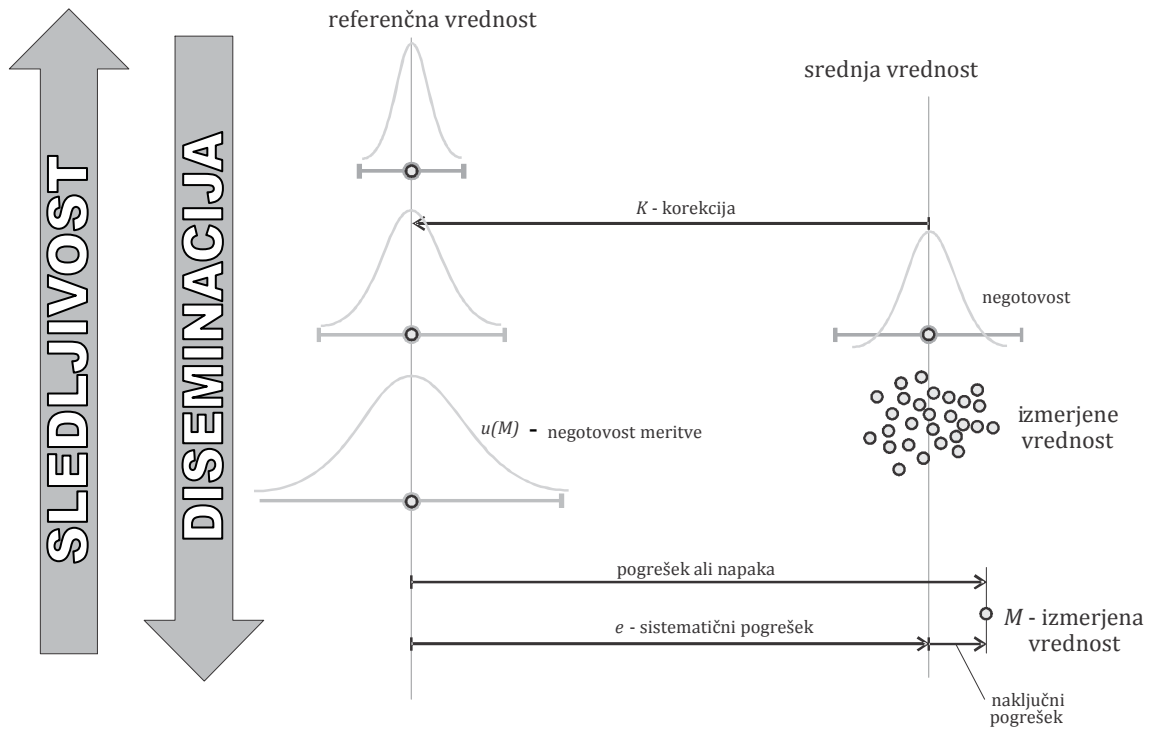
Z različnimi vrstami pogreškov sta povezani tudi **natančnost in točnost**. Če za neko npr. meritev rečemo, da je natančna, je to kvalitativen opis in lahko pomeni le, da je bolj natančna od neke druge, ne podaja pa neke oprijemljive absolutne lastnosti. Zato uporabljamo statistične izraze, kot so pogrešek, standarden raztros, negotovost idr.

Konkretno z natančnostjo opišemo tiste meritve, ki imajo majhen naključni pogrešek. S točnostjo opišemo tiste, ki imajo majhen skupen pogrešek. Kljub temu dvema tradicionalnima izrazoma se lahko zgodi, da so npr. meritve nenatančne in netočne, medtem ko pa je sistematični pogrešek zelo majhen. Ker ta prav gotovo tudi govori o kakovosti meritve, nam manjka izraz, ki bi dopolnil tradicionalen natančen-točen sistem. Novi VIM [1] tako navaja nov izraz, **pravilnost** (*trueness*), ki po definiciji pomeni ujemanje povprečne vrednosti neskončnega števila ponovitev izmerjene vrednosti veličine z referenčno vrednostjo veličine.

Točnost logično sledi takrat, kadar je meritev hkrati natančna in pravilna.



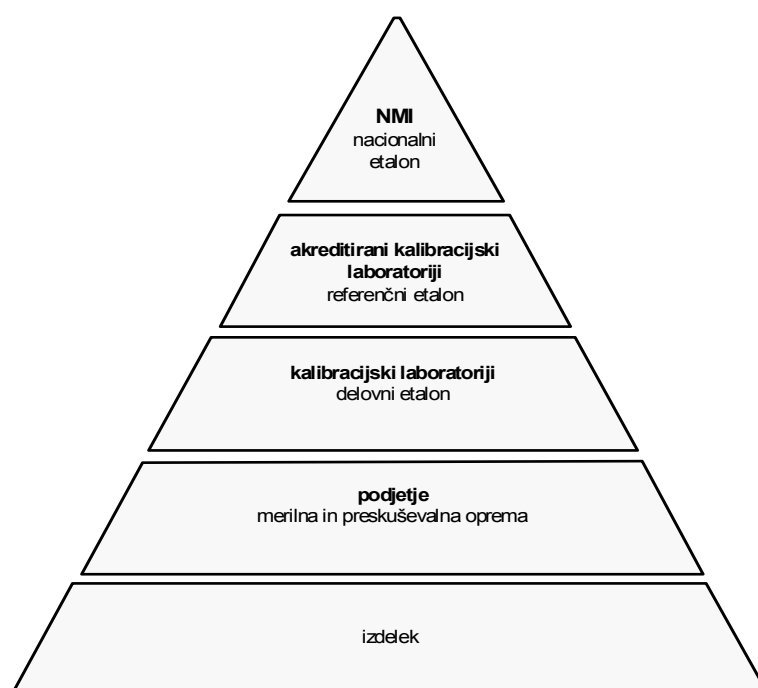
Slika 7.4: Primer opisa merjenja pri streljanju z lokom na tarčo



Slika 7.5: Osnovni parametri v procesu merjenja. Merilna negotovost meritve je sestavljena iz številnih prispevkov, ne samo iz ponovljivosti merjenja, ampak tudi iz naključnih pogreškov, korekcij in podobno.

## Sledljivost

Sledljivost je eden izmed osnovnih pojmov meroslovja. V Evropi in Sloveniji je v uporabi definicija sledljivosti po zadnji izdaji Mednarodnega slovarja osnovnih in splošnih izrazov v meroslovju [1]. Slovar je med drugim namenjen meroslovnim in preskusnim laboratorijem za zagotavljanje sledljivosti izvedenih meritev v skladu z zahtevami standarda ISO/IEC 17025 in organom za certificiranje sistemov kakovosti v skladu s serijo standardov ISO 9000 kot pomoč presojevalcem v ugotavljanju skladnosti dobaviteljevega sistema kakovosti z zahtevami zadevnega standarda (predvsem pri interpretaciji ISO 9001/2, tč. 4.11). Definicija je v skladu s prakso Evropske akreditacije – EA (European Accreditation).



Slika 7.6: Metrološka piramida. Na vrhu je nacionalni meroslovni institut, nosilec nacionalnega etalona.

**Sledljivost** je lastnost merilnega rezultata ali vrednosti etalona, ki omogoča navezavo na navedene reference, ponavadi nacionalne ali mednarodne etalone, skozi neprekinjeno verigo primerjav, ki imajo vse opredeljene negotovosti [1].

Vrednosti referenc (etalonov), njihove negotovosti in korekcije ter negotovosti povezane z merilnim sistemom lahko vsebujejo tudi časovno odvisne komponente. Zato je v primernih intervalih potrebno zbrati dokaze o tej časovni odvisnosti in to upoštevati pri obdelavi meritev. Namen sledljivost je zagotoviti, da lahko meritve na koncu sledljivostne verige zapišemo z SI enotami in jim pravilno pripišemo negotovost. Take meritve so točne, časovno stabilne in primerljive z meritvami, ki so izvedene z drugimi metodami.

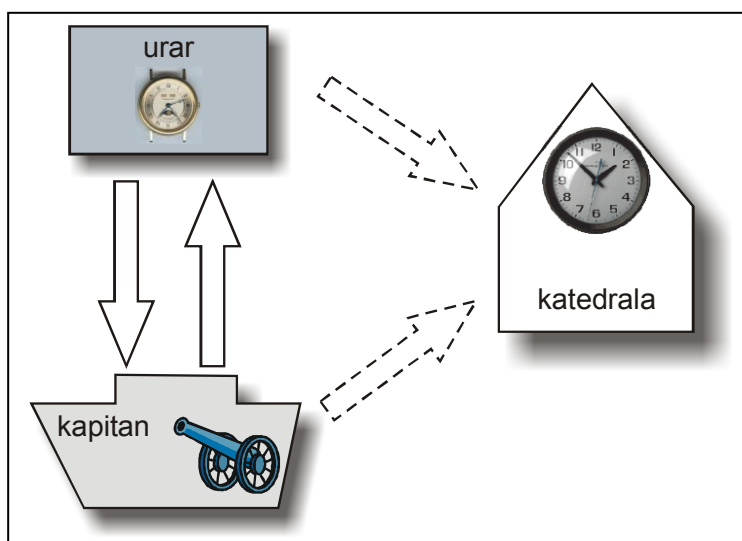
### Zanzibarski urar in sledljivost

Na obali afriškega Zanzibarja je bila privezana ladja. Na tej ladji je mirno živel ostareli kapitan. Njegova edina zadolžitev je bila, da je vsak dan točno opoldne sprožil bronasti ladijski top. Glasen pok se je slišal v vasi na obali in vsi prebivalci so vedeli, da je ura točno dvanajst. Ob topovskem strelu so si lahko tudi nastavljali svoje hišne ure.

Bilo je zelo pomembno, da se je top vedno oglasil točno opoldne. V ta namen je vestni kapitan vsako jutro izvedel posebne priprave. Poskrbel je, da je bil top petnajst minut pred dvanajsto napolnjen in pripravljen na sprožitev. Potem je stal ob topu s svojo srebrno uro na verižici v roki in sprožil top točno ob dvanajsti uri. Pomemben del njegovih priprav je bil tudi sprehod do vasi. Tam je pri vaškemu urarju preveril svojo srebrno uro in jo vestno naravnal točno po uri v izložbenem oknu. Nato se je sprehodil nazaj do ladje.

Urar je seveda vse svoje ure naravnal glede na pok topa, saj je vedel, da je tedaj ura točno dvanajst...

Primer nam nazorno prikaže pomen sledljivosti. Če bi urarjeva ura zaostala vsak dan eno minuto, bi se top oglasil vsak dan minuto kasneje. To seveda ne bi trajalo dolgo časa, kajti na srečo sonce na Zanzibaru vedno zaide ob približno enakem času. Najbolj praktična metoda bi bila, če bi urar in kapitan naravnavała svojo uro glede na uro stare zanzibarske katedrale, za katero je menda znano, da je zelo točna. Tako bi bili uri kapitana in urarja sledljivi na uro katedrale.



Pri večini meritev je najvišja teoretična referenca merilnega rezultata SI definicija enote. V praksi so meritve sledljive na nacionalni laboratorij NMI, ki vzdržuje realizirano enoto. Tak način podajanja sledljivosti je praktičen in predstavlja verigo merilnih primerjav (kalibracij) v posamični državi (slika 7.6).

Določene fizikalne veličine so definirane kot razmerje dveh primerljivih veličin (relativna permeabilnost, odbojnost...). Te brezdimenzijske veličine so podane kot števila, vendar se sme uporabiti izraz "sledljivo na nacionalni laboratorij", če obstoji primerno dokumentirana veriga primerjav na podobne meritve nacionalnega laboratorija.

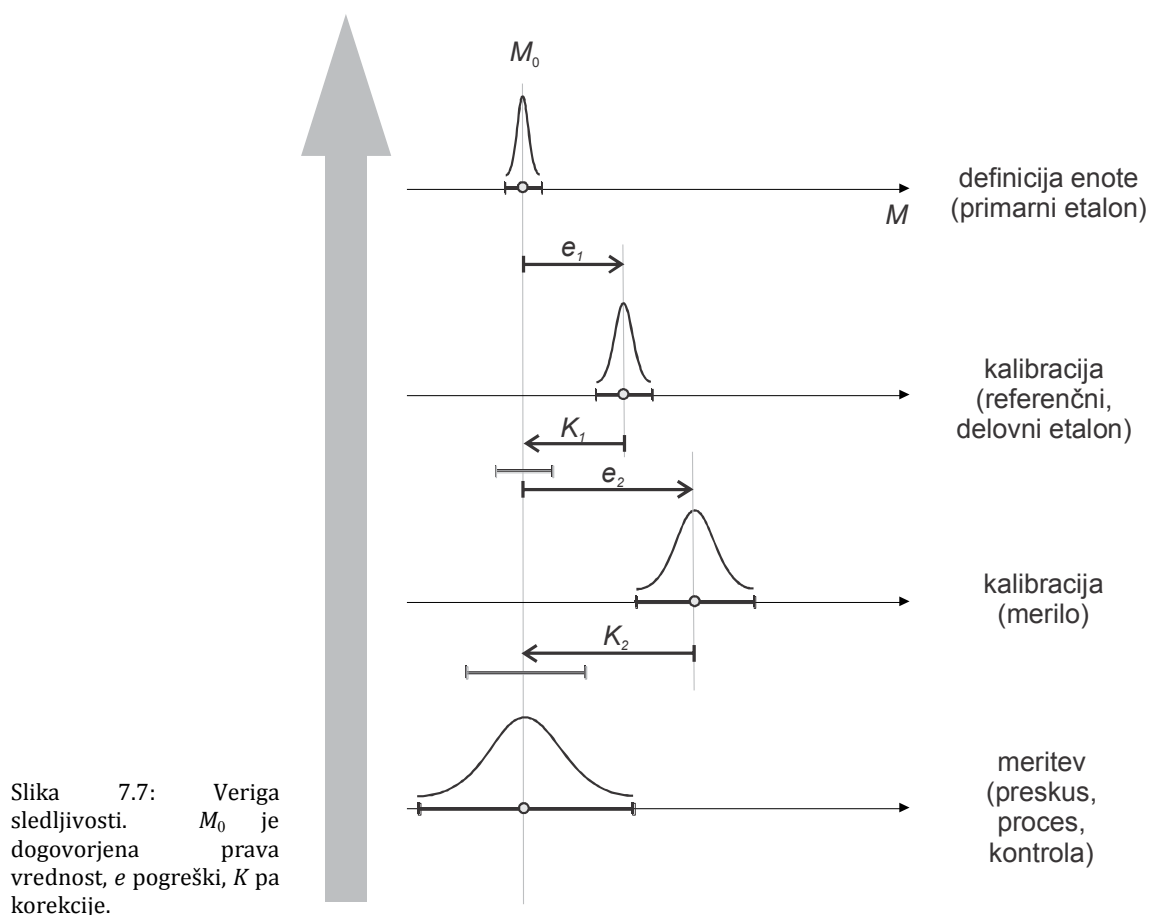
Za meritve množine snovi velja, da sledljivost na SI enoto mol zaradi ogromnega števila različnih snovi, ki bi morale biti medsebojno primerjane, ni praktično izvedljiva s primerjavami s fizičnim artefaktom. Namesto tega je dogovorjeno, da je sledljivost na SI lahko dosežena z meritvami, ki temeljijo na primarnih metodah, so pravilno izvedene in imajo podane negotovosti. Primarne metode so definirane kot metode najvišje metrološke kvalitete, katerih postopki so popolnoma opisani in razloženi, za katere so znani vsi prispevki negotovosti v obliki SI enot in katere rezultati so sprejeti brez reference na etalon iste fizikalne veličine.

Primer verige sledljivosti je prikazan na sliki 7.7. Na sliki predstavlja  $M_0$  dogovorjeno pravo vrednost, ki pripada enoti po njeni definiciji in se realizira s pomočjo primarnega etalona. Prenos vrednosti ali diseminacija se navzdol po metrološki piramidi vrši s pomočjo kalibracije, kjer se vrednost primarnega etalona prenese na delovni etalon, ki lahko istočasno predstavlja referenčni etalon, če je to na primer najboljši etalon nekega laboratorija.

Pri kalibraciji delovnega etalona, ki se ga primerja s primarnim etalom, običajno pride do pogreška  $e$  delovnega etalona, ki je določen kot razlika med izmerjeno vrednostjo in pravo vrednostjo merjene veličine. Pogrešek lahko odpravimo z naravnavanjem ali justiranjem, ali pa s podajanjem ustrezne vrednosti korekcije. V obeh primerih naredimo določen prispevek k skupni negotovosti. Prispevek negotovosti zaradi korekcije oziroma justiranja je negotovost tipa B in ga je treba pravilno ovrednotiti.

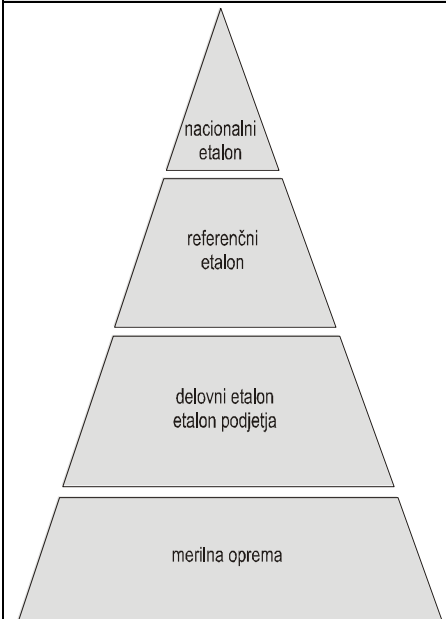
Vsi postopki se ponovijo, ko se prenos vrednosti vrši naprej iz delovnega etalona na merilo, ki je prispelo v kalibracijo. Ne glede na to, ali so potrebne korekcije po absolutni vrednosti večje ali manjše, je negotovost pri vsakem naslednjem prenosu vedno večja.

Čeprav je definicija po VIM najbolj razširjena, so v uporabi tudi druge definicije sledljivosti. Po ameriškem standardu USA MIL STD 42662A je sledljivost zmožnost navezovanja posameznih merilnih rezultatov skozi nepretrgano verigo na enega ali več od naslednjih etalonov, lastnosti, postopkov: nacionalnih etalonov, ki jih vzdržuje nacionalni metrološki institut (v ZDA, NIST), osnovnih naravnih fizikalnih konstant, ki jim je vrednosti pripisal ali jih sprejel nacionalni metrološki institut, kalibracijskih postopkov, ki temeljijo na merjenju razmerja (brez enot), primerjav na dogovorni etalon, nacionalnih etalonov drugih držav, ki so korelirani z nacionalnimi etaloni lastne države.



V praksi sledljivost ne pomeni zgolj posedovanje certifikata z logotipom nekega laboratorija oziroma ustanove, kajti le-ta sam po sebi še ne zagotavlja, da so bile meritve izvedene korektno. To zagotovilo nam dandanes predstavlja akreditacija nekega laboratorija, ki temelji na ugledu akreditacijske ustanove. Akreditacijska ustanova podeli akreditacijo na osnovi uspešno opravljene presoje laboratorija ter njegovega osebja. Vse akreditacijske ustanove ne postavljajo enakih zahtev za pridobitev akreditacije, zato so za nas posebnega pomena tiste, ki sledijo navodilu ISO/IEC 17025, v katerem so podane zahteve tehničnih kompetenc za kalibracijske in preskusne laboratorije, ki so hkrati del standardov za zagotavljanje kakovosti ISO 9000. V Sloveniji je akreditacijska ustanova Slovenska akreditacija.

Tabela 7.1: Tabela etalonov in institucije, ki so vključene v delovanje metrološke piramide.

etaloni (merilna oprema)	odgovornost	naloge	osnova delovanja	dokumentacija kalibracije
 <p>nacionalni etalon</p>	nacionalni metrološki institut (NMI)	vzdrževanje in diseminacija nacionalnih etalonov	z zakonom predpisana dolžnost predstavljati SI enote in zagotavljati mednarodno primerljivost	kalibracijski certifikat za referenčne in delovne etalone, certifikat podjetja ali preskusna oznaka za preskusno opremo
referenčni etalon	akreditirani kalibracijski laboratorij	varovanje metrološke infrastrukture države	kalibracijski certifikat NMI ali drugega akreditiranega laboratorija	kalibracijski certifikat za delovne etalone ali etalone podjetja, kalibracijski certifikat podjetja ali preskusna oznaka za preskusno opremo
delovni etalon etalon podjetja	kalibracijski oddelek podjetja	nadzorovanje preskusne opreme za potrebe podjetja	kalibracijski certifikat NMI ali drugega akreditiranega laboratorija	kalibracijski certifikat podjetja ali preskusna oznaka za preskusno opremo
merilna oprema	vsi deli podjetja	meritve in preskusi kot del zagotavljanja kakovosti	kalibracijski certifikat podjetja, preskusna oznaka	preskusna oznaka

### Sledljivost laboratorijev

Vsa oprema, ki jo dobavitelj (kalibracijski ali preskusni laboratorij, stranka v postopku presoje in certificiranja sistema kakovosti) uporablja za preskuse, kalibracije in meritve za dokazovanje skladnosti z dogovorjeno zahtevo, vključno z opremo za pomožne meritve (na primer pogojev okolja), ki ima pomemben vpliv na točnost preskusa, kalibracije, vzorčenja, ali merilnega rezultata na sploh, mora biti kalibrirana ali preverjena, preden se da v uporabo. Laboratorij mora imeti vzpostavljeno politiko in postopke za kalibracijo in verifikacijo svoje opreme, vključno z referenčnimi materiali in referenčnimi etaloni.

Dobavitelj mora vzdrževati dokumentirane zapise o tem, da je bila izvedena vsaka kalibracija v verigi sledljivosti (ISO 10012-1, 4.15).

### Sledljivost kalibracijskih laboratorijev

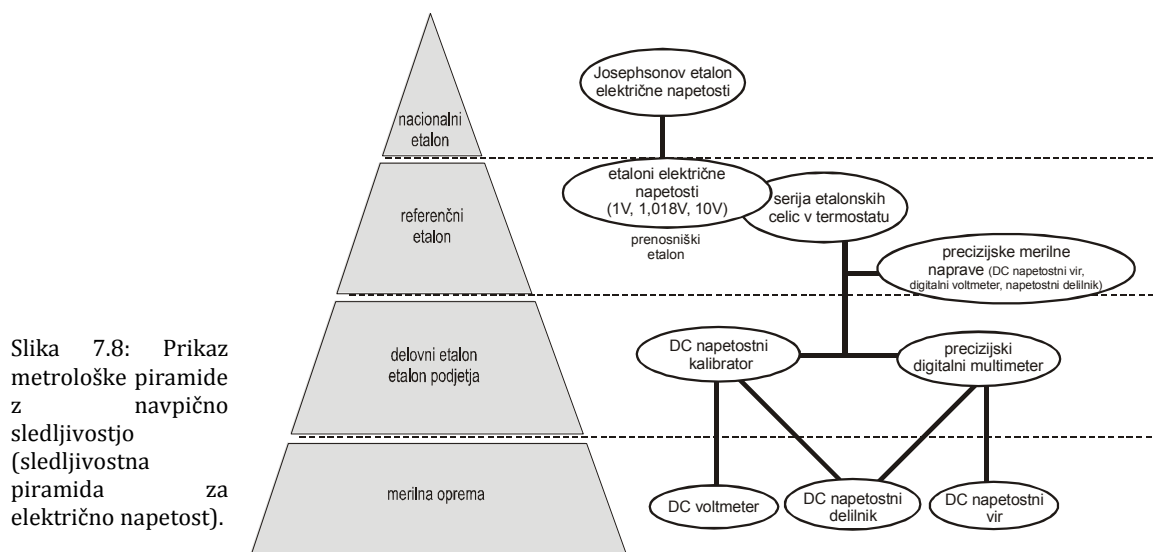
Kalibracijski laboratorij mora imeti takšen program kalibracij opreme, ki zagotavlja, da so vse kalibracije in meritve, ki jih laboratorij opravi, sledljive do SI enot ali izvedene iz naravnih fizikalnih konstant.

Sledljivost dokazuje s certifikati o kalibracijah, ki jih je pridobil od organizacij, ki lahko dokažejo svojo usposobljenost. Usposobljene organizacije so nacionalni meroslovni laboratoriji in akreditirani kalibracijski laboratoriji, ki so akreditacijo pridobili od mednarodno priznanega akreditacijskega telesa.

Certifikati o kalibracijah morajo skozi nepretrgano verigo kalibracij dokazovati, da obstoji povezava do primarnih etalonov ali navezava na naravne konstante, s katerimi se realizirajo enote SI sistema. Vsebovati morajo merilne rezultate, vključno z merilno negotovostjo in, če je zahtevano, tudi izjavo o ustreznosti glede na prepoznavno meroslovno specifikacijo.



Akreditirani laboratoriji pogosto opravljajo tudi neakreditirane kalibracije. Dogovorjeno je, da veljajo kot sledljivi le tisti kalibracijski certifikati, ki vsebujejo tudi logotip ene od akreditacijskih služb z dogovorjenega seznama nacionalnih meroslovnih laboratorijev in akreditacijskih teles za kalibracijske laboratorije, katerih certifikati o kalibracijah izkazujejo sprejemljivo sledljivost. Prav tako se kot dokaz sledljivosti sprejemajo samo originalni certifikati navedenih tujih nacionalnih kalibracijskih laboratorijev, ne pa drugi certifikati, na primer z navedbo "sledljivo na NIST" ali podobno.



### Sledljivost pri preskušanju proizvodov

Za merilno opremo, ki se uporablja pri preskušanju, veljajo iste zahteve kot za kalibracijsko opremo, razen če se ugotovi, da merilna negotovost, povezana s kalibracijo, zanemarljivo malo vpliva na preskusni rezultat. V tem primeru je dovoljeno uporabljati druge metode za zagotavljanje zaupanja v preskusne rezultate.

Kjer v praksi sledljivost do enot SI sistema ni mogoča ali ni relevantna, se uporabijo drugi načini za zagotovitev zaupanja v preskusne rezultate, kot na primer:

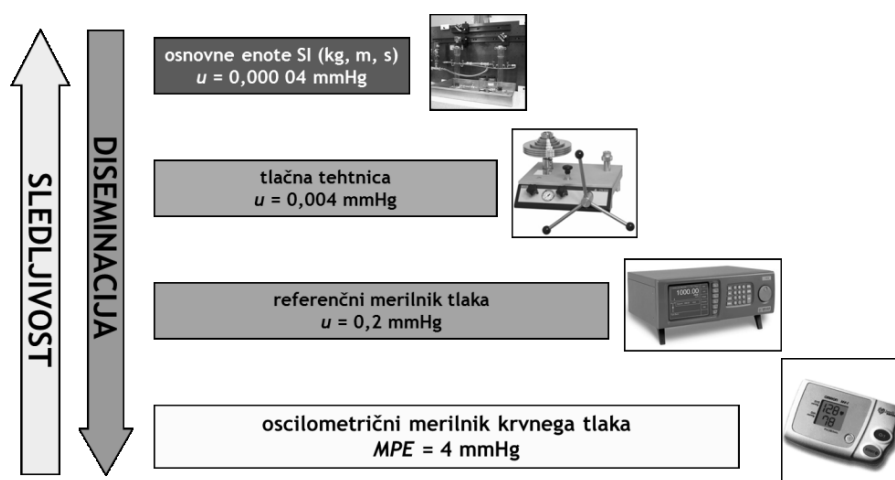
- sodelovanje v programih medlaboratorijskega primerjalnega preskušanja ali drugih preskusov usposobljenosti (proficiency testing);
- uporaba certificiranih referenčnih materialov (certificiranje dokazuje, da so bili primerno karakterizirani, t.j. da so bile njihove lastnosti pravilno določene);
- dodatni preskus z drugo metodo;
- dogovorni etaloni, ki so jasno opredeljeni in ki jih vse vpletene stranke sprejemajo.

### Zagotavljanje sledljivosti na mednarodno raven

Sledljivost do nacionalnih etalonov se lahko zagotovi neposredno s kalibracijo v nacionalnem meroslovnem laboratoriju ali pa posredno preko akreditiranega kalibracijskega laboratorija.

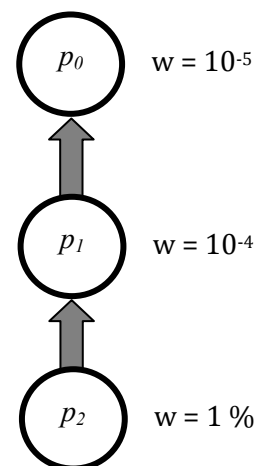
Veljavna sledljivost se lahko zagotovi tudi v tujih nacionalnih metroloških institutih, ki jih priznava EA in v laboratorijih, akreditiranih s strani akreditacijskih organov, članov EA, ki imajo podpisan multilateralni sporazum o medsebojnem priznavanju certifikatov o kalibraciji (MRA – Mutual Recognition Agreement s strani 14).

Slika 7.9: Navpična sledljivostna shema merjenja krvnega tlaka v Laboratoriju za metrologijo in kakovost Univerze v Ljubljani, Fakultete za elektrotehniko.



### Zagotavljanje sledljivosti fizikalne veličine s pomočjo iste fizikalne veličine

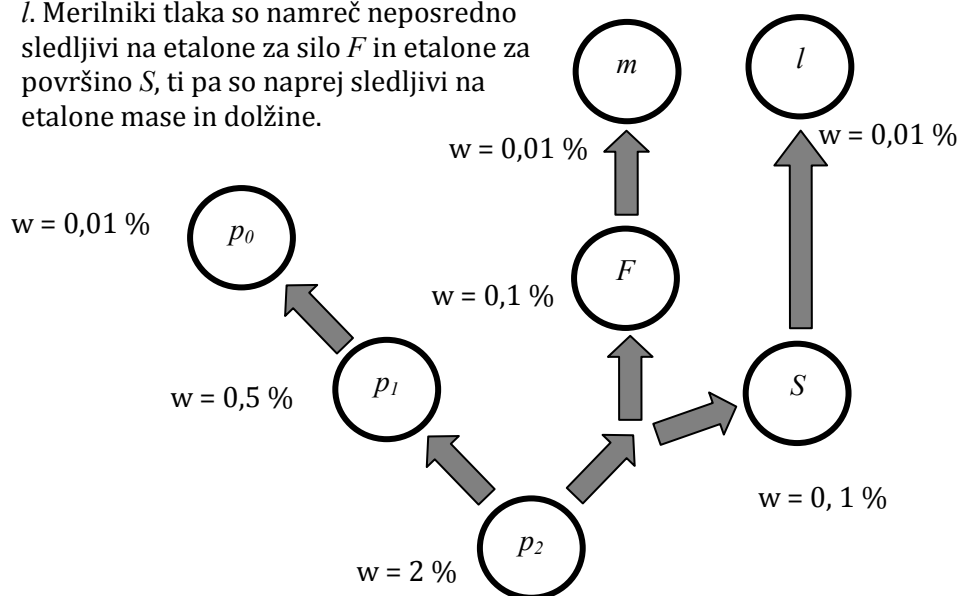
Izhajajoč iz VIM definicije sledljivosti ugotovimo, da v praksi lahko nastopajo različne oblike sledljivosti. Najbolj pogosta je neposredna navezava etalonov določene fizikalne veličine na etalone iste fizikalne veličine, ki pa so na višjem hierarhičnem nivoju metrološke piramide. Tako obliko bi s stališča zagotavljanja sledljivosti fizikalne veličine s pomočjo iste fizikalne veličine lahko poimenovali *neposredna sledljivost*. Etaloni na metrološko nižjem nivoju so umerjeni s pomočjo etalonov na višjem nivoju. Ena izmed glavnih značilnosti višjih etalonov je manjša merilna negotovost. Postopek prenosa vrednosti fizikalne veličine ali z drugo besedo postopek umerjanja prinese dodatne negotovosti v meritev. Zato je negotovost umerjanega etalona vedno večja od negotovosti referenčnega etalona.



### Zagotavljanje sledljivosti fizikalne veličine s pomočjo drugih fizikalnih veličin

Druga pogosta oblika zagotavljanja sledljivosti izkorišča posredno navezavo etalonov določene fizikalne veličine na etalone druge fizikalne veličine. Tako obliko bi lahko s stališča zagotavljanja sledljivosti fizikalne veličine s pomočjo drugih fizikalnih veličin poimenovali tudi *posredna sledljivost*.

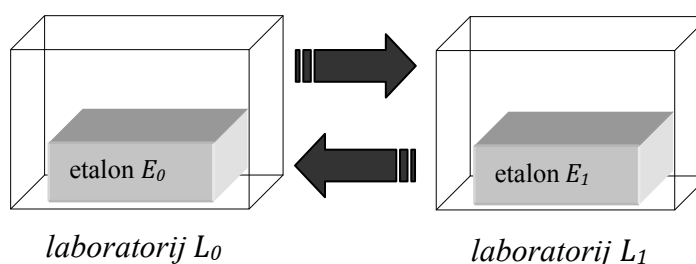
Primer take oblike je sledljivost etalonov za tlak. Merilniki tlaka so lahko sledljivi neposredno na metrološko višje referenčne tlačne etalone, ki realizirajo to fizikalno veličino. V praksi pa se pojavlja tudi druga oblika sledljivosti tlačnih etalonov (spodnja slika). Ta izkorišča dejstvo, da je tlak izpeljana fizikalna veličina, ki je definirana z razmerjem dveh osnovnih SI veličin, mase  $m$  in dolžine  $l$ . Merilniki tlaka so namreč neposredno sledljivi na etalone za silo  $F$  in etalone za površino  $S$ , ti pa so naprej sledljivi na etalone mase in dolžine.



Sledi, da so merilniki tlaka posredno sledljivi na etalone mase in dolžine.

### Vpliv medsebojne odvisnosti negotovosti fizikalnih veličin na sledljivost

Vpliv medsebojne odvisnosti dveh fizikalnih veličin na sledljivost nastopi lahko razložimo na primeru dveh laboratorijev, in sicer laboratorija  $L_0$ , ki vzdržuje etalon določene fizikalne veličine  $E_0$ , in laboratorija  $L_1$ , ki hrani etalon druge fizikalne veličine  $E_1$ . V obeh laboratorijih kot ena vplivnih veličin pri definiciji etalona nastopa tudi fizikalna veličina, ki je definirana z etalomom iz drugega laboratorija.



Skupna merilna negotovost  $u(E_0)$  vzdrževanega etalona  $E_0$  je sestavljena iz več prispevkov. Eden od prispevkov je tudi vpliv

merilne negotovosti vplivnega etalona iz drugega laboratorija  $u(E_1)$ .

Vpliv merilne negotovosti vplivnega etalona  $E_1$  na negotovost vzdrževanega  $E_0$  je lahko različen. Negotovost etalona  $E_1$  lahko močno vpliva na negotovost  $E_0$ , lahko pa je njen vpliv neznamenit in zanemarljiv.

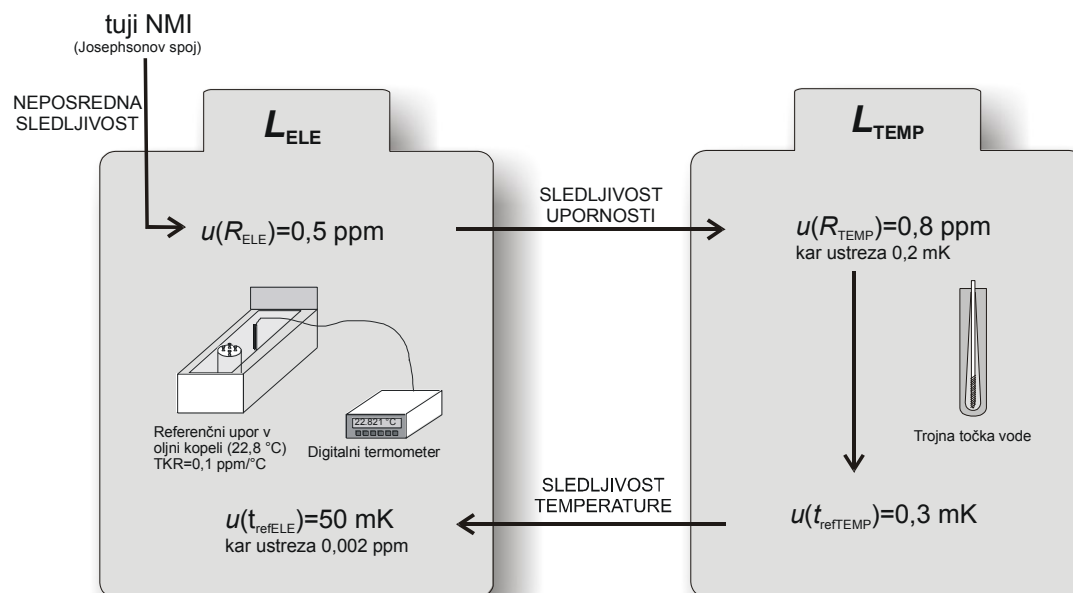
### Primer medsebojne odvisnosti na sledljivosti

Primer posredne sledljivosti je medsebojna sledljivost nosilca etalona za električne veličine, laboratorija  $L_{ELE}$ , in nosilca etalona za termodinamično temperaturo, laboratorija  $L_{TEMP}$ .

Laboratorij  $L_{ELE}$  hrani etalonski upor  $R_{ELE}$ , ki je neposredno sledljiv na tujo metrološko institucijo NMI. V NMI s pomočjo kvantnega Josephsonovega pojava periodično opravljajo umerjanje referenčnega upora  $R_{ELE}$  z negotovostjo 0,5 ppm (ppm = parts per million =  $10^{-6}$ ). Laboratorij  $L_{ELE}$  s pomočjo referenčnega upora  $R_{ELE}$  umeri referenčni upor temperaturnega laboratorija  $R_{TEMP}$ . Temperatura oljne kopeli, v kateri poteka umerjanje, je eden od vplivnih parametrov pri umerjanju uporov, zato laboratorij  $L_{ELE}$  z digitalnim termometrom beleži temperaturo kopeli.

Laboratorij  $L_{TEMP}$  se ukvarja z umerjanjem termometrov. S pomočjo svojega referenčnega upora  $R_{TEMP}$  lahko z absolutno negotovostjo 50 mK umeri digitalni termometer, ki ga  $L_{ELE}$  uporablja pri svojih kalibracijah.

Prispevek merilne negotovosti zaradi merjenja temperature oljne kopeli, v kateri je referenčni upor  $R_{ELE}$ , je torej neposredno odvisen od merilne negotovosti, ki jo poda  $L_{TEMP}$ .



Slika 7.10: Primer medsebojne sledljivosti laboratorija  $L_{ELE}$ , nosilca etalona za električne veličine, in laboratorija  $L_{TEMP}$ , nosilca etalona za termodinamično temperaturo. Vpliv  $R_{TEMP}$  na negotovost kalibriranja v trojni točki vode je 0,2 mK.  $u(t_{refELE})$  pomeni prispevek zaradi temperaturnega vpliva na negotovost referenčnega upora  $R_{ELE}$  in znaša 0,002 ppm.

Negotovost referenčnega upora  $R_{ELE}$  je sestavljena iz številnih prispevkov  $u(A_i)$ , med drugim tudi iz prispevka merilne negotovosti digitalnega termometra, umerjenega v  $L_{TEMP}$ ,  $u(t_{refELE})$ ,

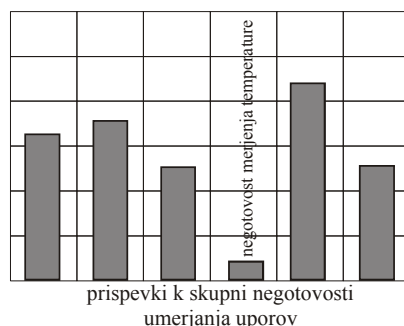
$$u(R_{ELE}) = \sqrt{u^2(A_1) + u^2(A_2) + u^2(A_3) \dots + u^2(t_{refELE})}$$

Negotovost temperature trojne točke vode  $u(t_{refTEMP})$  je prav tako sestavljena iz številnih prispevkov  $u(B_i)$ , med drugim tudi iz prispevka negotovosti kalibracije upora  $R_{TEMP}$ , ki ga je podal  $L_{TEMP}$ .

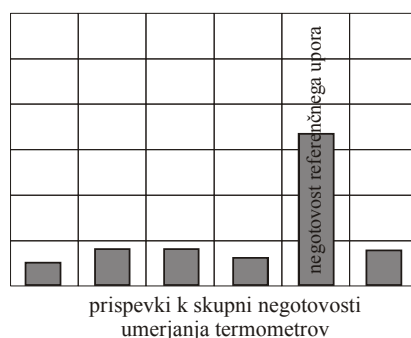
$$u(t_{refTEMP}) = \sqrt{u^2(B_1) + u^2(B_2) + u^2(B_3) \dots + u^2(R_{TEMP})}$$

V okviru medsebojne sledljivosti nastopata dve merilni negotovosti. V temperaturnem laboratoriju je negotovost umerjanja termometrov v trojni točki vode 0,3 mK. Od tega je 0,2 mK prispevek negotovosti referenčnega upora  $R_{TEMP}$ . V električnem laboratoriju pa lahko umerjajo električne upore z merilno negotovostjo 0,5 ppm, pri čimer je prispevek zaradi temperaturnega vpliva na negotovost referenčnega upora  $R_{ELE}$   $u(t_{refELE})$  le 0,002 ppm.

Slika 7.11: Shematični prikaz velikosti posameznih prispevkov k skupni negotovosti umerjanja električnih uporov v laboratoriju za električne veličine  $L_{ELE}$ .



Slika 7.12: Shematični prikaz velikosti posameznih prispevkov k skupni negotovosti umerjanja termometrov v laboratoriju za termometrijo  $L_{TEMP}$ .



Lahko ugotovimo, da je vpliv etalona, ki ga vzdržuje  $L_{TEMP}$ , zelo majhen v primerjavi s celotno merilno negotovostjo referenčnega upora laboratorija za električne veličine  $R_{ELE}$ . Nasprotno je skoraj celotna merilna negotovosti referenčnega upora  $R_{TEMP}$  sestavljena iz merilne negotovosti  $R_{ELE}$ .

## 8. Zapis rezultata meritve

### Zapis rezultata meritve

Rezultat meritve v splošnem podamo z izmerjeno vrednostjo  $M_m$  in negotovostjo meritve  $u(M)$ . Negotovost lahko zapišemo na dva načina – v absolutni in relativni obliki.

Rezultat meritve dolžine  $M = 2,0345$  m zapišemo na dva načina:

- v absolutni obliki nastopa **absolutna negotovost  $u(M)$** , ki ima iste enote kot merjena veličina.  $K = 0,0030$  m je korekcija rezultata.

$$M = M_m + K$$

$$u(M)$$

$$M = 2,0345 \text{ m} + 0,0030 \text{ m} = 2,0375 \text{ m}$$

$$u(M) = 0,0041 \text{ m} = 4,1 \text{ mm}$$

- **Relativna negotovost  $w(M)$**  je določena kot razmerje absolutne negotovosti  $u(M)$  in vrednosti merjene veličine  $M_m$ . Relativna negotovost  $w(M)$  je vedno veličina brez enot. Včasih relativno negotovost zapišemo v odstotkih.

$$M = M_m + K$$

$$w(M)$$

$$M = 2,0345 \text{ m} + 0,0030 \text{ m} = 2,0375 \text{ m}$$

$$w(M) = 0,0020 = 20 \times 10^{-4} = 0,20 \%$$

V splošnem lahko merilni rezultat zapišemo v naslednji obliki:

$$M = (2,0345 + 0,0030 \pm 0,0082) \text{ m}$$

$$k = 2, p = 95,5 \%$$

Rezultat je sestavljen iz povprečja izmerjenih vrednosti (2,0345), korekcije povprečja (0,0030), razširjene negotovosti (0,0082) in enote (m). Razširjeno negotovost izračunamo kot zmnožek standardne negotovosti (0,0041 m) in faktorja razširitve  $k$  (v našem primeru je  $k = 2$ , kar pri normalni porazdelitvi ustreza ravni zaupanja približno 95 %).

V splošnem velja, da bolj kot obvladamo merilni proces, bolj točno poznamo obseg vplivnih veličin. Če ga poznamo zelo dobro, jih lahko korigiramo, to je vključimo njihov vpliv v korekcijo povprečja. Veličine, ki jih ne poznamo zadosti dobro, moramo vključiti v negotovost. Posledično velja, da bolj kot obvladujemo meritev, večja postaja korekcija, hkrati pa se negotovost manjša. Seveda pa vedno obstoji minimalna negotovost, ki predstavlja najnižjo možno negotovost merilnega procesa.

### Zaokroževanje števil, pomembne cifre

Popolni merilni rezultat navajamo v obliki intervala, tako da navedemo izmerjeno vrednost in merilno negotovost v absolutni ali relativni obliki. Pri navajanju merilnega rezultata moramo zaokrožiti tako izmerjeno vrednost kot negotovost.

Pogosto so namesto izjave o negotovosti napisane samo tiste cifre, ki jih lahko upoštevamo in ki so smiselne ter pomembne. Te cifre imenujemo pomembne cifre.

Obstajajo različni dogovori, v kakšni obliki zapišemo merilno negotovost:

- polovica zadnje cifre,
- ena enota zadnje cifre,
- en digit pri digitalni merilni opremi,
- ena četrtnina razdelka skale pri analognem instrumentu z zrcalom,
- en razdelek skale,
- dve pomembni cifri.

Uporabljali bomo dogovor, da pri zapisu merilne negotovosti upoštevamo največ dve pomembni cifri. Število pomembnih cifer dobimo, če od prve od nič različne cifre naprej preštejemo vse cifre, ki sestavljajo negotovost.

Pri vmesnih izračunih merilne negotovosti ne zaokrožamo, temveč obdržimo več dodatnih cifre.

**Negotovost** podajamo z največ DVEMA pomembnima ciframa. Zaokrožamo jo vedno NAVZGOR, razen če se negotovost zaradi zaokrožitve zmanjša za več kot 5 % [2].

**Izmerjeno vrednost** zaokrožimo na decimalnem mestu, ki ga določa zaokrožena negotovost. Če je desno od mesta zaokrožitve ena od cifre 0 do 4, zaokrožimo navzdol. Če pa je desno od zaokrožitve cifra 5 do 9, zaokrožimo navzgor.

Primeri določanja števila pomembnih cifre:

$u = 0,01214 \text{ kg}$	$\Rightarrow$	4 pomembne cifre
$u = 0,0000012 \text{ A}$	$\Rightarrow$	2 pomembni cifri
$u = 10,012 \text{ m}$	$\Rightarrow$	5 pomembnih cifre
$u = 0,040 \text{ s}$	$\Rightarrow$	2 pomembni cifri

Primeri zaokroževanja negotovosti na dve pomembni cifri:

$u = 0,01214 \text{ kg}$	$\Rightarrow$	$u = 0,013 \text{ kg}$
$u = 0,01203 \text{ A}$	$\Rightarrow$	$u = 0,012 \text{ A}$
$u = 0,04567 \text{ m}$	$\Rightarrow$	$u = 0,046 \text{ m}$
$u = 0,045\underline{0}6 \text{ s}$	$\Rightarrow$	$u = 0,045 \text{ s}$

### Primer zaokroževanja merilnega rezultata

Gostoto neznanega magnetnega polja  $B$  merimo z digitalnim teslametrom, ki prikaže rezultat  $B = 1,23456 \text{ mT}$ .

Iz poznavanja delovanja teslametra in merilnega postopka vemo, da je merilna negotovost izmerjene gostote odvisna od dveh med seboj nekoreliranih prispevkov. Prvi prispevek znaša 0,9 % prikazane

vrednosti, drugi pa  $8 \times 10^{-3}$  prikazane vrednosti.  
 Relativni negotovosti znašata  $w_1(B) = 9 \times 10^{-3}$  in  $w_2(B) = 8 \times 10^{-3}$ .

Skupno relativno negotovost  $w(B)$  določimo z geometrijskim seštevanjem

$$w(B) = \sqrt{w^2(B_1) + w^2(B_2)}$$

$$w(B) = 12 \times 10^{-3}$$

Merilna negotovost v absolutni obliki  $u(B)$  znaša

$$u(B) = w(B) \cdot B = 0,01481472 \text{ mT},$$

če jo zapišemo z vsemi decimalnimi mesti, ki jih prikaže kalkulator.  
 Negotovost zaokrožimo na dve pomembni cifri

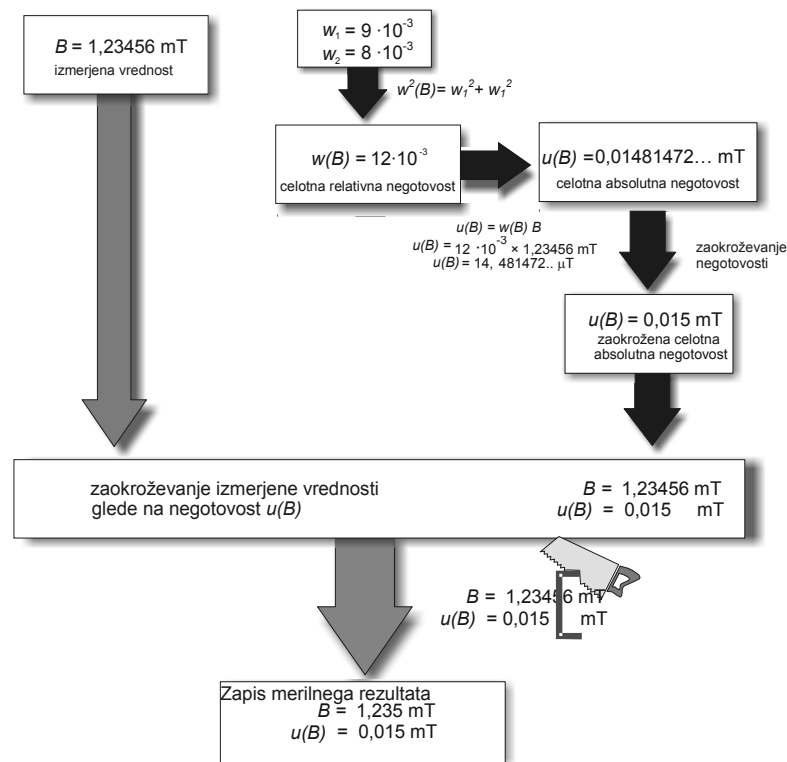
$$u(B) = 0,015 \text{ mT}.$$

Negotovost je zaokrožena na tretjem decimalnem mestu, zato tudi izmerjeno vrednost gostote magnetnega pretoka zaokrožimo na tretjem decimalnem mestu

$$B = 1,235 \text{ mT}.$$

Zapišemo končni rezultat:

$$B = 1,235 \text{ mT}, u(B) = 0,015 \text{ mT}.$$



Slika 8.1: Določanje merilnega rezultata pri merjenju z digitalnim magnetometrom.



## Negotovosti merilnega rezultata

Merilna negotovost je lastnost merilnega rezultata. Je veličina, ki predstavlja kvaliteto meritev, saj označuje razpršenost vrednosti, ki jih je mogoče z določeno verjetnostjo pripisati merjeni veličini.

Vsaka negotovost je določena s standardnim odklonom, zato jo imenujemo tudi standardna negotovost. Kakovost merilnega rezultata se praviloma podaja s standardno negotovostjo  $u$ . Če želimo imeti večjo verjetnost, to je večje zaupanje v to, da prava vrednost leži v območju, ki ga podaja negotovost, uporabljamo razširjeno negotovost  $U$  [2, 3].

Na podlagi priporočil [2, 3] ločimo dva tipa merilnih negotovosti.

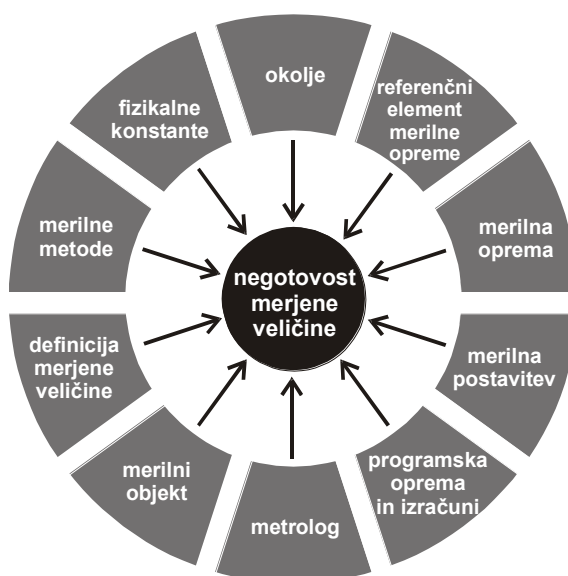
- **Negotovosti tipa A.** Negotovosti tega tipa dobimo s ponavljanjem meritev pod istimi merilnimi pogoji. So določene s pomočjo statistične obdelave rezultatov merjenja, to je s pomočjo standardnega odklona izmerjenih vrednosti.
- **Negotovosti tipa B.** Negotovosti tega tipa dobimo iz ostalih virov informacij. So določene s pomočjo drugih (nestatističnih) metod, na primer kot ocena na podlagi izkušenj, podatkov iz specifikacij, podatkov iz kalibracijskih certifikatov, znanstvenih objav, raziskav...

Viri negotovosti bodo prispevali k tipu A ali tipu B merilne negotovosti. Razlika med obema tipoma je določena na osnovi praktičnih postopkov ugotavljanja in izračuna negotovosti. Vedno ni mogoče vzpostaviti enostavne primerjave med tipoma negotovosti A in B.

## Viri negotovosti

Pri merjenju vedno obstajajo dejavniki, zaradi katerih negotovost meritve ni neskončno majhna. V tem poglavju si bomo ogledali običajne vire negotovosti in pokazali najboljši način za upoštevanje njihovega vpliva v skupni merilni negotovosti.

Slika 8.2: Pri iskanju prispevkov negotovosti naše meritve je pomembno poznati področja, ki lahko vplivajo na rezultate naše meritve. Deset prikazanih področij predstavlja najbolj pogosta vplivna področja.



### Statistična obdelava merilnih rezultatov

Merjenje je običajno proces, ki ga večkrat ponovimo in tako dobimo niz rezultatov. Negotovost večjega števila meritev lahko izrazimo s pomočjo standardnega odklona na več načinov, in sicer kot:

1. Standardni odklon (standardno deviacijo ali odmik) porazdelitve izmerjenih vrednosti ali standardni odklon srednje vrednosti.
2. Razširjena negotovost s faktorjem razširitve  $k=2$ ; ta način prikazovanja merilnih rezultatov se danes največ uporablja v merilni tehniki.
3. Razširjena negotovost za določeno raven zaupanja (običajno 95%). Način izračunavanja negotovosti je odvisen od porazdelitve merilnih rezultatov. Razširjena negotovost je zmnožek standardnega odklona  $s$  in Studentovega faktorja  $t$  ( $t_{95}$ ). Faktor  $t$  je odvisen od števila meritev, izbrane ravni zaupanja in verjetnostne porazdelitve odklona. Kadar nam podrobnosti niso znane, predpostavimo, da je narejeno zadostno število meritev in da je porazdelitev normalna. Na podlagi teh dejstev je  $t_{95} = 2$ .

Ko izberemo določen način, ga moramo uporabiti za izračun vseh merilnih negotovosti v meritvi. Potrebno je tudi izrecno navesti uporabljen način določanja negotovosti. Če imamo več merilnih negotovosti, ki so bile izračunane na različne načine, preračunamo vse negotovosti le po eni izmed navedenih metod in jih potem geometrijsko seštejemo.

### Srednja vrednost in standardni odklon

Predpostavimo, da nekajkrat pomerimo veličino  $X$ . Če naredimo  $n$  statistično neodvisnih meritev, pri čimer je  $n$  večje od ena, je najboljši približek vrednosti veličine  $X$  aritmetična srednja vrednost  $\bar{x}$  ali povprečje izmerjenih vrednosti  $x_i$ :

I/mA	U/mV
1,005	100,2
1,001	100,1
0,999	100,0
1,003	99,9
1,000	100,1

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8.1)$$

Srednja vrednost toka iz primera merjenja, ki ga opisuje tabela na levi, je  $\bar{I} = 1,0016$  mA.

Negotovost meritve, ki jo lahko pripišemo aritmetični srednji vrednosti  $\bar{x}$ , določimo na podlagi ene od naslednjih metod:

- a) Ocena variance je enaka eksperimentalni varianci  $s(x)$

$$s^2(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (8.2)$$

Pozitivni koren variance  $s(x)$  predstavlja eksperimentalni standardni odklon. Najboljša ocena variance aritmetične srednje vrednosti  $\bar{x}$  je eksperimentalna varianca srednje vrednosti  $s(\bar{x})$ , ki je podana kot:

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x)}{n} \quad (8.3)$$

Pozitivni koren variance aritmetične srednje vrednosti predstavlja eksperimentalni standardni odklon aritmetične srednje vrednosti  $s(\bar{x})$ . Standardna negotovost  $u(x)$ , ki jo lahko upravičeno pripišemo aritmetični srednji vrednosti  $\bar{x}$ , je eksperimentalni standardni odklon aritmetične srednje vrednosti:

$$u(x) = s(\bar{x}) \quad (8.4)$$

Če je število ponovljenih meritev manjše od deset, je treba posebno natančno preučiti zanesljivost negotovosti tipa A, če je bila izračunana na podlagi enačbe 8.4. Če števila meritev ni mogoče povečati, je potrebno negotovost oceniti na kakšen drug način.

- b) Če so meritve dobro določene in pod statistično kontrolo, lahko uporabimo kombinirano oceno variance  $s_p^2$ , ki v tem primeru predstavlja boljšo oceno raztrosa kot standardni odklon, ki je pridobljena iz manjšega števila meritev. V tem primeru je varianca aritmetične srednje vrednosti enaka:

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s_p^2(x)}{n} \quad (8.5)$$

Standardno negotovost potem izračunamo na podlagi enačbe 7.6.

- c) Včasih lahko približek vhodne veličine dobimo iz krivulje, ki jo položimo preko izmerjenih točk. S pomočjo regresijske analize lahko ugotovimo funkcijsko povezavo med vhodom in izhodom in iz nje izračunamo standardni odklon na podlagi odstopanja od dejanskih izmerjenih rezultatov. Izmerjeno vrednost predstavlja par števil  $(x_i, y_i)$ , kjer je  $x_i$  znana vrednost etalona, ki je bil izmerjen, in  $y_i$  izmerjena vrednost za  $x_i$ .

Naredimo nekaj meritev pri različnih vrednostih znotraj merilnega območja, s katerimi lahko določimo linearno funkcijo v obliki  $y = a + b \cdot x$ . Ta funkcija bo opisovala odstopanje od linearnega obnašanja znotraj merilnega območja. Radi bi določili standardni odklon, ki bo opisovala negotovost deviacijske funkcije. To pomeni, da moramo določiti koeficienta  $a$  in  $b$ . Če bi bilo obnašanje popolnoma linearno, bi morala biti  $a = 0$  in  $b = 1$ . V splošnem se postopek, s pomočjo katerega določimo funkcijsko obnašanje na podlagi niza meritev, imenuje interpolacija. Koeficienta  $a$  in  $b$  določimo z minimiziranjem standardnega odklona z uporabo parov izmerjenih vrednosti  $(x_i, y_i)$ .

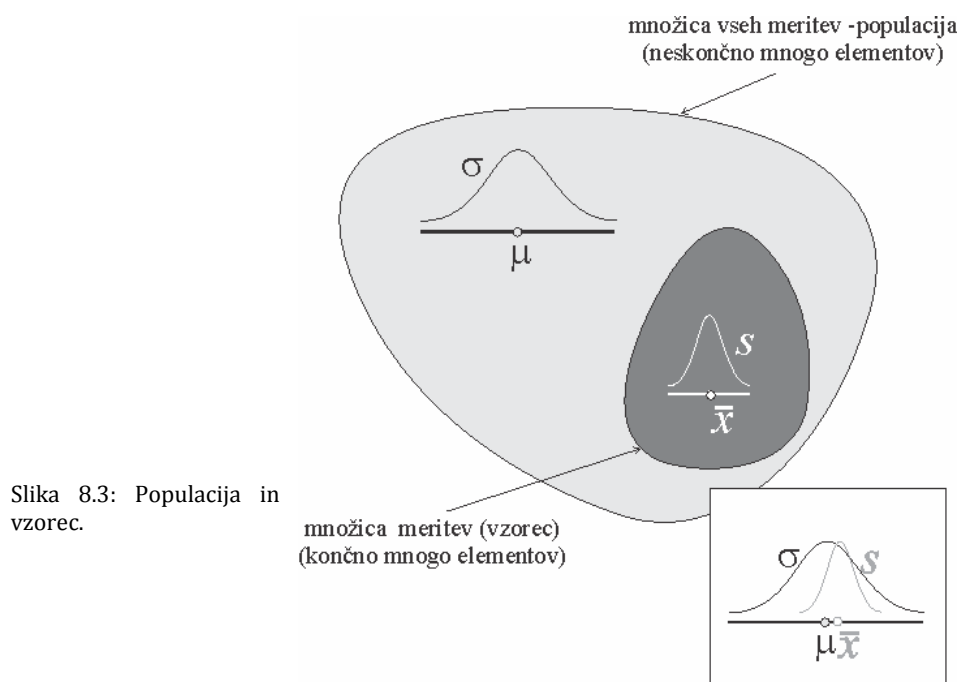
$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (a + b \cdot x_i - y_i)^2}{n-2} \quad (8.6)$$

Standardno negotovost ponovno izračunamo na podlagi enačbe 8.4.

### Vzorec

Merjenje pravzaprav pomeni, da iz neskončnega števila možnih vrednosti, iz celotne populacije, jemljemo posamezne vzorce. To neskončno število meritev je ovrednoteno s pravo vrednostjo  $X$  in standardnim odklonom  $\sigma$ . V praksi ni mogoče narediti neskončno meritev, zato izmerimo le omejeno število meritev in ocenimo prave vrednosti. Najboljši oceni prave vrednosti sta aritmetična srednja vrednost  $\bar{x}$  ter standardni odklon vzorca  $s(x)$ .

V nadaljnjem besedilu bo izraz srednja vrednost pomenil aritmetično srednjo vrednost, standardni odklon pa standardni odklon vzorca.



Slika 8.3: Populacija in vzorec.

Standardni odklon srednje vrednosti vzorca (in ne populacije) je podan kot

$$s = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (8.7)$$

$R/\Omega$
99,70
100,00
100,10
99,90
99,80

$$\bar{R} = 99,90 \Omega$$

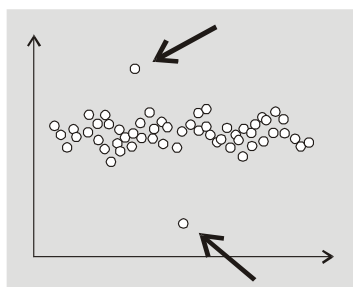
$$s(R) = 0,16 \Omega$$

Kot primer si pogledajmo merjenje upornosti s pomočjo merjenja napetosti in toka. Izmerjene so naslednje upornosti: 99,70  $\Omega$ , 100,00  $\Omega$ , 100,10  $\Omega$ , 99,90  $\Omega$ , 99,80  $\Omega$ . Srednja vrednost je 99,90  $\Omega$ . Srednja vrednost predstavlja samo oceno prave vrednosti, ki bi jo dobili pri neskončnem številu meritev. Standardni odklon je 0,16  $\Omega$

in predstavlja le oceno prave standardnega odklona, ki bi ga dobili v primeru neskončnega števila meritev. Standardni odklon srednje vrednosti vzorca, izračunan na podlagi enačbe 8.7, znaša  $0,07 \Omega$ .

### Večja odstopanja

Večja odstopanja so tisti rezultati meritev, ki bistveno odstopajo od drugih rezultatov znotraj enega niza meritev. Imenujemo jih tudi osamelci. Teh odstopanj ne vključujemo v končni rezultat, tudi kadar nam njihov vzrok ni poznan. Ponavadi jih lahko opazimo v nizu meritev iste veličine. Kadar imamo veliko število meritev (nekaj sto ali celo nekaj tisoč), je velika odstopanja precej težje opaziti. To velja tudi v primeru, ko merimo povezavo med posameznimi veličinami.



Slika 8.4: S puščicama sta označeni dve meritvi, ki močno odstopata od ostalih - dva osamelca.

### Korelirane veličine

V praksi so posamezne merjene veličine tudi medsebojno odvisne. Pravimo, da so korelirane. V nasprotnem primeru so veličine nekorelirane ali neodvisne.

Primer je na primer merjenje dolžine kovinske žice  $l$  preko njene električne upornosti  $R$ , specifične upornosti  $\rho$  in preseka  $A$ .

$$l = \frac{RA}{\rho} \quad (8.8)$$

Obstoji namreč korelacija med dvema vhodnima veličinama - upornostjo in presekom žice, saj na obe vpliva temperatura. Zato je korelacijo med upornostjo in temperaturo potrebno upoštevati.

Eden od možnih načinov predstavitve razmerja med dvema veličinama je risanje diagrama, na katerem se na eni osi nahaja ena, na drugi pa druga veličina. Tako lahko opazujemo, kakšno spremembo ene veličine povzroči sprememba druge veličine.

Kvantitativna mera korelacije med dvema veličinama je podana kot **kovarianca**. Kovarianco razumemo kot varianco, posplošeno za dve veličini. V primeru  $n$  meritev veličin  $x$  in  $y$  je eksperimentalna kovarianca (kovarianca vzorca) podana kot

$$s(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}) \quad (8.9)$$

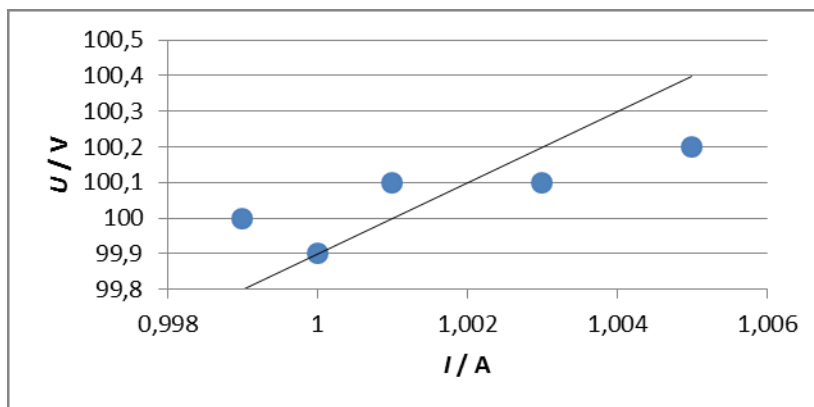
Kovarianca pove, v kakšnem obsegu je sprememba veličine  $x$  odvisna od spremembe veličine  $y$ . Če je meritev  $x$  neodvisna od meritve  $y$ , potem je zmnožek z enako verjetnostjo pozitiven ali negativen.

Kot primer si pogledajmo merjenje upornosti. Če izrazimo merjenje

napetosti in toka v parih vrednosti, dobimo pare meritev ( $I$ ,  $U$ ), ki jih zapišemo v tabelo.

$I/A$	$U/V$
1,005	100,2
1,001	100,1
0,999	100,0
1,000	99,9
1,003	100,1

Srednji vrednosti veličin  $x$  in  $y$  sta  $\bar{I} = 1,0016$  A in  $\bar{U} = 100,06$  V. Standardna odklona sta  $s_I = 0,0024$  A in  $s_U = 0,1140$  V.



Kovarianco izračunamo kot:

$$s(I, U) = \frac{(0,0034 \cdot 0,14) + (-0,0006 \cdot 0,04) + (-0,0026 \cdot (-0,06)) + (-0,0016 \cdot -(0,16)) + (0,0014 \cdot 0,04)}{4} = 0,00023$$

Velja

$$s(I, U) > 0$$

kar pomeni, da obstaja pozitivna korelacija med tokom in napetostjo. Večji tok povzroči večjo napetost.

Vendar na podlagi te vrednosti ne moremo ugotoviti, ali je korelacija velika ali majhna. Parameter, ki nam pove več, je **korelacijski koeficient**  $r_{x,y}$ . To je vrednost, ki jo dobimo, če vrednost kovariance delimo z vrednostjo standardnih odklonov obeh meritev. Za razliko od kovariance je to število brez dimenzij.

$$r_{x,y} = \frac{s(x, y)}{s_x \cdot s_y} \quad (8.10)$$

Korelacijski koeficient  $r_{x,y}$  ima vrednost med -1 in +1. Vrednost +1 pomeni popolno pozitivno linearno korelacijo, vrednost -1 pomeni popolno negativno linearno korelacijo. Vrednost 0 pomeni, da med veličinama ni linearne razmerja.

V našem primeru je  $r_{I,U}$  znaša 0,8376.

Običajno zaradi preprostosti v izračunih merilne negotovosti privzamemo, da so vhodne veličine med seboj nekorelirane, oziroma da med njimi obstoji zanemarljiv medsebojni vpliv.

Zavedati pa se moramo, da v naravi praktično vsaka meritev vsebuje večinoma korelirane fizikalne veličine, zato bi bilo vedno potrebno upoštevati korelacijske koeficiente. Te izračunamo s temeljitim obvladovanjem vplivnih parametrov in lastnosti merilnega procesa, merilnih metod in merilne opreme.

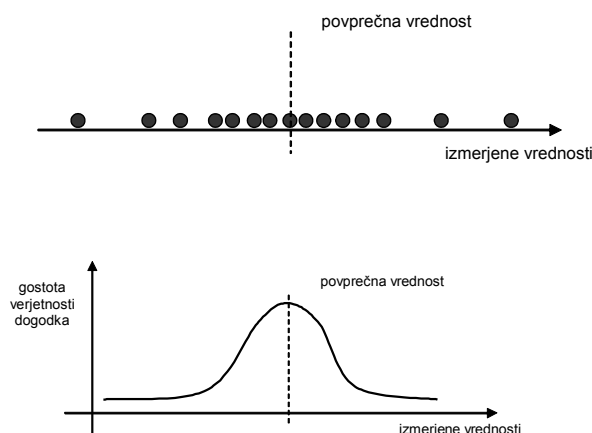
Praktične primere uporabe korelacijskih koeficientov najdemo v Vodiču za izražanje merilne negotovosti (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) [4].

## Porazdelitev izmerjenih vrednosti

### Porazdelitev izmerjenih vrednosti

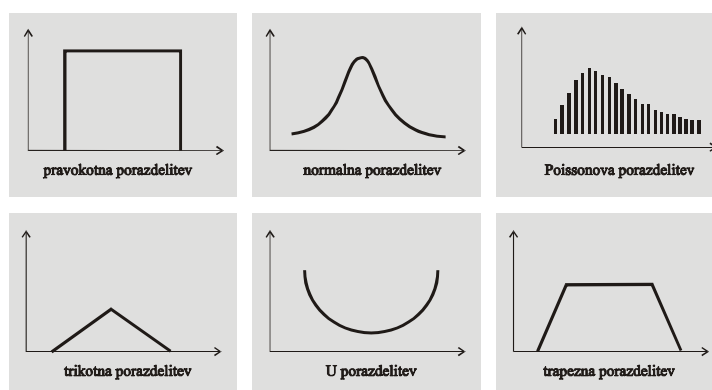
Porazdelitev izmerjenih vrednosti je matematična funkcija, ki prikazuje, na kakšen način so meritve razpršene okoli dogovorjene prave vrednosti. Na podlagi narave eksperimenta in ustreznih fizikalnih zakonov poznamo različne vrste porazdelitev. Najbolj običajne so pravokotna ali enakomerna, normalna ali Gaussova ter Poissonova porazdelitev.

Slika 8.5: Običajno obstoji velika verjetnost, da ima največje število meritev porazdelitev vrednost okoli povprečne vrednosti. Verjetnost, da je meritev zelo oddaljena od povprečja, pa je manjša. Tako porazdelitev imenujemo normalna ali Gaussova porazdelitev.



V postopku ovrednotenja merilne negotovosti moramo posameznim prispevkom negotovosti pripisati določeno obliko porazdelitve. Odločitev, kakšno porazdelitveno funkcijo imajo izmerjene vrednosti, je osnovana predvsem na temeljitem poznavanju merilnega procesa, merilnih metod in lastnosti merilne instrumentacije.

Slika 8.6: Tipi porazdelitev izmerjenih vrednosti. Funkcije prikazujejo gostoto verjetnosti  $p(x)$  za zvezne in pri Poissonovi porazdelitvi verjetnostno funkcijo  $p_K$  za diskretne veličine  $x$  na abscisi.



Trikotna porazdelitev se uporablja namesto pravokotne, kadar je verjetnost, da bo izmerjeni rezultat blizu mej, manjša od verjetnosti, da bo v sredini intervala. Je poenostavitev normalne porazdelitve in je tipična v vibracijskih in dimenzijskih merjenjih.

U porazdelitev je značilna za porazdelitev ponavljajočih se funkcij, trigonometričnih funkcij (na primer  $\cos \varphi$  med 0 in 1).

Trapezna porazdelitev je tipična v primeru, ko je porazdelitev sestavljena iz dveh dominantnih pravokotnih prispevkov.



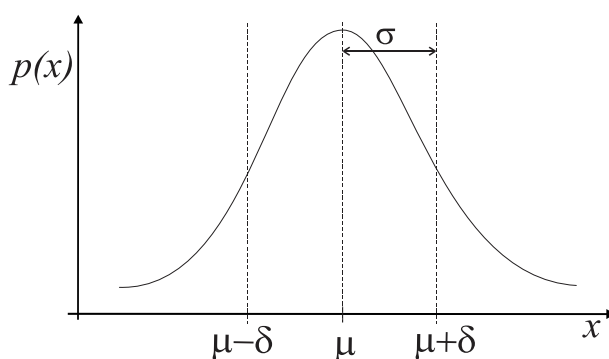
### Gaussova porazdelitev

Gaussova ali normalna porazdelitev je v naravi najpogostejša. Velja tudi, da kadar med seboj kombiniramo različne vrste verjetnostnih porazdelitev, kombinirana porazdelitev limitira proti normalni porazdelitvi.

V primeru Gaussove porazdelitve ima verjetnostna funkcija  $p(x)$  obliko zvonca in je podana z enačbo:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (8.11)$$

Faktorja  $\sigma$  in  $\sqrt{2\pi}$  nam zagotavljata, da bo površina pod krivuljo enaka 1, oziroma da je skupna vrednost enaka ena.



Slika 8.7: Oblika normalne ali Gaussove porazdelitvene funkcije.

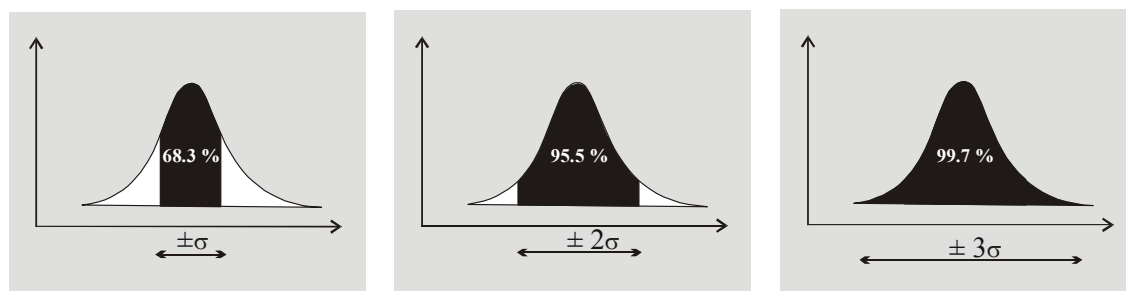
Glavne značilnosti Gaussove porazdelitve so:

1. Simetrija okrog srednje vrednosti  $\mu$ .
2. Največ vrednosti se nahaja v točki  $\mu$ . Verjetnost  $P(\mu) = 0$ .
3. Funkcija se hitro približuje 0, ko je razlika  $x - \mu$  večja od  $\sigma$ .
4. Funkcija je enaka 0, ko gre  $x$  proti neskončnosti.

Verjetnost, da se bo merjeni rezultat nahajal znotraj intervala  $x$  in  $x+dx$ , je enaka  $p(x) \cdot dx$ . Obstaja razmerje med standardnim odklonom in zaupanjem, to je verjetnostjo, da se bo meritev nahajala znotraj intervala  $[\bar{x} - k \cdot \sigma, \bar{x} + k \cdot \sigma]$ . Ta interval je znan kot interval zaupanja. V spodnji tabeli lahko vidimo stopnjo zaupanja za različne intervale okrog srednje vrednosti.

Tabela 8.1: Razmerje med širino intervala in stopnjo zaupanja.

interval zaupanja	multiplikacijski faktor $k$ (faktor razširitve)	stopnja zaupanja
$\pm 1 \cdot \sigma$	1	68,3 %
$\pm 1,96 \cdot \sigma$	1,96	95 %
$\pm 2 \cdot \sigma$	2	95,5 %
$\pm 2,58 \cdot \sigma$	2,58	99 %
$\pm 3 \cdot \sigma$	3	99,73 %



Slika 8.8: Normalna ali Gaussova porazdelitev. Širina intervala zaupanja enega standardnega odklona pri normalni porazdelitvi ustreza verjetnosti 68,3%, da bo prava vrednost merjene veličine v tem intervalu, širina dveh standardnih odklonov ustreza verjetnosti 95,5%, treh pa 99,73%, itd.

Ko imamo manjše število meritev, je treba multiplikacijski faktor povečati, da bi dosegli enak odstotek zaupanja. Pri Gaussovi porazdelitvi je multiplikacijski faktor izračunan s pomočjo Studentove- $t$  porazdelitve. Iz tega razloga faktor običajno imenujemo tudi  $t$  faktor. V tabeli vidimo različne faktorje v odvisnosti od števila meritev in zahtevanega odstotka zaupanja. Osnova za izračun faktorjev je Gaussova porazdelitev.

Tabela 8.2: Studentovi koeficienti v odvisnosti od števila meritev pri normalni porazdelitvi.

$n \backslash p$	2	5	10	20	$\infty$
68,3 %	1,84	1,11	1,06	1,03	1
95,5 %	14	2,87	2,32	2,14	2
99,7 %	-	6,62	4,09	3,45	3

Mednarodno je dogovorjeno, da se merilna negotovost izkazuje kot dvojni standardni odklon  $2s$ , kar pri normalni porazdelitvi ustreza 95,5 % verjetnosti.

Za primer s slike 8.1 velja, da lahko zapišemo sledečo trditev. Če smo izračunali, da je izmerjena vrednost  $B = 1,235$  mT, negotovost pa  $u(B) = 0,015$  mT, lahko v obliki z razširjeno negotovostjo zapišemo  $B = 1,235$  mT  $\pm$  0,030 mT ( $k=2$ ).

Pri tem je razširjena negotovost  $U = 0,030$  mT določena kot standardna negotovost  $u(B)$ , pomnožena s faktorjem razširitve  $k = 2$ , ki pri normalni porazdelitvi ustreza ravni zaupanja približno 95 %.

$$U = k \cdot u(B) \quad (8.12)$$

Ta zapis pomeni, da bo približno 95 % vseh izmerjenih vrednosti v intervalu  $[B - k \cdot u(B), B + k \cdot u(B)]$ . Hkrati pomeni, da obstoji približno 95 % verjetnost, da izmerjena vrednost leži v tem intervalu, torej med 1,205 mT in 1,265 mT.

**Test normalnosti**

Eno izmed orodij za ugotavljanje, ali je določena porazdelitev normalna, je histogram.

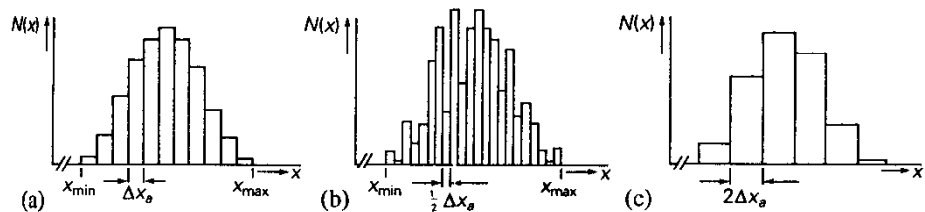
Lahko ga uporabljamo za predstavitev večjega števila izmerjenih vrednosti  $x_i$ . Merilni interval  $x$  (med  $x_{\min}$  in  $x_{\max}$ ), ki zajema vse izmerjene vrednosti, razdelimo na manjše intervale širine  $\Delta x$ . Nato narišemo število vzorcev  $N(x)$ , ki padejo v posamezne intervale ( $x$ ,  $x+\Delta x$ ). Oblike histograma, ki jih lahko dobimo pri različnih izbirah širine intervala  $\Delta x$ , so prikazane na sliki 8.9. Običajno širino intervala izberemo s pomočjo enačbe

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\sqrt{n}} \quad (8.13)$$

Če je  $n < 25$ , širino intervala določimo s pomočjo Sturgesovega pravila:

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,3 \cdot \log n}, \quad n < 25 \quad (8.14)$$

Slika 8.9: Histogrami; (a) ustrezna vrednost širine intervala, (b) premajhna širina intervala, (c) prevelika širina intervala.



Histogram lahko normiramo, če vanj rišemo  $N(x)/n$  namesto  $N(x)$ . To pomeni, da vrednosti na navpični osi predstavljajo verjetnost, da izmerjena vrednost leži v določenem intervalu. Histogram se lahko normira tudi glede na širino intervala  $\Delta x$ . Takrat vanj rišemo  $N(x)/n\Delta x$  namesto  $N(x)/n$ .

Če število izmerjenih vrednosti  $n$  narašča in interval  $x_{\max} - x_{\min}$  ostaja enak, kar se v praksi zgodi skoraj pri vseh fizikalnih veličinah, potem bo število razdelkov intervala naraščalo, medtem ko se bo njihova širina  $\Delta x$  manjšala. Pri naraščanju števila izmerjenih vrednosti, z  $n \rightarrow \infty$ , se ovojnica, ki veže središča vrhov stolpcev v histogramu, spremeni v gladko krivuljo. Takšen (dvojni) normirani histogram se imenuje gostota verjetnosti in je določena z enačbo:

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{n} \frac{N(x)}{\Delta x} \quad (8.15)$$

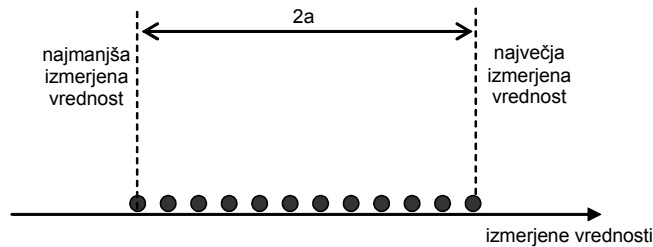
kar lahko zapišemo tudi kot:

$$p(x)dx = \frac{N(x)}{n} \quad (8.16)$$

Integral  $\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 1$  predstavlja vsoto vseh verjetnosti  $p(x)dx$ .

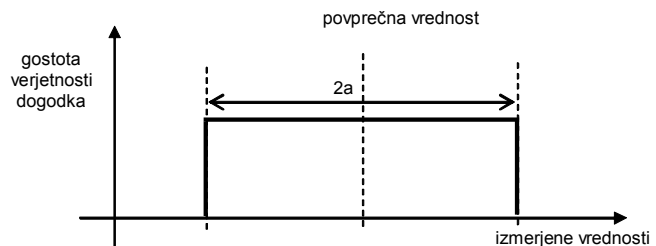
### Pravokotna porazdelitev

Tipičen primer pravokotne porazdelitve je met kocke. O enakomerni ali pravokotni porazdelitvi govorimo, ko so izmerjene vrednosti enakomerno razporejene med najmanjšo in največjo izmerjeno vrednostjo. Tipični primer (diskretne) pravokotne porazdelitve je met igralne kocke. Za vsako številko imamo enako verjetnost, da jo vržemo.

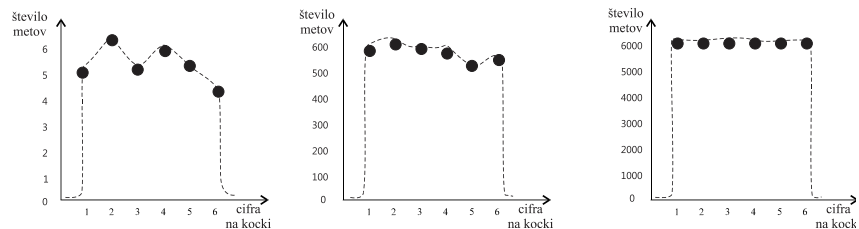


Velikokrat procesa, ki ga merimo, ne poznamo dovolj dobro, zato pravokotno porazdelitev predpostavimo.

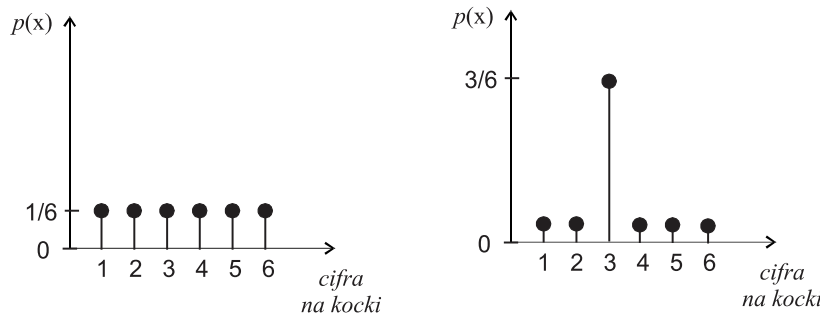
Slika 8.10: O pravokotni porazdelitvi govorimo, ko so izmerjene vrednosti enakomerno razporejene med najmanjšo in največjo izmerjeno vrednostjo.



Slika 8.11: Porazdelitev po 40, 3500 in 36000 metih kocke.

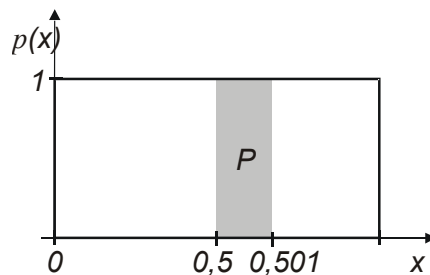


Slika 8.12: Porazdelitev idealne kocke pri velikem številu metov (levo) in pri goljufivi kocki, kjer številka 3 pade v 50% vseh metov.



Enakomerno porazdelitev zaradi oblike imenujemo tudi pravokotna porazdelitev.

Slika 8.13: Gostota verjetnosti  $p(x)$  pove, da je verjetnost, da se bo meritev nahajala v intervalu med 0,500 in 0,501, enaka  $P = 0,001$ .  $p(x)$  ima v tem intervalu vrednost 1.

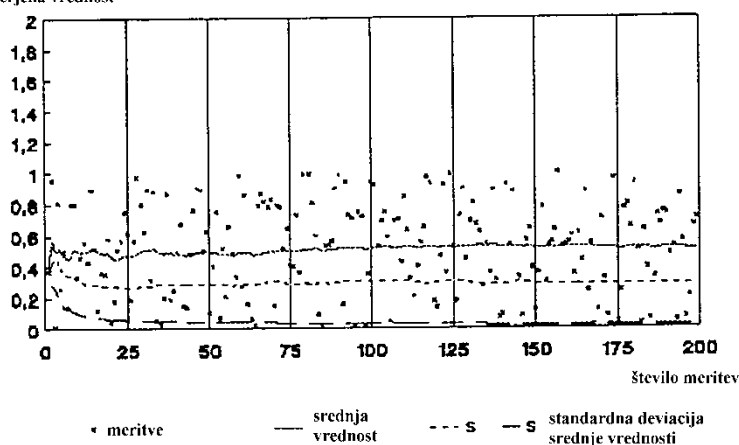


Gostota verjetnosti  $p(x)$  pove, da je verjetnost, da se bo meritev nahajala v intervalu med 0,5 in 0,501, enaka 0,001,  $p(x)$  pa ima v tem intervalu vrednost 1 (slika 8.13). Verjetnost, da se bo meritev nahajala v intervalu med 1,5 in 1,6, je enaka 0, saj je  $p(x)$  v tem intervalu enaka 0. Če se  $p(x)$  spremeni znotraj intervala, moramo interval razdeliti na majhne delčke  $\Delta x$ , znotraj katerih je  $p(x)$  konstantna, in potem sešteti vse delčke  $p(x) \cdot \Delta x$ . Matematično lahko to predstavimo s pomočjo verjetnostnega integrala:

$$P(x_1, x_2) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sum_i p(x) \cdot \Delta x = \int_{x_1}^{x_2} f(x) \cdot dx \quad (8.17)$$

v katerem  $P(x_1, x_2)$  predstavlja verjetnost, da se bo meritev nahajala v intervalu med  $x_1$  in  $x_2$ ,  $f(x)$  pa zvezno funkcijo, ki ustreza  $p(x)$ . Kot primer lahko vzamemo verjetnost meritve v intervalu med 0,8 in 1,3. Verjetnost je 0,2 (20%).

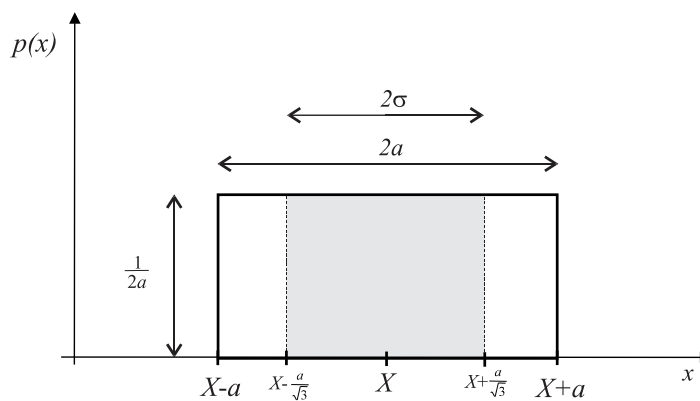
izmerjena vrednost



Slika 8.14: Prikaz rezultatov računalniške simulacije meritve s pravokotno porazdelitvijo.

Zgornja slika prikazuje obnašanje srednje vrednosti  $\bar{x}$ , standardnega odklona vzorca  $s_x$  ter standardnega odklona srednje vrednosti  $s_{\bar{x}}$  odvisnosti od števila narejenih meritev. Rezultati so približno enakomerno razporejeni med 0 in 1. S povečanjem števila meritev se bo srednja vrednost  $\bar{x}$  približala vrednosti 0,5, standardni odklon vzorca  $s_x$  se bo zmanjšal na  $1/(2\sqrt{3})$ , kot je razvidno iz enačbe 8.18, standardni odklon srednje vrednosti  $s_{\bar{x}}$  pa teži proti 0.

Slika 8.15: Pravokotna porazdelitev gostote verjetnosti zvezne spremenljivke.



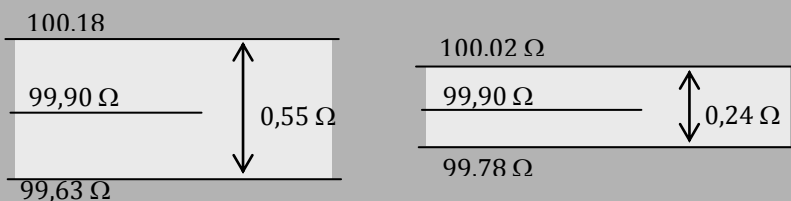
Na zgornji sliki je prikazana oblika pravokotne porazdelitve z enačbo za izračun standardnega odklona. Prava vrednost meritve se z enako verjetnostjo nahaja znotraj meja  $X+a$  in  $X-a$ . Takšna porazdelitev je značilna, kadar se merilna negotovost izračunava na osnovi negotovosti tipa B merilnega instrumenta. Drug primer uporabe je pri oceni drifta (časovnega lezenja oziroma stabilnosti znane vrednosti etalona) med dvema kalibracijama, ko vzamemo razliko izmerjenih vrednosti predzadnje in zadnje kalibracije kot dvojni interval, torej  $2a$ . V obeh primerih se standardni odklon izračuna s pomočjo spodnje enačbe.

$$\sigma = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (8.18)$$

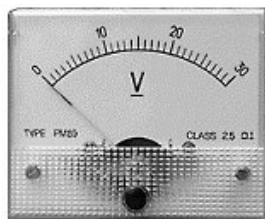
Kot primer spet vzamemo primer merjenja upornosti, kjer smo že izračunali srednjo vrednost  $99,90 \Omega$ , standardni odklon  $0,16 \Omega$  in standardni odklon srednje vrednosti  $0,07 \Omega$ . Najbolj ustrezna pravokotna porazdelitev je tista, ki ima srednjo vrednost  $99,90 \Omega$ , standardni odklon  $0,16 \Omega$  in zaradi tega porazdelitveno območje  $0,16 \Omega \cdot 2\sqrt{3} = 0,55 \Omega$ .

Predpostavljamo, da bodo meritve v intervalu:  $[99,90 \Omega - \frac{1}{2} \cdot 0,55 \Omega, 99,90 \Omega + \frac{1}{2} \cdot 0,55 \Omega] = [99,63 \Omega, 100,18 \Omega]$ .

Srednja vrednost velikega števila meritev se bo nahajala v intervalu:  $[99,90 \Omega - \frac{1}{2} \cdot 0,07 \cdot 2\sqrt{3} \Omega, 99,90 \Omega + \frac{1}{2} \cdot 0,07 \cdot 2\sqrt{3} \Omega] = [99,78 \Omega, 100,02 \Omega]$ .



Lahko tudi trdimo, da se bo prava vrednost nahajala znotraj tega intervala. Tukaj ne upoštevamo omejenega števila meritev, s česar ima standardni odklon določen prispevek negotovost.



Kot primer pravokotne porazdelitve lahko vzamemo negotovost odčitavanja voltmetra z analogno skalo. Inštrument naj ima tako ločljivost, da je nestabilnost merjenega signala še opazna. Recimo, da je najmanjši korak napetosti, ki smo jo ravno še sposobni odčitati,  $2a = 0,1$  V. Negotovost merjenja zaradi odčitavanja bo po enačbi 7.13 enaka 38 mV.

### **Poissonova porazdelitev**

Kot tretji primer porazdelitvene funkcije bomo predstavili Poissonovo porazdelitev. Ta porazdelitev je značilna pri štetju naključno porazdeljenih diskretnih dogodkov s frekvenco  $a$ . To je na primer merjenje radioaktivnosti z uporabo Geigerjevega števca ali ugotavljanje onesnaženosti vode s štetjem števila bakterij v mililitru vode.

Poissonova porazdelitev je konstantna, če je frekvenca konstantna. V nasprotju s pravokotno in Gaussovo porazdelitvijo pri Poissonovi porazdelitvi ni mogoče spreminjati standardnega odklona, ker je ta neposredno izpeljan iz frekvence. Poissonova porazdelitev  $p(x)$  za celoštevilski  $k$  je podana kot:

$$p(k) = \frac{a^k}{k!} e^{-a} \quad (8.19)$$

kjer je  $k$  število dogodkov. Standardni odklon je konstantna vrednost in je vedno  $\sigma = \sqrt{a}$ .

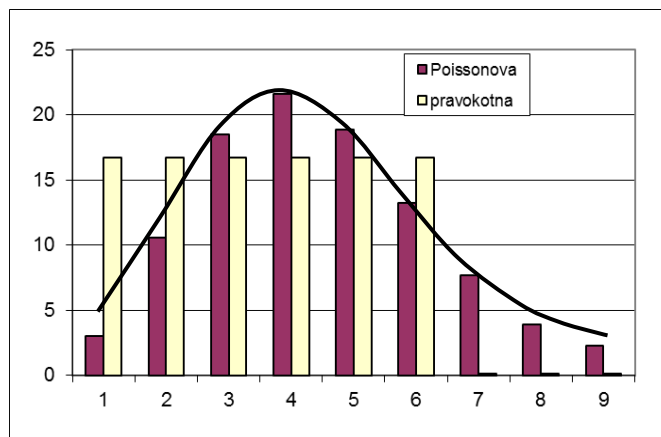
Kot primer lahko vzamemo proces s srednjo vrednostjo dogodka 3,5 v razmaku desetih sekund ( $a = 3,5$ ). Standardni odklon je potem  $\sqrt{3,5} = 1,9$ . Ta primer lahko primerjamo s primerom, v katerem smo metali idealno kocko. V obeh primerih je srednja vrednost 3,5, porazdelitev verjetnosti dogodka pa je različna.

Tabela 8.3: Primerjava pravokotne in Poissonove porazdelitve.

število ( $k$ )	verjetnost za $k$ dogodkov (Poissonova porazdelitev)	verjetnost za $k$ metov (%) (pravokotna porazdelitev)
0	3,0	0
1	10,6	16,7
2	18,5	16,7
3	21,6	16,7
4	18,9	16,7
5	13,2	16,7
6	7,7	16,7
7	3,9	0
>7	2,3	0

Poissonova porazdelitev ni simetrična okrog srednje vrednosti, verjetnost dogodka 3 je različna od verjetnosti dogodka 4.

Verjetnost dogodka negativnega števila sploh ni mogoča. V primerjavi s pravokotno porazdelitvijo je Poissonova kocka vse prej kot idealna in lahko pa se pojavijo tudi vrednosti večje od 6.



Slika 8.16: Primerjava pravokotne in Poissonove porazdelitve.

Prednost konstantnega standardnega odklona je v tem, da ni treba ponavljati meritve z namenom ocenjevanja standardnega odklona, slaba stran pa je, da standardnega odklona ne moremo zmanjšati z izboljšanjem pogojev ali s povečanjem števila meritev v krajšem časovnem intervalu.

## Sestavljanje različnih porazdelitev - centralni limitni teorem

### Sestavljanje različnih porazdelitev - centralni limitni teorem

Skupna porazdelitev, ki nastane kot seštevek več različnih (pravokotnih, normalnih, U, trikotnih, trapeznih) porazdelitev, je običajno normalna. Centralni limitni teorem je orodje, namenjeno razlagi tega dejstva.

Če velja

$$Y = \sum_{i=1}^n c_i X_i \quad (8.20)$$

in imajo vse veličine  $X_i$  normalno porazdelitev, potem bo tudi porazdelitev veličine  $Y$  normalna.

Kadar porazdelitve veličin  $X_i$  niso normalne, je zaradi centralnega limitnega teorema porazdelitev veličine  $Y$  obravnavana kot normalna. Teorem trdi, da bo porazdelitev veličine  $Y$  približno normalna, če je varianca  $s^2(Y)$  precej večja od katerekoli posamezne variance nenormalno porazdeljene veličine  $X_i$  enaka  $c_i^2 \cdot s^2(X_i)$ . V tem primeru je matematično upanje  $E(Y)$  podano kot

$$E(Y) = \sum_{i=1}^n c_i E(X_i) \quad (8.21)$$

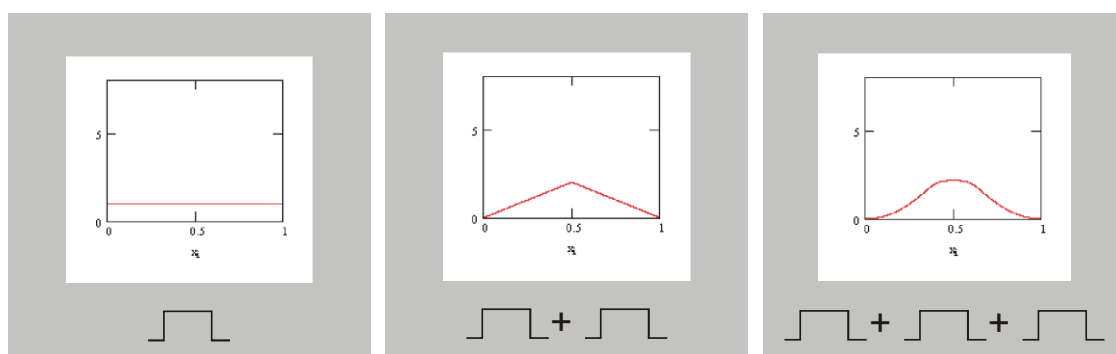


in varianca

$$s^2(Y) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot s^2(X_i) \quad (8.22)$$

Kot je razvidno iz pogojev centralnega limitnega teorema, veličine  $X_i$ , ki imajo normalno porazdelitev, ne vplivajo na potencialno nenormalnost porazdelitve veličine  $Y$ .

Na podlagi centralnega limitnega teorema lahko zaključimo, da večje število vhodnih veličin pomeni hitrejše konvergiranje porazdelitve izhodne veličine  $Y$  k normalni porazdelitvi.



Slika 8.17: Sestavljanje treh vhodnih veličin s pravokotno porazdelitvijo, ki imajo enako širino polovice intervala  $a$ . Pravokotna porazdelitev predstavlja največje odstopanje od normalne porazdelitve. V tem primeru je varianca vsake od treh porazdelitev enaka  $a^2/3$  in varianca končne porazdelitve  $s^2=a^2$ . Raven zaupanja 95 % v primeru sestavljene porazdelitve je  $1,937 \cdot s$ , (raven zaupanja 95 % pri normalni porazdelitvi je enaka  $1,960 \cdot s$ ). Vidimo, da je razlika minimalna že pri seštevku treh pravokotnih porazdelitev. Faktor razširitve za normalno porazdelitev je vedno večji kot ustrezni faktor razširitve za sestavljeno porazdelitev  $Y$ , ne glede na število pravokotnih porazdelitev, ki tvorijo sestavljeno porazdelitev izhodne veličine  $Y$ .

Konvergenca bo še hitrejša, če so vrednosti posameznih varianc vhodne veličine po velikosti čim bližje skupaj. Čim bližja je porazdelitev posameznih vhodnih veličin normalni porazdelitvi, tem manj vhodnih veličin rabimo, da dobimo na koncu normalno porazdelitev izhodne veličine  $Y$ .

Na podlagi zgoraj navedenega lahko zaključimo, da v primerih, ko so izpolnjene predpostavke centralnega limitnega teorema, faktor razširitve  $k = 2$  zadostuje ravni zaupanja 95 %, ne glede na porazdelitve posameznih prispevkov negotovosti.

### Faktor razširitve na podlagi efektivnega števila prostostnih stopenj

Kadar hočemo pravilno oceniti faktor razširitve, ki ustreza določeni ravni zaupanja, moramo upoštevati zanesljivost standardne negotovosti izhodne veličine  $u(y)$ . To pomeni, da moramo upoštevati, kako dobro standardna negotovost ocenjuje standardni odklon, ki je povezan z meritvijo. Za normalno porazdelitev je meritev zanesljivosti standardnega odklona neposredno odvisna od števila prostostnih stopenj. Podobno je mera zanesljivosti standardne negotovosti izhodne veličine efektivno število prostostnih stopenj različnih prispevkov negotovosti  $u_i(y)$ .

Postopek za izračun ustreznega faktorja razširitve, seveda če so izpolnjeni pogoji centralnega limitnega teorema, vključuje naslednje tri korake:

- a) Ugotavljanje standardne negotovosti izhodne veličine ter identifikacija posameznih virov negotovosti.
- b) Ocena efektivnega števila prostostnih stopenj  $v_{\text{eff}}$  standardne negotovosti  $u(y)$  na podlagi Welch-Satterthwaitove enačbe:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (8.23)$$

kjer so  $u_i(y)$  vrednosti posameznih prispevkov k standardni negotovosti in  $v_i$  število prostostnih stopenj posameznega prispevka negotovosti  $u_i(y)$ .

Kadar je posamezni prispevek k standardni negotovosti pridobljen na podlagi tipa A negotovosti, je število prostostnih stopenj

$$v_i = n - 1,$$

pri čemer je  $n$  število meritev, ki so uporabljene za izračun prispevka.

Večji problem predstavlja določiti število prostostnih stopenj v primerih, ko je negotovost pridobljena na podlagi tipa B negotovosti. V praksi je običajno, da se določanje števila prostostnih stopenj v tem primeru izvede na tak način, da ne more priti do podcenjevanja. Če denimo pri ovrednotenju tipa B vzamemo najmanjšo in največjo izmerjeno vrednost, potem je verjetnost, da "prava" vrednost merjene veličine leži zunaj tega območja zelo majhna. Pod predpostavko, da sledimo tem navodilom, gre število prostostnih stopenj standardne negotovosti, ki je tipa B, proti neskončnosti.

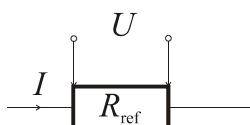
$$v_i \rightarrow \infty.$$

- c) Uporabimo ustrezen faktor razširitve iz tabele 8.2. Ta tabela je zasnovana na t-porazdelitvi in ravni zaupanja 95.45 %. V primeru, ko  $v_{\text{eff}}$  ni celo število, uporabimo prvo manjše celo število.

## Občutljivostni koeficienti in tabela prispevkov negotovosti

Posredno merjenje električnega toka je ena od osnovnih meritev v elektrotehniko. S pomočjo Ohmovega zakona lahko z referenčnim uporom, preko katerega teče neznan tok, in z merjenjem padca napetosti na njem izmerimo enosmerni tok.

Slika 8.18: Posredno merjenje električnega toka.



Merjeni tok  $I$  izračunamo z naslednjo enačbo

$$I = \frac{U}{R_{ref}} + I_0,$$

kjer je  $U$  padec napetosti na referenčnem upor, z upornostjo  $R_{ref}$ ,  $I_0$  pa pogrešek pri merjenju toka zaradi nestabilnosti tokovnega vira, pogojev okolice, ponovljivosti meritev, električnih lastnosti kontaktov, itd.  $I_0$  ni prispevek realnega vplivnega parametra, ampak zgolj teoretični prispevek za računski model.

### Napetost ( $U$ )

Enosmerno napetost merimo z digitalnim voltmetrom, ki je bil kalibriran v akreditiranem laboratoriju za električne veličine. Ima veljaven certifikat, v katerem je za merjenje v danem območju podana razširjena merilna negotovost 2 mV ( $k=2$ , normalna porazdelitev). V tabeli negotovosti zato upoštevamo standardno negotovost  $u(U) = 1$  mV.

### Referenčni upor ( $R_{ref}$ )

Referenčni upor je bil kalibriran v laboratoriju proizvajalca. Ima veljaven certifikat, v katerem je podana njegova upornost 1,0001  $\Omega$  v danem območju pri sobni temperaturi. Podana je njegova točnost 350 ppm.

Ker ne poznamo porazdelitve negotovosti, predpostavimo pravokotno porazdelitev s širino 0,035 % ali 0,35 m $\Omega$ . V tabeli negotovosti upoštevamo negotovost upora  $u(R_{ref}) = 0,35\text{m}\Omega/\sqrt{3} = 0,20$  m $\Omega$ .

### Pogrešek zaradi ponovljivost in ostalih virov ( $I_0$ )

Meritev napetosti je bila desetkrat izvedena pri istih pogojih ( $n = 10$ ). Srednja vrednost vseh meritev je bila  $\bar{U} = 153$  mV, srednja vrednost izračunanih tokov pa  $\bar{I} = 152,9847$  mA z eksperimentalnim standardnim odklonom  $s(I) = 1,06$  mA.

$\bar{U}$ (mV)	$\frac{\bar{U}}{R_{ref}}$ (mA)
152	151,9848
151	150,9849
153	152,9847
154	153,9846
154	153,9846
153	152,9847
152	151,9848
153	152,9847
154	153,9846
154	153,9846

Pogrešek zaradi ponovljivosti in ostalih virov smo ocenili na  $30 \mu\text{A}$ .  
Negotovost zaradi ponovljivosti znaša

$$u(I_0) = s(\bar{I}) = \frac{s(I)}{\sqrt{n}} = \frac{1,06 \text{ mA}}{\sqrt{10}} = 0,34 \text{ mA}$$

Ker je bila negotovost izračunana s statističnimi metodami, predvidevamo, da gre za normalno porazdelitev verjetnosti.

### Občutljivostni koeficienti

V splošnem približek izhodne veličine  $y$  dobimo s splošno matematično funkcijo  $f$  kot

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (8.24)$$

Standardna negotovost izhodne veličine  $y$  je v primeru nekoreliranih vhodnih veličin definirana z enačbo

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (8.25)$$

Veličina  $u_i(y)$ , kjer je  $i = 1, 2, \dots, N$ , je prispevek standardnih negotovosti in je povezana s približkom izhodne veličine  $y$ , ki ga dobimo z pomočjo standardne negotovosti povezane z vhodnim približkom  $x_i$

$$u_i(y) = |c_i| u_i(x_i), \quad (8.26)$$

kjer je  $c_i$  občutljivostni koeficient približka vhodne veličine  $x_i$ . Matematično predstavlja parcialni odvod funkcije  $f$  od  $X_i$ , v točkah vhodnih približkov  $x_i$

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Big|_{X_1=x_1 \dots X_N=x_N} \quad (8.27)$$

Občutljivostni koeficient opisuje, kako močno je približek izhodne veličine  $y$  odvisen od sprememb vhodne veličine  $x_i$ . Lahko ga izračunamo analitično po zgornji enačbi ali numerično. Praktično občutljivostni koeficient pove, kako močno je merjena veličina odvisna od posameznih vhodnih veličin.

Občutljivostni koeficienti za naš primer znašajo:

$$\begin{aligned} c_1 = c_i(U) &= \frac{\partial I}{\partial U} = \frac{1}{R_{ref}} = 0,9999/\Omega \\ c_2 = c_i(R_{ref}) &= \frac{\partial I}{\partial R_{ref}} = \frac{-U}{R_{ref}^2} = -153 \text{ m V}/\Omega^2 \\ c_3 = c_i(I_0) &= \frac{\partial I}{\partial I_0} = 1 \end{aligned}$$

Za vse vplivne veličine predpostavimo, da so med seboj nekorelirane.

### Tabela prispevkov negotovosti

veličina	približek	standardna negotovost	verjetnostna porazdelitev	občutljivostni koeficient	prispevek negotovosti
$X_i$	$x_i$	$u(x_i)$		$c_i$	$u_i(y)$
$U$	0,153 V	1 mV	normalna	0,9999 / $\Omega$	2,0 mA
$R_{\text{ref}}$	1,0001 $\Omega$	0,2 m $\Omega$	pravokotna	-153 mV/ $\Omega^2$	0,03 mA
$I_0$	30 $\mu$ A	0,34 mA	normalna	+1,0	0,34 mA
$I$	0,1530 A				2,1 mA

### Razširjena negotovost

$$U = k u(I) = 2 \cdot 2,1 \text{ mA} = 4,2 \text{ mA}$$

### Rezultat meritve

Enosmerni električni tok, ki teče skozi referenčni upor 1,0001  $\Omega$ , znaša  $I = 153,0 \text{ mA} \pm 4,2 \text{ mA} = 153,0 (1 \pm 2,8 \%) \text{ mA}$ . Razširjena negotovost je določena kot standardna negotovost, pomnožena s faktorjem razširitve  $k = 2$ , ki pri normalni porazdelitvi ustreza ravni zaupanja približno 95 %.

## Diagram vzrokov in posledic

### Diagram vzrokov in posledic

Diagram vzrokov in posledic je namenjen nazornemu prikazu prispevkov negotovosti v postopku določevanja skupne merilne negotovosti. Imenujemo ga tudi ribja kost ali fishbone diagram.



Pripraviti želimo kalibracijsko etalonsko raztopino za kadmij v  $\text{HNO}_3$ . Da bi dobili približno 1000 mg/l Cd kalibracijskega etalona, smo uporabili naslednji postopek:

- tehtanje kosa kovine (površina očiščena)
- raztapljanje kovine v 100 ml posodi z dodajanjem 1 ml  $\text{HNO}_3$  in dodajanje deionizirane vode

Matematični izraz za izračun koncentracije kalibracijskega etalona je

$$c_{Cd} = \frac{1000 mP}{V}$$

$c_{Cd}$  – koncentracija kalibracijskega etalona

$m$  – masa čistega kosa kovine Cd [mg]

$P$  – čistost kovine

$V$  – prostornina posode [ml]

### Čistost kovine $P$

Proizvajalec kovine v certifikatu navaja  $(99,99 \pm 0,01) \%$ .

### Masa $m$

Košček kovine je tehtal 0,10028 g. Proizvajalec navaja tri vire negotovosti pri tehtanju – ponovljivost, ločljivost tehtnice in kalibracijo, ki vključuje občutljivost in linearnost tehtnice. Občutljivost lahko zanemarimo, ker je bilo tehtanje izvedeno na isti tehtnici v ozkem merilnem območju. Popravek mase zaradi vzgona lahko zanemarimo.

### Prostornina raztopine $V$

Prostornina raztopine je bila 100 ml. Negotovost prostornine je sestavljena iz negotovosti notranje prostornine posode, natančnosti polnjenja posode do označbe, temperaturnih vplivov.

### Ovrednotenje posameznih komponent negotovosti

**Čistost kovine  $P$**  – tip B negotovost:  $(99,99 \pm 0,01) \%$  ali  $0,9999 \pm 0,0001$ . Ker ni nobenih drugih podatkov, predvidevamo pravokotno porazdelitev. Standardna negotovost čistosti znaša

$$u(P) = \frac{0,0001}{\sqrt{3}} = 0,000058.$$

**Masa kovine  $m$**  – tip B negotovost: 0,10028 g. Proizvajalec tehtnice priporoča oceno negotovosti 0,05 mg (1s).

$$u(m) = 0,05 \text{ mg}$$

**Prostornina raztopine  $V$**  – 100 ml. Negotovosti so certificirana negotovost notranje prostornine posode, polnjenje posode do označbe in temperaturni vplivi.

Certificirana negotovost notranje prostornine posode  $V_1$  – tip B negotovosti: proizvajalec posode navaja prostornino  $(100 \pm 0,1)$  ml pri 20 °C. Ker interval zaupanja ni podan, privzamemo pravokotno porazdelitev.

$$u(V_1) = \frac{0,1 \text{ ml}}{\sqrt{3}} = 0,058 \text{ ml}$$

Negotovost zaradi polnjenja posode do označbe  $V_2$  – tip A negotovosti: ponovljivost polnjenja je bila izračunana s poskusom, v katerem je bila posoda desetkrat napolnjena, hkrati pa izmerjena masa. Standardni odklon rezultatov je bil 0,02 ml.

$$u(V_2) = 0,02 \text{ ml}$$

Temperaturni vplivi  $V_3$  – temperatura laboratorija je stabilna v intervalu  $20\text{ °C} \pm 4\text{ °C}$ . Prostorninski raztezek posode je majhen v primerjavi z raztezkom vode in ga zato zanemarimo. Prostorninski raztezek vode je  $2,1 \times 10^{-4}\text{ /°C}$ , zato se prostornina spreminja v intervalu  $\pm (100\text{ ml} \times 4\text{ °C} \times 2,1 \times 10^{-4}\text{ /°C}) = \pm 0,084\text{ ml}$ . Če predvidevamo pravokotno porazdelitev, velja

$$u(V_3) = \frac{0,084\text{ ml}}{\sqrt{3}} = 0,049\text{ ml}$$

Skupna negotovost prostornine je geometrična vsota vseh treh prispevkov.

$$u(V) = \sqrt{u^2(V_1) + u^2(V_2) + u^2(V_3)}$$

$$u(V) = \sqrt{(0,058\text{ ml})^2 + (0,020\text{ ml})^2 + (0,049\text{ ml})^2} = 0,079\text{ ml}$$

### Kovariance koreliranih vhodnih veličin

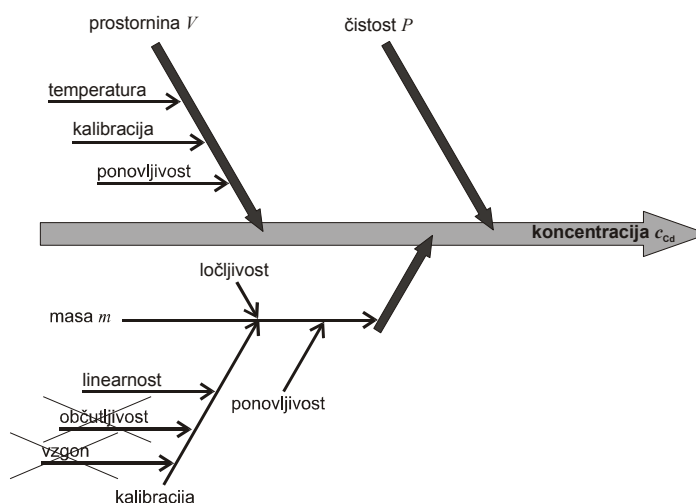
Korelacije niso znane, zato predpostavimo, da ni korelacij.

### Izračun rezultata meritve

Izračunamo koncentracijo

$$c_{Cd} = \frac{1000mP}{V} = \frac{1000 \cdot 100,28\text{ g} \cdot 0,9999}{100\text{ ml}} = 1002,7\text{ mg/l}$$

Slika 8.19: Diagram vzrokov in posledic (diagram ribje kosti) pri določevanju koncentracije kadmija. Prečrtane parametre smo zanemarili.



### Izračun skupne negotovosti meritve

Ker osnovna enačba izračuna koncentracije vsebuje le operaciji množenja in deljenja, za izračun skupne negotovosti geometrijsko seštejemo posamezne relativne negotovosti.

$$\frac{u(c_{Cd})}{c_{Cd}} = \sqrt{\left(\frac{u(P)}{P}\right)^2 + \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(V)}{V}\right)^2}$$

$$\frac{u(c_{Cd})}{c_{Cd}} = \sqrt{\left(\frac{0,000058}{0,9999}\right)^2 + \left(\frac{0,05 \text{ g}}{100,28 \text{ g}}\right)^2 + \left(\frac{0,079 \text{ ml}}{100 \text{ ml}}\right)^2}$$

$$\frac{u(c_{Cd})}{c_{Cd}} = 0,00094$$

$$u(c_{Cd}) = 0,94 \text{ mg/l}$$

Lahko zaključimo, da masa in prostornina v približno enaki meri vplivata na skupno negotovost, medtem ko je negotovost čistosti skoraj brez vpliva.

### Izračun razširjene negotovosti

Razširjena negotovost je  $U = k \cdot u(c_{Cd}) = 2 \times 0,94 \text{ mg/l} = 1,9 \text{ mg/l}$ , pri čemer je faktor razširitve  $k = 2$ , kot je priporočeno v Vodiču za izražanje merilne negotovosti (GUM).

### Rezultat meritve

Koncentracija kadmijevega etalona je  $(1002,7 \pm 1,9) \text{ mg/l}$ . Razširjena negotovost temelji na standardni negotovosti, pomnoženi s faktorjem razširitve  $k = 2$ , ki pri normalni porazdelitvi zagotavlja raven zaupanja približno 95 %.



## Merilna negotovost pri preskušanju

### Preskušanje

Definicija preskušanja je po *Slovarju standardizacije in z njo povezanimi dejavnostmi* [6] izvajanje enega ali več preskusov. Preskus je tehnična operacija, s katero se po specficiranem postopku določi ena ali več značilnosti danega proizvoda, procesa ali storitve.

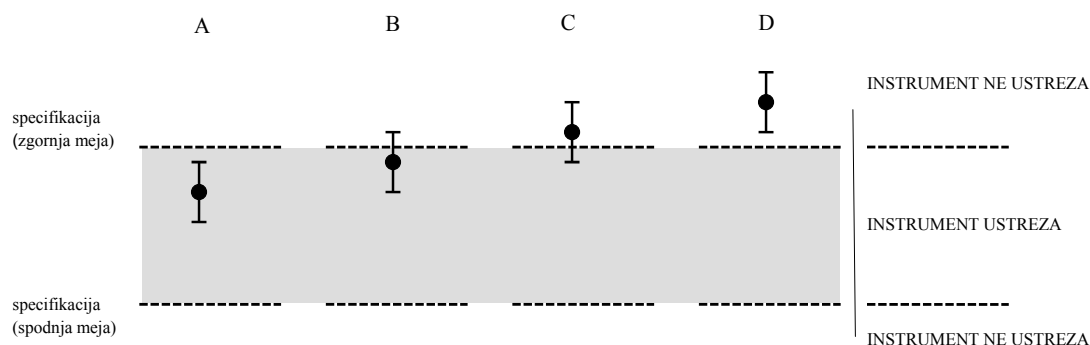
Eden osnovnih parametrov pri preskušanju je določevanje merilne negotovosti meritve.

### Merilna negotovost pri preskušanju

Merilno negotovost pri preskušanju podajamo kadar:

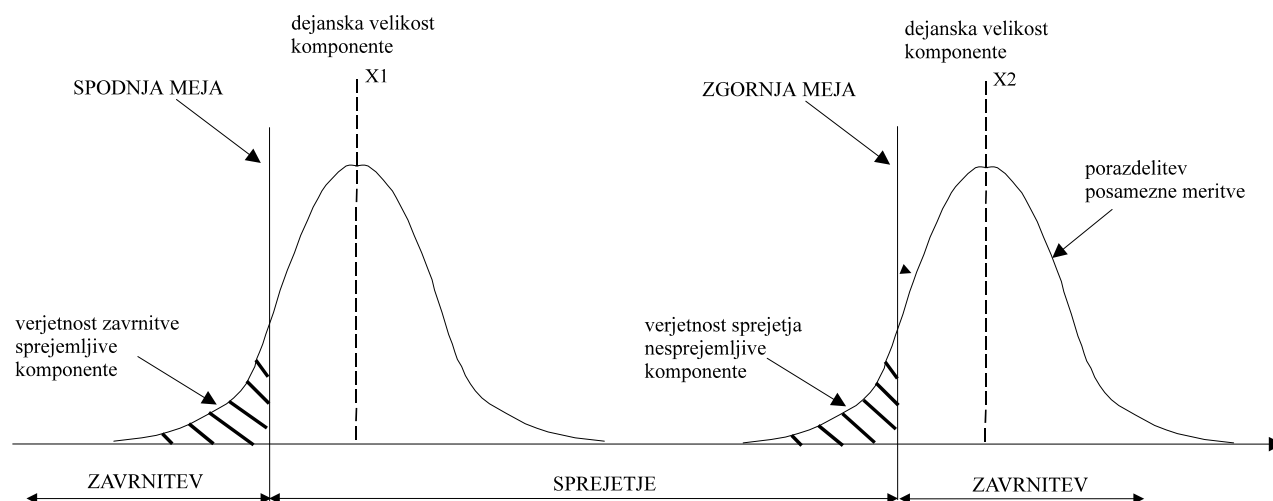
- stranka zahteva izjavo o negotovosti,
- jo zahteva specifikacija preskusa,
- je negotovost pomembna za veljavnost ali uporabnost rezultata, to je kadar negotovost vpliva na odločitev o ustreznosti specifikacijam ali predpisanim tolerančnim mejam, kot je prikazano na sliki 8.20.

Preskusni laboratorij mora biti sposoben naštetih tiste vidike preskusa, ki potencialno prispevajo k negotovosti, znati oceniti velikost posameznih prispevkov, zaželeno pa je tudi, da za posamezen preskus pripravi zgled.



Slika 8.20: Možni primeri merilnih rezultatov pri preskušanju.

V primeru A lahko trdimo, da instrument ustreza specifikacijam, kajti v njenih mejah ležita tako izmerjena vrednost kot tudi negotovost. Nasprotno velja v primeru D, v katerem instrument očitno ne ustreza specifikacijam. Problem nastopi v primerih B in C, kjer o instrumentu ne moremo reči ničesar, niti da ustreza specifikacijam niti da specifikacijam ne ustreza. Isti primer lahko prikažemo na drugačen način, in sicer tako, kot je prikazano na sliki 8.21.

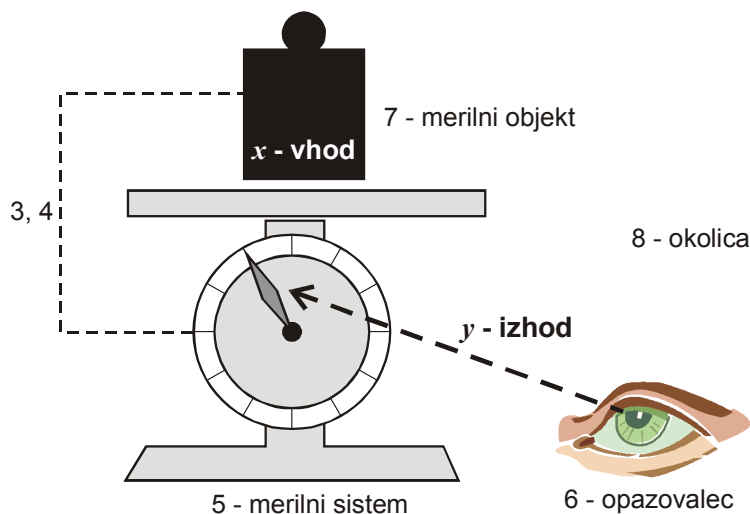


Slika 8.21: Verjetnost sprejetja slabih oziroma zavrnitve dobrih komponent (preskušancev). Na levi je prikazan mejni primer, ko komponenta X1 ustreza kriterijem za sprejetje (šrafirano), vendar jo zavrnemo, ker je njena vrednost manjša od spodnje meje. Na drugi strani je lahko sprejeta komponenta X2, ki bi morala biti zavrnjena (šrafirano na desni sliki). Če bi bila oba merilna rezultata opremljena z minimalno merilno negotovostjo, ne bi prišlo do zavrnitve sprejemljivih in sprejetja nesprejemljivih komponent. Zato je potrebno merilno negotovost optimizirati in zmanjšati na najmanjšo možno vrednost.

### Nekateri viri merilne negotovosti pri preskušanju

- Nepopolna definicija preskusa, nejasen opis zahteve
- Nepopolna realizacija preskusnega postopka
- Ne (dovolj) reprezentativno vzorčenje
- Nezadostno poznavanje vplivov okolja na proces meritve
- Sklop merilo – preskušane
- Osebna predisponiranost pri odčitavanju analognih instrumentov
- Ločljivost
- Kalibrirane vrednosti etalonov ali referenčnih materialov
- Sprememba karakteristik od zadnje kalibracije
- Vrednosti konstant in drugih parametrov pri ovrednotenju podatkov
- Približki in modeli privzeti v preskusnem postopku
- Variacije v ponovljenih opazovanjih pod navidezno enakimi pogoji

## Vrste merilne negotovosti

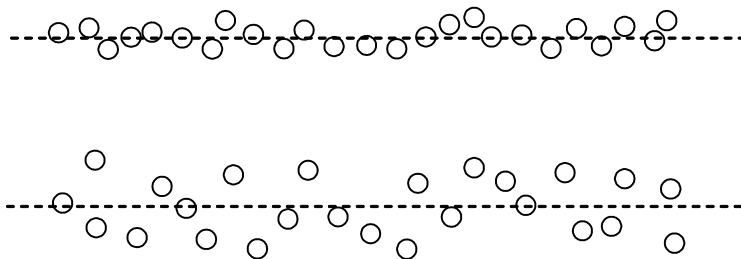


Slika 8.22: Merilni proces in vplivne veličine.

### Statistične negotovosti (negotovosti tipa A)

#### Ponovljivost (x, y, 2, 4, 5 s slike 8.22)

Ponovljivost merilnih rezultatov (repeatability of results of measurements) - ujemanje rezultatov zaporednih meritev iste merjene veličine, izvedenih pod istimi pogoji merjenja [1]. Ti pogoji se imenujejo pogoji ponovljivosti. Pogoji ponovljivosti vključujejo isti merilni postopek, istega merilca, isti merilni instrument, uporabljen pod enakimi pogoji, isto lokacijo, ponavljanje v kratkem časovnem obdobju. Ponovljivost se da izraziti količinsko glede na lastnosti raztrosa rezultatov. Iz tega razloga lahko ta vir merilne negotovosti enostavno določimo s pomočjo ponavljanja meritev pod istimi pogoji. Ta negotovost je negotovost tipa A.



Slika 8.23: Meritev z dobro ponovljivostjo (zgoraj) in meritev slabše ponovljivosti.

## Nestatistične negotovosti (negotovosti tipa B)

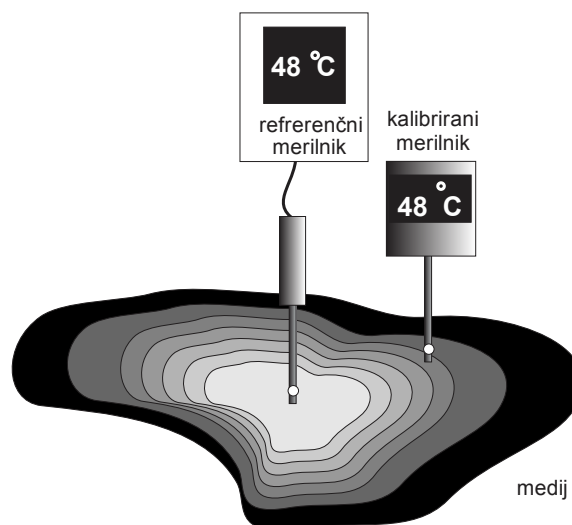
### Negotovosti merilne opreme

#### Negotovost uporabljenih etalonov (3, 4 s slike 8.22)

Zaželeno je, da so meritve vedno povezane z istim etalonom. V praksi enega etalona pri vseh meritvah ni možno uporabljati. Zaradi tega se iz obstoječih etalonov izpeljejo drugi etaloni z namenom umerjanja merilnih instrumentov. Pri tem se vedno pojavi negotovost, kar pomeni, da se je nemogoče izogniti določeni negotovosti pri merjenju. Le-ta je določena kot negotovost etalona, katerega prava vrednost je znana.

Merilni ali kalibracijski proces vedno zajema primerjavo med merjeno veličino in etalonom. Uporabljeni etalon je lahko bodisi merilni instrument ali pa merjenec. Zato je treba pri izračunu negotovosti vedno upoštevati negotovost uporabljenega etalona. Ta negotovost je podana bodisi v njegovem kalibracijskem certifikatu ali v specifikacijah, znotraj katerih bi moral merilni instrument (etalon) vsaj po zagotovilih proizvajalca delovati.

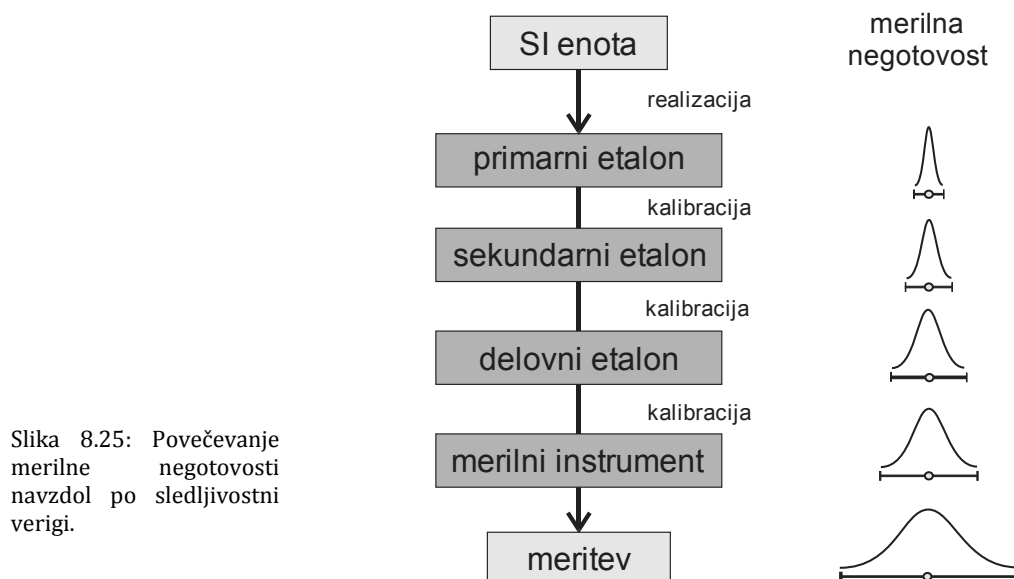
Ko je etalon kalibriran, predstavlja negotovost kalibracije tisto negotovost, s katero ga lahko realiziramo.



Slika 8.24: Primerjalna kalibracija termometra, izvedena s pomočjo referenčnega termometra in vodne kopeli (medij).

Celo metrološko najvišji etaloni znotraj mednarodnega sistema enot SI vsebujejo določeno negotovost. Izjema je etalon za maso, saj etalonski kilogram K predstavlja fizični artefakt, ki ima po definiciji maso točno enega kilograma (negotovosti je 0).

Vse druge realizacije etalonov imajo določeno negotovost.



Slika 8.25: Povečevanje merilne negotovosti navzdol po sledljivostni verigi.

Pomembno je, da pri kalibraciji merilnega instrumenta merilna negotovost ne more biti manjša, kot jo ima etalon, tudi če nam ločljivost in stabilnost merilnega instrumenta to dovoljujeta (slika 7.27). To je še posebej pomembno pri veličinah, katerih etaloni so realizirani z relativno veliko negotovostjo (na primer svetilnost (enota kandela (cd)) je realizirana z negotovostjo 1%) in relativna vlažnost z negotovostjo približno 0,5%). Negotovost je običajno negotovost tipa B

### Specifikacije proizvajalca in kalibracijski certifikat (3, 4, 5 s slike 8.22)

Specifikacije proizvajalca niso vir negotovosti, lahko pa na podlagi njih izpeljemo nekaj virov negotovosti. Specifikacije lahko vsebujejo celo več informacij kot kalibracijski certifikat. Na podlagi kalibracijskega certifikata ugotavljamo, če instrument ustreza podanim specifikacijam. Na podlagi več zaporednih umerjanj lahko določimo tudi časovno lezenje instrumenta. Specifikacije proizvajalca ponavadi vključujejo še informacije o drugih virih negotovosti, kot so na primer temperaturna občutljivost odčitka, pričakovano lezenje (dnevno, mesečno, letno), itd. Negotovost je običajno negotovost tipa B.

### Histereza (x, y, 2, 4, 5 s slike 8.22)

Nekateri instrumenti v odvisnosti od prejšnje merjene točke prikažejo različni izmerjeni vrednosti, čeprav merimo isto točko. Pomembno je, ali je bila prejšnja izmerjena vrednost večja ali manjša kot trenutna merjena vrednost. Ta pojav je pogost pri meritvah z mehanskimi instrumenti.

Kot primer si pogledjmo aneroidni barometer. Ta mehanski instrument prikaže nižji tlak, kadar se atmosferski tlak dviguje, in višji tlak, kadar se atmosferski tlak znižuje. Če naredimo odčitek v naključnem trenutku in pred tem ne udarimo rahlo po skali instrumenta, bo negotovost precejšnja. Ne vemo namreč, ali je bil prejšnji atmosferski tlak večji ali manjši.

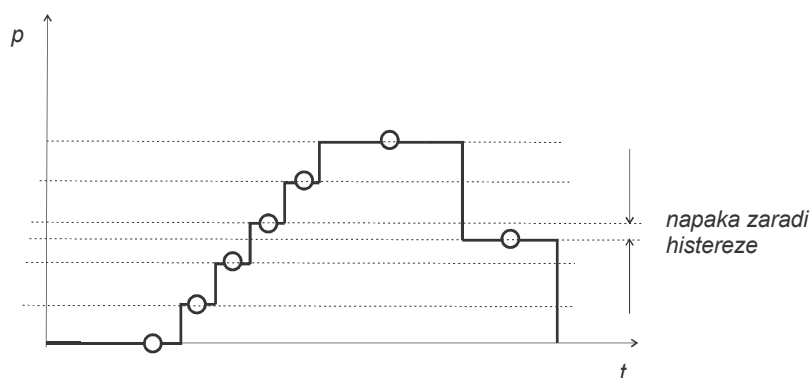
Načini zmanjševanja te negotovosti so naslednji:

1. »Vedno se približaj z iste strani« je dobro znano geslo vsem metrologom. Pri temperaturi vedno začni pri 0 °C, pri elektromagnetu začni pri ničli in povečuj tok do zelene vrednosti, itd.
2. Preveri, v katero smer se je zgodila zadnja sprememba. Pri zgoraj omenjenem barometru je to možno z rahlim udarcem po barometru.

V primeru, da ti načini niso možni, je potrebno ugotoviti ali oceniti velikost histereze in upoštevati to velikost pri izračunu celotne negotovosti.

Negotovost je običajno negotovost tipa B.

Slika 8.26: Prikaz kalibracije manometra. Manometer stopničasto izpostavljam različnim tlakom. Kot zadnjo točko ponovimo eno od meritev in določimo pogrešek zaradi histereze.

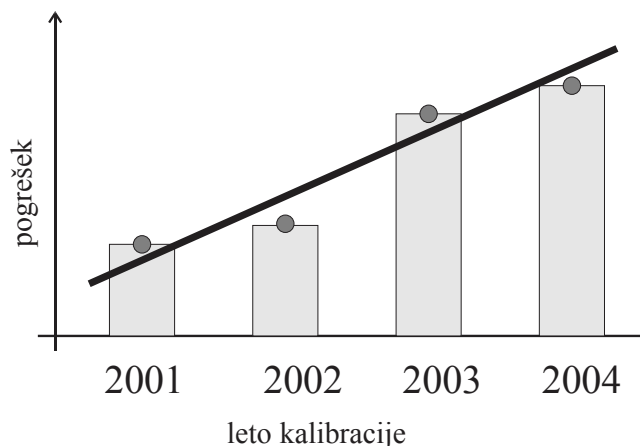


### Lezenje (časovni drift) in odstopanje od ničle (x, y, 4, 5 s slike 8.22)

Lezenje je počasna sprememba meroslovnih značilnosti merilnega instrumenta [1]. Pod izrazom lezenje imamo v mislih postopno poslabšanje enote za odčitavanje, ki je ugotovljeno s časom. Lezenje je ponavadi v povezavi z ničelno napako. Ničelna napaka je odstopanje merilnega instrumenta v trenutku, ko bi moral kazati nič. Ponavadi se lahko ničelno napako odpravi s kratkim stikom preskusnih vodov pri merjenju napetosti in upornosti, s tariranjem pri meritvah mase, itd.

Kadar je korekcija izvedena glede na ničelno odstopanje, moramo upoštevati določeno negotovost v končnem rezultatu. Če ničelne korekcije ni možno narediti, mora biti njena največja ocenjena vrednost vključena kot lezenje. Lezenje se lahko oceni tudi z izvajanjem časovno izredno dolge meritve.

Negotovost je običajno negotovost tipa B.



Slika 8.27: Prikaz rezultatov več zaporednih kalibracij voltmetra, iz katerega lahko določimo časovno lezenje (črna črta).

### Negotovosti merilne metode

#### Lastna negotovost merjene veličine (x s slike 8.22)

Kot lastno negotovost merjene veličine označujemo tisto negotovost, ki je prisotna v definiciji veličine. Ko imamo opravka s konstantnimi veličinami, kot so masa uteži ali naboj elektrona, predpostavimo, da je lastna negotovost zanemarljiva. Pri nekaterih meritvah merjeni veličini lahko pripišemo različne vrednosti, zahtevana pa je le ena.

Nekaj primerov:

- Merjenje premera krogle, ki nima popolne oblike krogle.
- Odčitavanje magnetometra, pri čemer se prikaz spreminja, čeprav je magnetno polje, ki ga magnetometer meri, konstantno.
- Trdota plošče za preskušanje trdote, če plošča ni idealno homogena.

Ta negotovost je običajno negotovost tipa B.

#### Medsebojni vpliv meritve in merjene veličine (3 s slike 8.22)

Načeloma vedno obstaja medsebojni vpliv med meritvijo in predmetom, ki ga merimo.

Priključitev realnega voltmetra, ki nima neskončne notranje upornosti, spremeni razmere v vezju. Posledično merimo drugačno napetost.

Podobno je pri merjenju temperature s pomočjo uporovnega termometra. Uporovni termometer je inštrument, ki se mu upornost spreminja v odvisnosti od temperature, pri tem pa moramo skozi ta upor voditi določen tok. Posledica tega toka je dodatno segrevanje upora, kar pomeni, da se bo upornost termometra še dodatno spremenila. Ta pojav je znan kot lastno segrevanje.

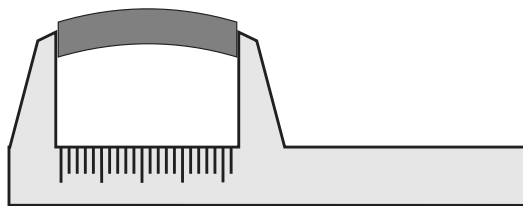
Podoben primer je merjenje dolžine z uporabo kljunastega merila. Merjeni predmet postavimo v kljunasto merilo, ki ga stisnemo, in pomerimo dolžino (slika 8.28). Kot posledica sile merila, ki deluje na merjenec, se lahko pojavi deformacija in s tem sprememba dolžine predmeta.

Tega vira negotovosti ne moremo določiti s ponavljanjem meritev, kar pomeni, da ga je treba oceniti in pripisati k tipu B merilnih negotovosti.

Včasih je možno oceniti velikost negotovosti. V zgornjih primerih

lahko merimo pri različnih tokovih ali pri različnih močeh in potem naredimo ekstrapolacijo rezultatov do toka nič oziroma moči nič. V takšnem primeru korekcije bo rezultirajoča negotovost kombinacija tipov negotovosti A in B.

Slika 8.28: Merjenje dolžine s kljunastim merilom. Zaradi prevelike sile bo odčitana vrednost premajhna



### Negotovost odčitavanja (y, 5 s slike 8.22)

Pri vsakem instrumentu, kjer je potrebno odčitavanje, se pojavi negotovost zaradi odčitavanja.

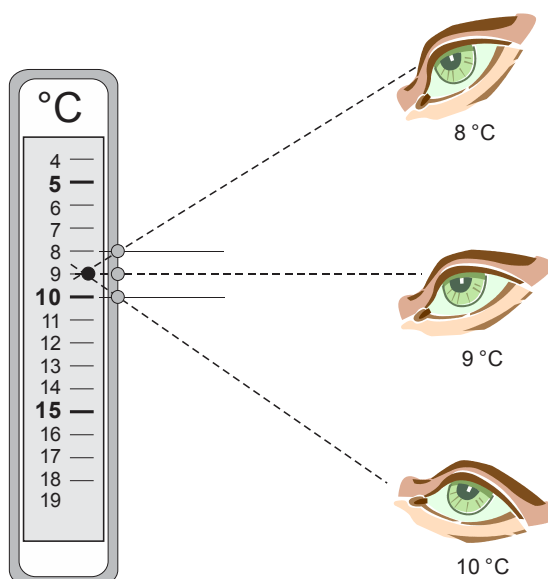
Negotovost izračunamo po enačbi 8.18, pri čemer je  $a = Q/2$ , kjer je  $Q$  ločljivost odčitavanja (npr. pri ampermetru z ločljivostjo skale 1 mA je kazalec lahko tako tanek, da brez težav odčitamo tretjino, četrtno in tudi petino razdelka skale, torej 0,33 mA, 0,25 mA ali celo 0,2 mA). Ločljivost je imenovana tudi quant, count, D, digit, LSB, ipd. Ločljivost digitalnih instrumentov je določena z ločljivostjo njihovega prikazovalnika (je enaka polovici enote najmanjšega razdelka, to je ločljivost, npr. prikaz 9,6573 V pomeni, da je ločljivost enaka  $Q = 0,0001$  V).



Dodatno negotovost odčitavanja moramo vključiti še zaradi paralakse. Ta negotovost je posledica tega, da indikator odčitavamo z določene oddaljenosti. To pomeni, da so odčitki, narejeni pod različnimi koti, različni. Pogrešek zaradi paralakse se lahko izloči tako, da gledamo pravokotno na instrument, oziroma če ima instrument pod kazalcem vgrajeno zrcalo, odčitavamo tako, da se kazalec in njegova slika v zrcalu prekrijeta. Ta negotovost je negotovost tipa B.



Slika 8.29: Pogrešek odčitavanja zaradi paralakse.



### Ostale negotovosti

#### Pogoji okolja (7, 8)

Kar nekaj veličin je neposredno odvisnih od pogojev okolja. Najpomembnejši pogoji okolja, ki jih je potrebno upoštevati, so atmosferski tlak, temperatura, vlažnost, vibracije, koncentracija CO<sub>2</sub> v zraku, prisotnost difuzne svetlobe, elektromagnetna interferenca kot posledica napajanja, prisotnost računalnika ali CRT monitorja, lokalna vrednost gravitacijskega pospeška, itd.

Vpliv temperature je tako pomemben, da bo podrobneje razložen v naslednjem odstavku. Atmosferski tlak je pomemben, kadar merimo dolžino ter pri precizijskih meritvah mase in sile. Negotovost teh vrednosti ima neposreden vpliv na negotovost merjenja dolžine in mase. Negotovost se lahko bistveno zmanjša z delom v stabilnih in skrbno izbranih pogojih okolja.

#### Temperatura

Večina meritev je neposredno odvisnih od temperature okolja. Precizijsko merjenje temperature je izredno pomembno, saj negotovost merjenja temperature neposredno vpliva na celotno negotovost meritve. Primeri: merjenje etalonske električne upornosti, merjenje absolutne dolžine s pomočjo etalonskih kladic, merjenje viskoznosti tekočin. Tudi delovanje mnogih instrumentov je neposredno odvisno od temperature. Temperatura povzroči tudi pojav različnih oblik šuma, ki lahko vplivajo na točnost meritve.

### Tipični viri merilne negotovosti

V nadaljevanju so naštetih nekateri viri merilnih negotovosti, ki jih je običajno potrebno upoštevati pri električnih kalibracijah, kalibracijah etalonov mase, dimenzijskih kalibracijah in kalibracijah etalonov temperature.

#### Nekateri viri negotovosti pri električnih kalibracijah

1. Kalibracija etalona
2. Dolgotrajna stabilnost etalonov
3. Pogoji meritve ali uporabe
4. Interpolacija kalibracijskih podatkov
5. Ločljivost instrumentov

6. Razporeditev naprav
7. Termične napetosti
8. Bremenitev in upornost vezi
9. Negotovost zaradi neprilagojenosti (VF moč in slabljenje)
10. Usmerjenost in prilagojenost (refleksijski koeficient)
11. Ponovljivost konektorjev
12. Zunanja vplivna moteča elektromagnetna polja

### **Nekateri viri negotovosti pri kalibraciji mase**

- a. Kalibracija referenčnih uteži
- b. Stabilnost referenčnih uteži
- c. Tehnica / postopek tehtanja
  - ponovljivost meritev,
  - linearnost znotraj uporabljenega območja,
  - velikost digita oziroma razdelka, ločljivost,
  - ekscentričnost (posebno, če se postavi več uteži hkrati),
  - magnetni vplivi (namagnetnost uteži, vpliv motorjev),
  - temperaturni vplivi, zlasti temperaturna razlika tehnica/uteži,
  - negotovost dolžine ročice.
- d. Vpliv zračnega vzgona
  - gostota uteži (navadno privzete vrednosti),
  - gostota zraka (izračun iz temperature, tlaka in vlažnosti),
  - vsebnost CO<sub>2</sub> v zraku.
- e. Okolica
  - temperaturni gradienti - konvekcijski zračni tokovi,
  - spremembe relativne vlažnosti,
  - kontaminacija s prahom, itd.

### **Nekateri viri negotovosti pri dimenzijskih kalibracijah**

1. Referenčni etaloni in instrumentacija
  - negotovost kalibracije,
  - dolgotrajna stabilnost.
2. Temperaturni vplivi
  - razlika v temperaturi med referenčno kladico in kladico v kalibraciji,
  - nedefiniranost temperature in razteznostnega koeficienta,
  - vplivi so večji pri večjih dolžinah.
3. Elastična kompresija
  - razlika v elastični kompresiji med referenčno kladico in kladico v kalibraciji,
  - nedefiniranost zaradi uporabljene sile in lastnosti materialov,
  - do izraza pride predvsem pri precizijskih meritvah.
4. Kosinusne napake
  - neporavnost referenčne kladice ali kladice v kalibraciji glede na os meritve.
5. Negotovost zaradi geometrije
  - vplivi ploščatosti oziroma sferičnosti konice tipala,

- ravnost, ploščatost, paralelnost površin, oziroma okroglost ali koničnost valjastih oblik,
- pozor pri predpostavljajanju popolne geometrije.

### **Nekateri viri negotovosti pri kalibraciji temperature**

1. Kalibracija referenčnega termometra
2. Negotovosti električnih ali drugih instrumentov za odčitavanje
3. Dolgotrajna stabilnost referenčnega termometra in instrumentov za odčitavanje
4. Ločljivost odčitavanja (stekleni termometri, digitalni termometri)
5. Nestabilnost in temperaturni gradienti kalibracijske kopeli ali peči
6. Globina potopitve referenčnega termometra (če je različna kot na certifikatu)
7. Lastno segrevanje zaradi merilnega toka pri uporovnih termometrih
8. Residualni vplivi pri termočlenih
  - kompenzacijski vodi, referenčni spoji (npr. v ledu),
  - preostale termalne napetosti stikal, preklopnikov (scannerjev), itd.
9. Matematična interpretacija pri korekciji, interpolaciji, itd.

## **9. Ocenjevanje negotovosti**

### **Praktični nasveti pri ocenjevanju negotovosti**

V tem poglavju si bomo s praktičnimi primeri ogledali različne načine ugotavljanja in ocenjevanja različnih prispevkov negotovosti.

### **Negotovost uporabljenih etalonov**

Določevanje dolžine etalonov za dolžino (kladic) se izvaja s primerjavo proti etalonski kladici s pomočjo primerjalnika ali komparatorja. Uporabljena etalonska kladica mora biti kalibrirana. Kalibracijsko poročilo etalonske kladice je podano v obliki:

$$\text{dolžina} = 1,000000 \text{ mm} + 0,050 \text{ } \mu\text{m}, \text{ negotovost } 0,030 \text{ } \mu\text{m}$$

Ponovljivost, ki temelji na dvojnem standardnem odklonu, znaša pri merjenju kladice v primerjalniku kladic  $0,02 \text{ } \mu\text{m}$ . Komparator ima digitalni prikazovalnik z ločljivostjo  $0,01 \text{ } \mu\text{m}$ . Poglejmo, kaj se zgodi z negotovostjo pri eni meritvi in pri štirih meritvah. Če zanemarimo vplive okolja, imamo opravka z naslednjimi viri negotovosti (tabela 7.5).

Tabela 9.1: Negotovosti pri enem in štirih merjenjih kladice.

vir negotovosti	negotovost (ena meritev)	negotovost (štiri meritve)	porazdelitev negotovosti	tip negotovosti
etalonska kladica	0,03 $\mu\text{m}$	0,03 $\mu\text{m}$	normalna	B
merjenje etalonske kladice	0,02 $\mu\text{m}$	0,01 $\mu\text{m}$	normalna	A
odčitek etalonske kladice	0,005 $\mu\text{m}$	0,005 $\mu\text{m}$	pravokotna	B
merjenje kalibrirane kladice	0,02 $\mu\text{m}$	0,01 $\mu\text{m}$	normalna	A
odčitek merjene kladice	0,005 $\mu\text{m}$	0,005 $\mu\text{m}$	pravokotna	B
celotna negotovost (koren seštevka kvadratov)	<b>0,042 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>0,034 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>normalna</b>	

Razlika med merjenjem enkrat in štirikrat je skoraj zanemarljiva. To je posledica dejstva, da je največji prispevek celotni negotovosti negotovost uporabljene etalonske kladice. To pomeni, da najmanjša negotovost, ki jo lahko dosežemo, v nobenem primeru ne more biti manjša kot 0,03  $\mu\text{m}$ .

### Specifikacije proizvajalca

Večina električnih meritev se izvaja pri temperaturi 23 °C. Kadar uporabljamo nov instrument s kalibracijskim certifikatom, ki potrjuje, da je instrument v skladu z navedenimi specifikacijami, lahko uporabimo proizvajalčeve specifikacije za določitev negotovosti.

Kot primer lahko uporabimo digitalni merilnik upornosti z naslednjimi specifikacijami:

negotovost: < 0,01 % celotnega merilnega območja + 2 digita,  
 lezenje: < 0,2 % / leto,  
 vpliv temperature: < 0,3 % / °C.

Meritev smo naredili eno leto po nakupu instrumenta. Temperatura okolja je bila 20 °C. Merilno območje je 200  $\Omega$ . Izmerjena vrednost je bila 50,1367  $\Omega$ .

Ocenimo lahko naslednje negotovosti:

negotovost: 0,01% od 200  $\Omega$  + 2 digita = 0,02  $\Omega$  + 2 \* 0,0001  $\Omega$  = 0,0202  $\Omega$ ,

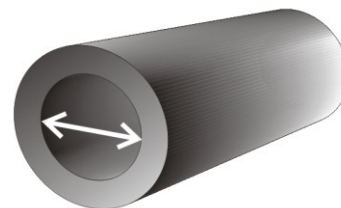
letno lezenje: 1 leto  $\times$  0,2 % / leto  $\times$  50,1367  $\Omega$  = 0,1  $\Omega$  v enem letu,

temperatura: (23 - 20) °C  $\times$  0,3 % / °C  $\times$  50,1367  $\Omega$  = 0,45  $\Omega$ .

Celotna negotovost ob predpostavki, da so posamezni viri negotovosti med seboj neodvisni, znaša 0,46  $\Omega$  (geometrijska vsota posameznih prispevkov).

### Negotovost merjene veličine

Kot primer bomo obravnavali merjenje premera valja na različnih položajih. Uporabili bomo merilne kladice za merjenje premera. Izmerjeni premeri so 2,333 mm, 2,343 mm, 2,112 mm, 2,245 mm in 2,222 mm. Merilna negotovost, določena pri kalibraciji kladice, je podana kot 0,002 mm. Srednja vrednost meritve znaša 2,251 mm, standardni odklon 0,094 mm, standardni odklon srednje vrednosti je 0,042 mm, faktor  $k$  za 95% raven zaupanja za pet vzorcev pa je 2,8. Vidimo lahko, da so merjeni rezultati precej bolj razpršeni, kot bi pričakovali na podlagi merilne negotovosti.



Rezultat lahko predstavimo v več oblikah.

a)

Premer smo izmerili v petih naključnih točkah.

Rezultati, ki smo jih dobili, so: 2,333 mm, 2,343 mm, 2,112 mm, 2,245 mm, in 2,222 mm.

V vseh primerih je bila negotovost meritve 0,002 mm.

To je najbolj nedvoumna podaja rezultatov, ki v popolnosti prepušča interpretacijo rezultatov uporabniku. V principu uporabnik ni zainteresiran za takšno količino informacij. Količino informacij lahko zmanjšamo s podajanjem srednje vrednosti ter najmanjše in največje vrednosti.

b)

Premer je bil izmerjen v petih naključnih točkah.

Najmanjši izmerjeni premer je bil 2,112 mm.

Največji izmerjeni premer je bil 2,343 mm.

Srednja vrednost premera je bila 2,251 mm.

Pri vseh meritvah je bila negotovost meritve 0,002 mm.

Na podlagi tega zapisa ima uporabnik pet različnih dejstev o narejeni meritvi. Število dejstev se s številom meritev ne bo povečalo.

c)

Premer je bil izmerjen v petih naključnih točkah.

Srednja vrednost premera je bila 2,25 mm.

Standardni odklon je bil 0,094 mm.

Pri vsaki meritvi je bila negotovost meritve 0,002 mm.

Ta oblika podaja rezultate je s pomočjo standardnega odklona. Vsebuje štiri pravilne izjave. Lahko se pojavijo vprašanja, če sta standardni odklon in negotovost meritve podobno velika. Vprašanja bi lahko bila naslednja: »Ali je standardni odklon posledica oblike valja ali negotovosti meritve s pomočjo kladic? Kolikšna je negotovost standardnega odklona?«. Zato je verjetno najboljši način predstavitve rezultatov v obliki z eno samo vrednostjo in z merilno negotovostjo. Rezultat bi bil primer d).

d)

Izmerjena vrednost premera je  $(2,25 \pm 0,26)$  mm.

Negotovost je standardnim odklon pomnožen s faktorjem razširitve  $k$ ,  $2,8 \times 0,094 \text{ mm} = 0,26 \text{ mm}$ .

Najboljši način predstavitve rezultatov je v obliki z eno samo vrednostjo, skupaj z merilno negotovostjo. Ta oblika predstavitve merilnega rezultata je najugodnejša za uporabnika. Lahko je sicer razočaran nad negotovostjo (pričakoval je  $0,002 \text{ mm}$  in dobil  $0,26 \text{ mm}$ ), toda dobil je zanesljiv rezultat. Edini problem predstavlja porazdelitev negotovosti. Merilec je predpostavil normalno (Gaussovo) porazdelitev, obstoji pa večja verjetnost, da je porazdelitev pravokotna.

e)

Srednja vrednost premera je  $(2,25 \pm 0,12) \text{ mm}$ .

Negotovost je faktor razširitve pomnožen s standardnim odklonom in deljen s korenom iz števila meritev:  $2,8 \times 0,094 \text{ mm} / \sqrt{5} = 0,12 \text{ mm}$ .

Kadar želimo določiti volumen telesa s pomočjo merjenja dolžine, bomo verjetno precenili negotovost, saj je volumen odvisen od srednje vrednosti in ne od porazdelitve okrog srednje vrednosti.

Lahko zaključimo, da obstojijo različni načini za reševanje problema in predstavitev rezultatov, vendar noben ni idealen. Največji problem je, da je težko ločiti med začasno slabo ponovljivostjo in nepravilnostmi v obliki merjenega valja.

### **Vpliv meritve na merjeno veličino**

Predstavljajmo si meritve temperature zraka s pomočjo platinaste uporovne sonde Pt-100. To je upor, ki ima upornost približno  $100 \Omega$  pri temperaturi  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Elektronski termometri merijo upornost in nato na podlagi točno določenega razmerja upornosti neposredno prikazujejo temperaturo. Princip merjenja temperature s pomočjo uporovnega termometra je takšen, da skozi upor teče konstanten tok  $1 \text{ mA}$ , meri pa se padec napetosti na upor. Vendar ta tok povzroči tudi rahel dvig temperature v temperaturni sondi. To pomeni, da je treba pri meritvi temperature s pomočjo uporovnega termometra upoštevati tudi lastno segrevanje sonde zaradi merilnega toka  $1 \text{ mA}$ .

**Histereza**

Kot primer lahko vzamemo barometer. Kalibracija je narejena, ko tlak narašča ali pada. Pri 1020 mbar je korekcija podana kot  $(+0,2 \pm 0,2)$  mbar, če je tlak naraščal, in  $(-0,8 \pm 0,2)$  mbar, če je tlak padal. Odčitamo 1019,2 mbar. Negotovost odčitavanja je 0,1 mbar. Problem je v tem, da ne vemo, ali je pred odčitavanjem tlak naraščal ali padal. Zato imamo opraviti z naslednjimi negotovostmi:

vir negotovosti	vrednost (mbar)	tip negotovosti	porazdelitev negotovosti	komentar
prejšnja vrednost je neznana	0,55	B	pravokotna	korekcija -0,3 mbar
negotovost umerjanja	0,2	B	pravokotna	
ponovljivost	0,1	A	normalna	
negotovost odčitavanja	0,05	A	normalna	
celotna negotovost	0,55		normalna	

Rezultat:  $(1018,9 \pm 0,6)$  mbar

V primeru, da je barometer eno uro prej kazal tlak 1015 mbar, lahko uporabimo kalibracijske rezultate, ki ustrezajo meritvi, pri kateri tlak narašča. V tem primeru imamo opravka z naslednjimi negotovostmi:

vir negotovosti	vrednost (mbar)	tip negotovosti	porazdelitev negotovosti	komentar
negotovost umerjanja	0,2	B	pravokotna	korekcija +0,2 mbar
ponovljivost	0,1	A	normalna	
negotovost odčitavanja	0,05	A	normalna	
celotna negotovost	0,23		normalna	

Rezultat:  $(1019,4 \pm 0,3)$  mbar

**Lezenje in pogrešek zaradi ničle**

Primer pogreška zaradi ničle lahko opišemo z merjenjem radioaktivnosti radioaktivnega vira. V ionizacijski komori smo prešteli 153 impulzov v časovni periodi ene ure. Na podlagi Poissonove porazdelitve je standardni odklon  $\sqrt{153}=12,3$  impulzov. Če upoštevamo razširitveni faktor 2, rezultat prikažemo kot  $(153 \pm 26)$  dogodkov na uro.

Radioaktivni vir je bil umaknjen in v naslednji uri je bila meritev ponovljena. Prešteli smo 20 dogodkov. Standardni odklon je tako  $\sqrt{20} = 4,5$ , zato radioaktivnost ozadja znaša  $(20 \pm 9)$  dogodkov na uro. Rezultat, korigiran za radioaktivnost ozadja, je  $(133 \pm 28)$  dogodkov na uro (negotovosti sta geometrično sešteti).

Na podlagi teh rezultatov vidimo, da smo imeli v prvem primeru merilni napačno, ker smo pozabili upoštevati radioaktivnost ozadja. Če radioaktivnost ozadja ne bi pozabili in je hkrati tudi ne bi izmerili, bi jo morali oceniti. Ocenili bi jo na primer na  $(20 \pm 20)$  impulzov na uro.

**Temperaturni vpliv** Če temperature prostora ne merimo neposredno in se hkrati v njem ugodno počutimo, lahko predpostavimo, da je temperatura prostora  $20\text{ °C} \pm 4\text{ °C}$ . Pri merjenju upornosti upora temperaturo upoštevamo v izračunu negotovosti.

Upor ima nazivno upornost  $100\ \Omega$  in temperaturni koeficient  $+0,1\% / \text{°C}$ . Uporabljeni merilni instrument ima negotovost  $<0,01\%$  celotnega merilnega območja + 2 digita, lezenje  $<0,2\ \%/ \text{leto}$  in temperaturni vpliv  $<0,3\ \%/ \text{°C}$ .

Uporovni merilnik je nastavljen na  $200\ \Omega$  ohmsko območje, kjer lahko odčitamo:  $100,123\ \Omega$ .

Negotovost merilnega instrumenta je:  $0,01\ \%$  območja + 2 digita =  $0,01\ \% * 200\ \Omega + 2 * 0,001\ \Omega = 0,022\ \Omega$ .

Negotovost lezenja (primer: merilnik je bil umerjen pred šestimi meseci):  $0,1\ \%$  od  $100,123\ \Omega = 0,11\ \Omega$ .

Negotovost, ki je posledica temperature merilnika, umerjenega pri temperaturi  $23\text{ °C}$ . Največje odstopanje od te temperature je  $7\text{ °C}$  ( $=23\text{ °C}-16\text{ °C}$ ), kar pomeni, da je negotovost zaradi temperature  $7\text{ °C} * 0,3\ \%/ \text{°C}$  od  $100,123\ \Omega = 0,22\ \Omega$ .

Skupna negotovost je  $0,24\ \Omega$ . Merilni rezultat lahko podamo v naslednji obliki: Izmerjena upornost je  $(100,13 \pm 0,24)\ \Omega$  pri temperaturi  $(20 \pm 4)\text{ °C}$ .

### Ponovljivost

Premer valja je bil pod enakimi pogoji petkrat izmerjen. Dobili smo naslednje rezultate:  $2,333\text{ mm}$ ;  $2,343\text{ mm}$ ;  $2,112\text{ mm}$ ;  $2,245\text{ mm}$ ;  $2,222\text{ mm}$ . Določimo srednjo vrednost ( $2,251\text{ mm}$ ) in standardni odklon ( $0,094\text{ mm}$ ), ki ga pretvorimo v ustrezno negotovost z razširitvenim faktorjem na osnovi »2s«, kar pri petih meritvah ustreza številu 2,8.

Izmerjeni premer je torej  $(2,25 \pm 0,10)\text{ mm}$ .

### Negotovost posredno merjene veličine, splošno pravilo

Predpostavimo, da je veličina  $y$  odvisna od nekaj veličin  $x_i$  ( $i = 1..m$ ) in da je ta odvisnost predstavljena s pomočjo podane funkcije  $f$ :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m).$$

Vsaka absolutna negotovost posamezne veličine  $x_i$  je označena kot  $u(x_i)$ . Pod predpostavko, da so posamezne veličine  $x_i$  med seboj neodvisne, izračunamo negotovost veličine  $y$  s pomočjo naslednje enačbe:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (9.1),$$

pri čemer je  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  parcialni odvod funkcije po  $x_i$  in ga imenujemo občutljivostni koeficient. To enačbo lahko uporabimo za vse primere, pri katerih so veličine med seboj neodvisne.

Kot primer si pogledajmo merjenje lomnega koeficienta  $n$ , kjer moramo izmeriti vpadni kot  $i$  in kot odboja  $r$ . Lomni



koeficient izračunamo kot:

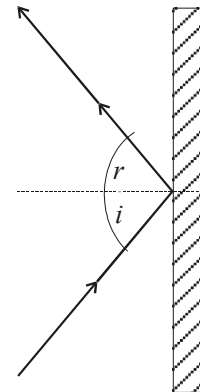
$$n = \frac{\sin i}{\sin r}$$

Če  $n$  parcialno odvajamo po  $i$ , dobimo:

$$\frac{\partial n}{\partial i} = \frac{\cos i}{\sin^2 r}$$

če pa  $n$  odvajamo po  $r$ , dobimo:

$$\frac{\partial n}{\partial r} = \frac{-\sin i \cdot \cos r}{\sin^2 r}$$



Posamezne prispevke negotovosti geometrijsko seštejemo in dobimo negotovost pri merjenju lomnega koeficienta.

$$u(n) = \sqrt{\left(\frac{\cos i}{\sin^2 r} \cdot u(i)\right)^2 + \left(\frac{\sin i \cdot \cos r}{\sin^2 r} \cdot u(r)\right)^2},$$

kjer je  $u(i)$  negotovost vpadnega kota žarka in  $u(r)$  negotovost odbojnega kota žarka.

### Negotovost posredno merjene veličine

Predpostavimo, da so veličine med seboj neodvisne. V primeru volumna posode predpostavimo, da višina ni odvisna od širine in obratno. Enostavni pravili za seštevanje negotovosti dveh neodvisnih veličin sta:

- Negotovost vsote ali razlike dveh veličin je enaka korenu vsote kvadratov **absolutnih** negotovosti obeh veličin.

$$C = A + B \text{ ali } C = A - B$$

$$u(C) = \sqrt{u(A)^2 + u(B)^2}$$

- Negotovost produkta ali kvocienta dveh veličin je enaka korenu vsote kvadratov **relativnih** negotovosti obeh veličin.

$$C = A \cdot B \text{ ali } C = A/B$$

$$w(C) = \sqrt{w(A)^2 + w(B)^2}$$

Zakaj uporabljamo koren vsote kvadratov? Če seštevamo dve veličini, vsako s svojo negotovostjo, potem se lahko v splošnem zgodijo naslednje situacije:

- Obe veličini sta manjši kot podani merilni rezultat.
- Prva veličina je manjša, druga veličina je večja od podanega merilnega rezultata.
- Prva veličina je večja, druga veličina je manjša od podanega merilnega rezultata.
- Obe veličini sta večji od podanega merilnega rezultata.

Če enostavno seštejemo negotovosti obeh veličin, upoštevamo samo

primera a) in d). To pomeni, da smo ocenili preveliko negotovost. Če negotovosti seštejemo kvadratično, upoštevamo tudi primera b) in c).

Kvadratično ali geometrijsko seštevanje predstavlja bolj realno oceno negotovosti kot enostavno linearno seštevanje.

Kot primer izračunajmo obseg in površino pravokotnika ter pripadajoče negotovosti.

Dolžina pravokotnika  $a = (120,0 \pm 0,5)$  mm. Širina pravokotnika  $b = (50,0 \pm 0,5)$  mm. Absolutne negotovosti bomo prikazovali s simboli  $u(a)$  in  $u(b)$ .

Obseg pravokotnika je:  $o = 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot (120,0 \text{ mm} + 50,0 \text{ mm}) = 340,0 \text{ mm}$ .

Negotovost obsega lahko predstavimo kot negotovost vsote:

$$u(o) = u(2 \cdot (a + b)) = \sqrt{u^2(a) + u^2(b)} = 1,4 \text{ mm}.$$

Površina pravokotnika je podana kot:  $A = a \cdot b = 120,0 \text{ mm} \cdot 50,0 \text{ mm} = 6000 \text{ mm}^2$ . Absolutna negotovost površine je  $u(A)$ . Relativna negotovost površine je  $w(A) = u(A)/A$  in je enaka kvadratnem seštevku dveh relativnih negotovosti:

$$w(A) = \frac{u(A)}{A} = \sqrt{\left(\frac{u(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{u(b)}{b}\right)^2}.$$

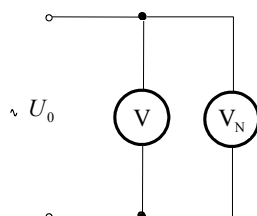
Relativna negotovost površine je 0,011, absolutna negotovost pa je  $u(A) = 0,011 \cdot 6000 \text{ mm}^2 = 65 \text{ mm}^2$ .

## Praktični primeri izračuna negotovosti

### Primer umerjanja izmeničnega voltmetra

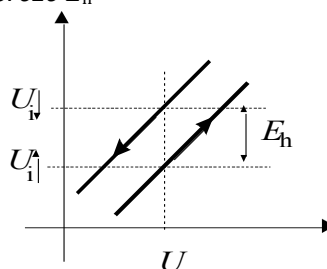
Voltmeter bomo v našem primeru umerili **primerjalno**. To bomo storili tako, da bomo pri referenčnih pogojih (frekvenca, temperatura, vlaga,...) postopoma izbirali napetosti, s katerimi nastavimo kontrolne točke na skali instrumenta. Razlika med napetostjo  $U_i$ , ki jo kaže umerjani voltmeter, in napetostjo na njegovih sponkah (in sponkah referenčnega voltmetra – etalona)  $U$ , je **lastni pogrešek  $E$**

$$E = U_i - U.$$



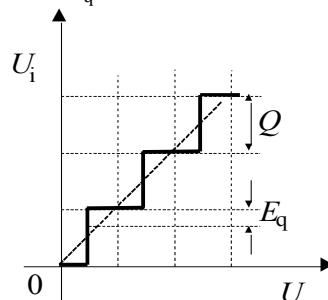
Analiza negotovosti pri umerjanju je velikokrat zahtevna in dolgotrajna dejavnost in vključuje najpomembnejše prispevke pogrešku  $E$ . To so pogrešek zaradi histereze oziroma mrtvega pasu  $E_h$ , pogrešek zaradi ločljivosti  $E_q$ , pogrešek zaradi dolgoročne časovne nestabilnosti (lezenje)  $E_t$  in pogrešek ponovljivosti  $E_p$ . Slednji je sestavljen iz dveh delov: prvič časovna nestabilnost vplivnih veličin povzroča razpršenost izmerkov merilnega instrumenta samega (notranji razlogi) in, drugič, pri umerjanju se ne moremo izogniti pogrešku zaradi kratkoročne časovne nestabilnosti merilnega kroga in vpliva nanj (zunanji razlogi).

Pogrešek zaradi histereze  $E_h$



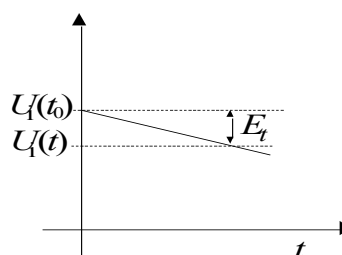
Analogni instrumenti imajo zaradi mehanskih in feromagnetnih delov pogosto nezanemarljivo **histerezo**. To pomeni, da je kazanje voltmetra pri isti napetosti na sponkah voltmetra, lahko odvisno od tega, ali smo do te napetosti prišli s povečevanjem ali zmanjševanjem. Pri isti napetosti  $U$  lahko torej izmerimo dve različni napetosti  $U_i$ . Da pravilno ugotovimo histerezo, moramo napetost nastavljati počasi brez naglih sprememb in prenihajev.

Pogrešek zaradi ločljivosti  $E_q$



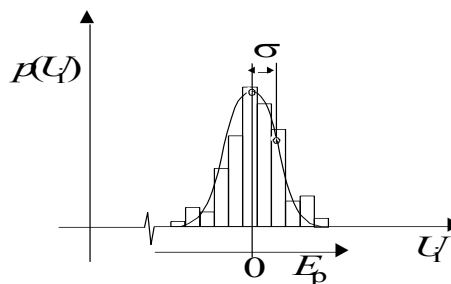
Določimo ga na način, ki je opisan v poglavju o ločljivosti na strani 177.

Pogrešek zaradi dolgoročne časovne nestabilnosti (lezenje, časovni drift)  $E_t$



Vsakemu instrumentu se zaradi staranja spreminjajo mehanske in elektromagnetne lastnosti, kar se posledično odraža v spremenjenem kazanju, ki se s časom spreminja. Zato ne moremo predpostaviti, da bodo pogreški, ki smo jih ugotovili s kalibracijo, veljali tudi kasneje (čez pol leta, leto, dve leti) pri njegovi uporabi.

Pogrešek zaradi kratkoročne časovne nestabilnosti (ponovljivost)  $E_p$



Razpršenost izmerjenih vrednosti izvira iz dejstva, da vplivne veličine, ki učinkujejo na umerjani voltmeter, niso časovno popolnoma stalne, temveč nihajo okrog referenčnih vrednosti. Zato se iz tega izvirajoči pogrešek s časom naključno spreminja, tako po velikosti, kot po predznaku (notranji razlogi). Dodatna razpršenost izmerkov pa nastane zaradi motenj v merilnem krogu – galvanske, kapacitivne in induktivne povezave z okolico, šum referenčnega voltmetra, časovna nestabilnost elementov vezja – nestalnosti napetostnega vira  $U_0$ , uporov  $R_1$  in  $R_2$ , prehodne upornosti, itn (zunanji razlogi). Pri vrhunskih zahtevah je potrebno upoštevati tudi padec napetosti na priključnih žicah voltmerov itn.

Za pogrešek umerjanega voltmetra zato lahko pišemo

$$E = U_i - U = E_h + E_q + E_t + E_p.$$

Zavedati se moramo, da ima tudi referenčni voltmeter svoj pogrešek  $E_N$  (in negotovost  $u_N$ ), ki sta ugotovljena z njegovo kalibracijo na višjem nivoju. Obe vrednosti sta običajno podani na njegovem kalibracijskem certifikatu, zato velja

$$E_N = U_{N,i} - U.$$

Iz obeh zadnjih enačb izhaja za kazanje umerjanega voltmetra

$$U_i = U + E = U_{N,i} - E_N + E_h + E_q + E_t + E_p.$$

Če je za referenčni voltmeter dana tudi korekcija, pa velja

$$U_i = U + E = U_{N,i} + K_N + E_h + E_q + E_t + E_p$$

Negotovost referenčnega voltmetra  $u(E_N)$  je dana v njegovem certifikatu, pri čemer moramo upoštevati, da je tam podana razširjena negotovost s faktorjem razširitve  $k = 2$  (standard IEC/ISO 17025)

$$u(E_N) = \frac{U(E_N)}{k}.$$

Negotovost zaradi histereze je

$$u(E_h) = \frac{E_{h,\max}}{2\sqrt{3}},$$

saj predpostavljamo enakomerno porazdelitev gostote verjetnosti.

Negotovost zaradi ločljivosti je

$$u(E_q) = \frac{Q}{2\sqrt{3}},$$

saj velja predpostavka o enakomerni porazdelitvi tudi v tem primeru. Negotovost zaradi ločljivosti referenčnega voltmetra je že zajeta v  $u(E_N)$ .

Negotovost zaradi dolgoročne časovne nestabilnosti lastnosti instrumenta je lahko tipa A, ali pa tipa B. Če imamo na voljo podatke za daljše obdobje umerjanj, potem imamo opraviti z negotovostjo tipa A. V nasprotnem primeru lahko lezenje le ocenimo oziroma napovemo na podlagi manjšega števila podatkov ali pa na podlagi izkušenj, zato imamo opraviti z negotovostjo tipa B. V tem primeru največkrat predpostavljamo enakomerno porazdelitev. Podobno velja za kratkoročno časovno nestabilnost.

Negotovost zaradi ponovljivosti se izraža z eksperimentalnim

standardnim odklonom, ki je enak

$$u(E_p) = s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^m f_j (x_{i,j} - \bar{x})^2},$$

če imamo izmerke razvrščene v razrede, tako kot je ponazorjeno s histogramom. Če pa imamo na voljo le najmanjši in največji pogrešek in predpostavimo enakomerno porazdelitev, negotovost lahko preprosto ocenimo z

$$u(E_p) = \frac{|E_{p,\max} - E_{p,\min}|}{2\sqrt{3}}.$$

Celotna merilna negotovost za določeno kontrolno točko bo tako

$$u_c(U_i) = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial U_i}{\partial E_N}\right)u(E_N)\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial U_i}{\partial E_h}\right)u(E_h)\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial U_i}{\partial E_q}\right)u(E_q)\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial U_i}{\partial E_t}\right)u(E_t)\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial U_i}{\partial E_p}\right)u(E_p)\right]^2}$$

$$u_c(U_i) = \sqrt{u^2(E_N) + u^2(E_h) + u^2(E_q) + u^2(E_t) + u^2(E_p)}$$

### Primer izračuna nadtemperature navitja

Temperatura je eden izmed pomembnih parametrov pri izdelavi in varnem delovanju elektromotorjev. Ker se temperature v notranjosti navitja ne da enostavno izmeriti, za merjenje notranje temperature navitja uporabljamo metodo nadtemperature navitja.

Izmerimo upornosti hladnega in toplega bakrenega navitja. S pomočjo temperaturne konstante bakra lahko določimo temperaturno razliko  $\Delta t$  med zunanostjo in notranostjo navitja.

Velja

$$\Delta t = \frac{(R_2 - R_1)}{R_1} (k + t_1) - (t_2 - t_1)$$

kjer je

- upornost hladnega navitja:  $R_1 = 7,5 \Omega$ ,
- upornost toplega navitja:  $R_2 = 106 \Omega$ ,
- temperatura okolice pred preizkusom (v trenutku merjenja  $R_1$ ):  $t_1 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- temperatura okolice po preizkusu (v trenutku merjenja  $R_2$ ):  $t_2 = 24 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- temperaturna konstanta bakra  $k = 234,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Razširjena negotovost vseh meritev je 0,5 %.

$$w(R_1) = w(R_2) = 0,005 \quad w(t_1) = w(t_2) = 0,005$$

Določimo občutljivostne koeficiente.

$$c_1 = \frac{\partial \Delta t}{\partial R_1} = \frac{-R_2}{R_1^2} (k + t_1) = \frac{-106 \Omega}{87,5^2 \Omega^2} (234,5^\circ\text{C} + 23^\circ\text{C}) = 3,5650611^\circ\text{C} / \Omega$$

$$c_1^2 = \left( \frac{\partial \Delta t}{\partial R_1} \right)^2 = 12,70966 (\text{C} / \Omega)^2$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta t}{\partial R_2} = \frac{k + t_1}{R_1} = \frac{234,5^\circ\text{C} + 23^\circ\text{C}}{87,5 \Omega} = 2,9428^\circ\text{C} / \Omega$$

$$c_2^2 = \left( \frac{\partial \Delta t}{\partial R_2} \right)^2 = 8,66 (\text{C} / \Omega)^2$$

$$c_3 = \frac{\partial \Delta t}{\partial t_1} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{106 \Omega}{87,5 \Omega} = 1,211428$$

$$c_3^2 = \left( \frac{\partial \Delta t}{\partial t_1} \right)^2 = 1,467559$$

$$c_4 = \frac{\partial \Delta t}{\partial t_2} = -1$$

$$c_4^2 = \left( \frac{\partial \Delta t}{\partial t_2} \right)^2 = 1$$

S pomočjo koeficientov lahko izračunamo posamezne prispevke k skupni merilni negotovosti.

$$u(R_1) = w(R_1) \cdot R_1$$

$$S_{y_{R_1}}^2 = u^2(R_1)$$

$$S_{y_{R_1}}^2 = (0,5\% \cdot R_1)^2 = \left( \frac{0,5}{100} \cdot 87,5 \Omega \right)^2 = 0,19140625 \Omega^2$$

$$S_{y_{R_2}}^2 = (0,5\% \cdot R_2)^2 = \left( \frac{0,5}{100} \cdot 106 \Omega \right)^2 = 0,2809 \Omega^2$$

$$S_{y_{t_1}}^2 = (0,5\% \cdot t_1)^2 = \left( \frac{0,5}{100} \cdot 23^\circ\text{C} \right)^2 = 0,013225^\circ\text{C}^2$$

$$S_{y_{t_2}}^2 = (0,5\% \cdot t_2)^2 = \left( \frac{0,5}{100} \cdot 24^\circ\text{C} \right)^2 = 0,0144^\circ\text{C}^2$$

Skupna negotovost znaša:

$$S_{y_{\Delta t}}^2 = \left( \frac{\partial \Delta t}{\partial R_1} \right)^2 \cdot S_{y_{R_1}}^2 + \left( \frac{\partial \Delta t}{\partial R_2} \right)^2 \cdot S_{y_{R_2}}^2 + \left( \frac{\partial \Delta t}{\partial t_1} \right)^2 \cdot S_{y_{t_1}}^2 + \left( \frac{\partial \Delta t}{\partial t_2} \right)^2 \cdot S_{y_{t_2}}^2$$

$$S_{y_{\Delta t}}^2 = 12,70966 \left( \frac{^\circ\text{C}}{\Omega} \right)^2 \cdot 0,19140625 \Omega^2 + 8,66 \left( \frac{^\circ\text{C}}{\Omega} \right)^2 \cdot 0,2809 \Omega^2 + 1,467559 \cdot 0,013225^\circ\text{C}^2 + 1 \cdot 0,0144^\circ\text{C}^2$$

$$S_{y_{\Delta t}}^2 = 4,89911082715^\circ\text{C}^2 = u^2(\Delta t)$$

$$u(\Delta t) = 2,21339350933131^\circ\text{C} \equiv 2,3 \text{ K}$$

kjer je negotovost zapisana z dvema pomembnima ciframa.

Temperaturna razlika znaša

$$\Delta t = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (k + t_1) - (t_2 - t_1)$$

$$\Delta t = \frac{(106\Omega - 87,58\Omega)}{87,5\Omega} (234,5^\circ\text{C} + 23^\circ\text{C}) - (24^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C}) =$$

$$= 53,207428^\circ\text{C} = 53,207428\text{ K} \approx 53,2\text{ K}$$

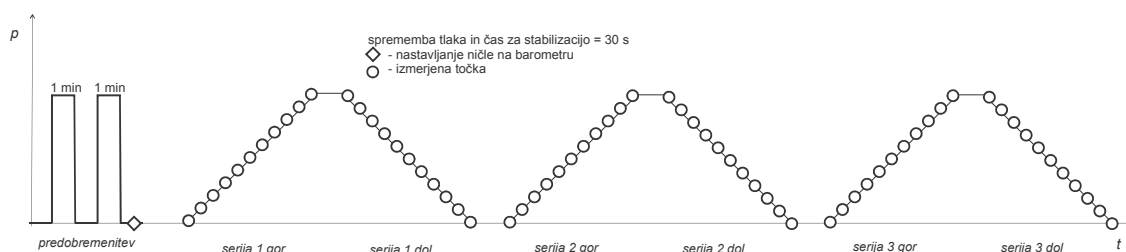
Lahko zapišemo skupni rezultat meritve

$$\Delta t = (53,2 \pm 2,3)\text{ K} = 53,2(1 \pm 4,4\%)\text{K}.$$

Opazimo, da je negotovost temperaturne razlike več kot 4%, čeprav so bile posamične merilne negotovosti samo 0,5 %.

### Primer umerjanja barometra

Barometer umerjamo po primerjalni metodi z referenčnim etalonom tlaka – referenčnim manometrom. Umerjani barometer in referenčni manometer sta priključena na isti generator tlaka. Uporabljen je bil kalibracijski postopek, ki je prikazan na spodnji sliki. Kalibracijski medij je bil dušik.



Merilno negotovost posamezne izmerjene točke (krožec na zgornji sliki) izračunamo z geometrijsko vsoto največjih prispevkov. Prispevki negotovosti so negotovosti referenčnega manometra, negotovosti zaradi merilne metode in negotovosti zaradi meritev. Negotovosti referenčnega manometra so merilna negotovost in negotovost zaradi njegove korekcije, ki sta podani v njegovem certifikatu, negotovost zaradi njegovega časovnega drifta, negotovost zaradi njegove ločljivosti in negotovost zaradi ponovljivosti njegovih meritev. Dodati moramo še negotovosti zaradi ločljivosti umerjanega barometra in barometrovo ponovljivost. Negotovosti zaradi meritev so posledica popravkov hidrostatičnega tlaka in merilne postavitve in jih ocenimo na podlagi izkušenj.





Za vsako nastavljeno tlačno točko zapišemo referenčni tlak, izmerjeni tlak, kot ga pokaže umerjani barometer, pogrešek barometra in negotovost meritve v tej točki.

### Primer izračuna prostornine goriva na bencinski črpalki

Na bencinskih črpalkah merijo prostornino goriva v rezervoarjih na podlagi tehtanja in poznavanja gostote goriva. Ko dobavitelj goriva s cisterno pripelje gorivo na bencinsko črpalko, delavci na črpalki s pomočjo enačbe za gostoto goriva  $\rho$  lahko določajo prostornino dobavljenega goriva  $V$ .

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$\rho = 717,831 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 0,8107 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{C}} \cdot t$$



V enačbi za gostoto  $\rho$  nastopa tudi temperatura  $t$ . Torej je točnost merjenja temperature pomemben del meritve.

Denimo, da v poletnih mesecih črpalka naroči 30 000 litrov goriva pri temperaturi 30 °C. Tehtnica, ki je vgrajena v rezervoarjih, ima negotovost tehtanja 50 kg. Termometer, s katerim delavci pomerijo temperaturo goriva, pa ima merilno negotovost merjenja temperature 0,5 °C.

Zanima nas, kakšna je dejanska prostornina goriva, ki ga črpalka dobi, oziroma zanima nas, kakšna je negotovost naročenih 30 000 litrov?

Najprej izračunamo gostoto in maso goriva pri  $t = 30$  °C.

$$\rho = 717,831 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 0,8107 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{C}} \cdot 30 \text{ C} = 742,152 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m = \rho V = 742,152 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 30 \text{ m}^3 = 22\,264,56 \text{ kg}$$

Negotovost merjenja prostornine je sestavljena iz dveh prispevkov – prispevka zaradi merjenja temperature, oziroma posledično gostote goriva in prispevka zaradi merjenja mase goriva.

$$u_\rho = \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot u_t$$

$$u_\rho = 0,8107 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{C}} \cdot u_t = 0,8107 \cdot 0,5 \text{ C} = 0,40535 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Lahko zapišemo

$$u_V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial m} \cdot u_m\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho} \cdot u_\rho\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho} \cdot u_m\right)^2 + \left(-\frac{m}{\rho^2} \cdot u_\rho\right)^2}$$

$$u_v = \sqrt{\left( \frac{1}{742,152 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \cdot 50 \text{ kg} \right)^2 + \left( -\frac{22264,56 \text{ kg}}{\left(742,152 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)^2} \cdot 0,40535 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)^2}$$

$$u_v = 0,069335572 \text{ m}^3 \approx 70 \text{ litrov}$$

Zapišemo rezultat:

$$V = (30\,000 \pm 70) \text{ l}$$

in zaključimo, da verjetnost, da bencinska črpalka, ki za merjenje prostornine dobavljenega goriva uporablja termometer z merilno negotovostjo  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  in tehtnico z negotovostjo  $50 \text{ kg}$ , od dobavitelja dobi  $70 \text{ litrov}$  preveč, lahko pa tudi  $70 \text{ litrov}$  premalo, znaša  $68,3 \%$ .

### Primer izračuna temperature vode z uporovnim termometrom

Z uporovnim termometrom (Pt-100, občutljivost  $0,4 \text{ } \Omega/^\circ\text{C}$ ) smo 8 krat izmerili temperaturo vode. Za termometer so nam na voljo kalibracijski certifikati. Meritev upornosti termometra smo izvedli s pomočjo ohmmeta, za katerega imamo na voljo nekaj zaporednih kalibracijskih certifikatov in specifikacije proizvajalca. Meritev je bila izvedena pri temperaturi okolice  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Zanima nas, kolikšna je temperatura vode.

Izmerjene vrednosti upornosti:

$120,153 \text{ } \Omega$ ;  $120,155 \text{ } \Omega$ ;  $120,154 \text{ } \Omega$ ;  $120,153 \text{ } \Omega$ ;  $120,154 \text{ } \Omega$ ;  $120,152 \text{ } \Omega$ ;  $120,156 \text{ } \Omega$ ;  $120,154 \text{ } \Omega$ ;

Kalibracijski certifikat ohmmeta (kalibriran pri  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ )

- negotovost v območju do  $200 \text{ } \Omega$  znaša  $20 \text{ ppm}$  območja
- korekcija izmerjene upornosti znaša  $-2 \times 10^{-3} \text{ } \Omega$
- specifikacija proizvajalca navaja letni drift  $10 \text{ ppm}$
- temperaturni koeficient znaša  $2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$

Kalibracijski certifikat termometra

- negotovost  $25 \text{ mK}$  ( $10 \text{ m } \Omega$ )
- povprečen drift na podlagi zadnjih štirih kalibracijskih certifikatov znaša  $10 \text{ mK}$  ( $4 \text{ m } \Omega$ ) na leto
- funkcijska odvisnost upornosti od temperature

Iz meritev lahko izračunamo naslednje parametre:

- srednja vrednost izmerjenih upornosti znaša  $120,1539 \text{ } \Omega$
- standardni odklon izmerjenih upornosti znaša  $0,0013 \text{ } \Omega$  ( $1\text{s}$ )

Specifikacije merilnih instrumentov in podatki v kalibracijskih certifikatih določijo:

- negotovost ohmmeta znaša  $0,004 \text{ } \Omega$  ( $2\text{s}$ )
- korekcija ohmmeta znaša  $-0,002 \text{ } \Omega$
- letni drift ohmmeta znaša  $0,002 \text{ } \Omega$  ( $2\text{s}$ ), pravokotna porazdelitev

- različne temperature pri meritvi in kalibraciji prispevajo k negotovosti  $0,0012 \Omega$  ( $2s$ ), pravokotna porazdelitev
- negotovost uporabljenega termometra  $0,010 \Omega$  ( $2s$ )
- drift uporabljenega termometra  $0,004 \Omega$  ( $2s$ ), pravokotna porazdelitev

Tabela 9.2: Tabela prispevkov negotovosti.

prispevek	standardna negotovost	porazdelitev	koeficient občutljivosti	negotovost ( $\Omega$ )
$u_{st.dev. meritve}$	$0,0013 \Omega \times 1,185$	normalna	1,0	0,0016
$u_{ohmmeter}$	$0,004/2 \Omega$	normalna	1,0	0,002
$u_{drift}$	$0,002/2\sqrt{3} \Omega$	pravokotna	1,0	0,0006
$u_{raz.temperatur}$	$0,0012/\sqrt{3} \Omega$	pravokotna	1,0	0,0004
$u_{termometra}$ certif.	$0,010/2 \Omega$	normalna	1,0	0,005
drift	$0,004/2\sqrt{3} \Omega$	pravokotna	1,0	0,0012
$u_{skupna}$ <b><math>U_{razširjena}</math> (<math>2s</math>)</b>				0,0058 0,012

Zapišemo rezultat:

$$R = (120,154 - 0,002 \pm 0,012) \Omega$$

$$t = (50,08 \pm 0,03) ^\circ\text{C}$$

## Literatura poglavja

- [1] International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM), JCGM 2008, <http://www.bipm.org> in SIST-V ISO/IEC Vodilo 99:2012 Mednarodni slovar za meroslovje - Osnovni in splošni koncepti ter z njimi povezani izrazi (VIM).
- [2] Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration (EA 4/02), <http://www.european-accreditation.org>
- [3] Splošne zahteve za usposobljenost preskuševalnih in kalibracijskih laboratorijev (SIST EN ISO/IEC 17025:2005), Slovenski inštitut za standardizacijo, 2005
- [4] Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), JCGM 2008, <http://www.bipm.org>
- [5] Stephan Mieke, Wolfgang Schmid, Training Course: Determination of Measurement Uncertainty according to the GUM, EURAMET e.V., 2010
- [6] *Slovar standardizacije in z njo povezanimi dejavnostmi* SIST EN 45020, USM, 1999



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta *za elektrotehniko*



---

## METROLOGIJA

Urednik: Gregor Geršak

Avtorji: Janko Drnovšek, Jovan Bojkovski, Gregor Geršak, Igor Pušnik, Domen Hudoklin  
Izdaja 1

Recenzenti: prof. dr. Bojan Ačko, prof. dr. Franc Bergelj, doc. dr. Rado Lapuh, mag. Matej Grum

Uporabljeni materiali v poglavjih s področja merilne negotovosti se zgledujejo po predlogah European Association of National Metrology Institutes EURAMET e.V.  
Oblikovanje in prelom: Gregor Geršak

Laboratorij za metrologijo in kakovost  
Fakulteta za elektrotehniko  
Univerza v Ljubljani  
2012



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za elektrotehniko  
Laboratorij za metrologijo in kakovost

