



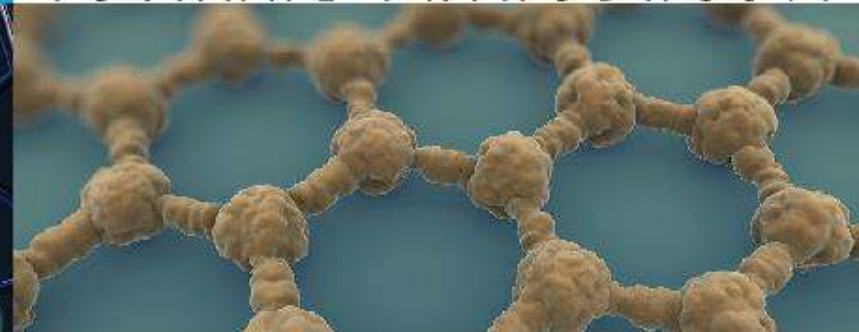
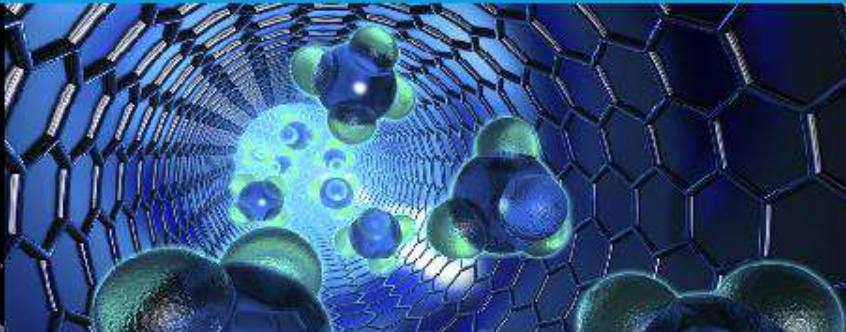
Pomen senzorjev v industriji 4.0

Rudi Panjtar, SRIP ToP



SRIP TOP

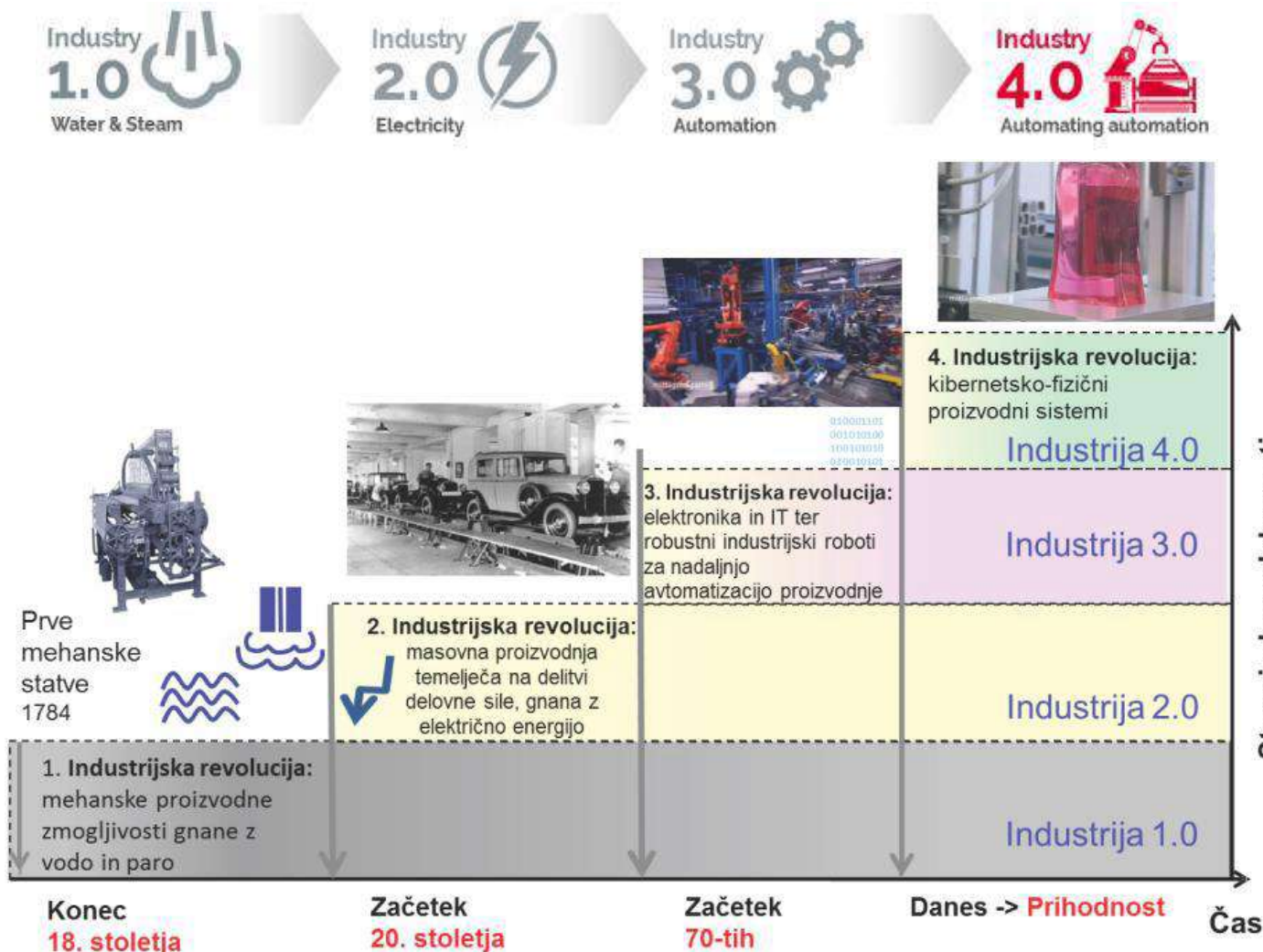
Strateško razvojno inovacijsko partnerstvo
TOVARNE PRIHODNOSTI



Kazalo

- Industrija 4.0
- Pametna tovarna
- Razlike med tradicionalno in pametno tovarno
- Senzorji
- Tipične vrste senzorjev v pametni tovarni
- Specifični senzorji
- Inteligentni senzorji
- Lastnosti inteligentnih senzorjev

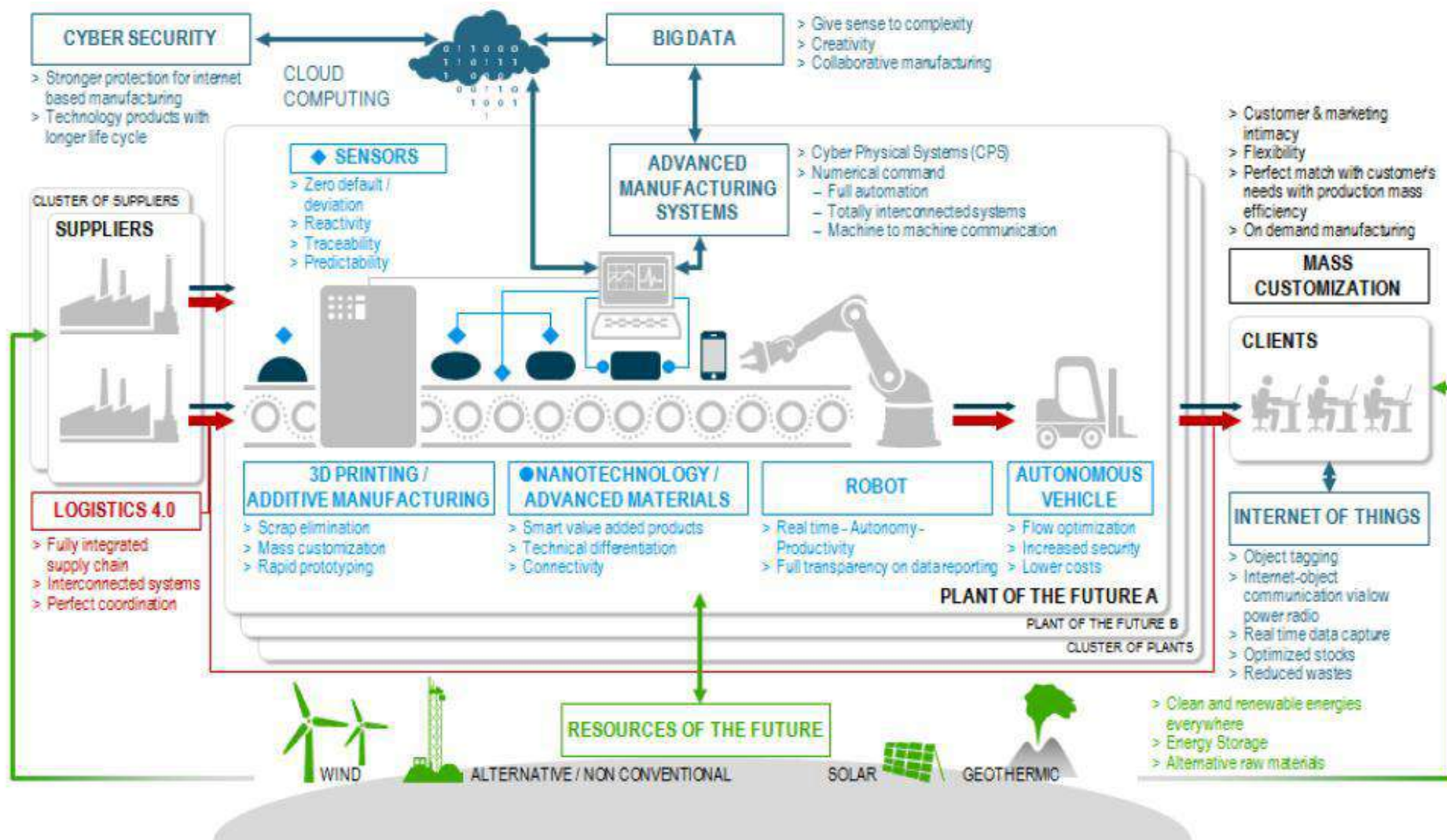
Industrija 4.0



KAJ PRINAŠA INDUSTRIJA 4.0

- nov nivo organiziranosti in upravljanja celotne vrednostne verige
- kibernetско-fizični proizvodni sistemi (CPS)
- celovita digitalizacija proizvodnje
- sposobnost (samostojnega) komuniciranja

Pametna tovarna



Pametna tovarna je nadgradnja staromodne avtomatizacije v povezan in prožen sistem, in ki predstavlja neprekinjen tok podatkov med povezanimi operacijami in proizvodnimi sistemi, ki se lahko učijo in prilagajajo spreminjajočim se zahtevam v realnem času.

Razlike med tradicionalno in pametno tovarno

Traditional Factory	Smart Factory
Manual and isolated processes, operations; no integration with different systems and tools.	Digitized and integrated processes, operations; complete integration with existing systems, new systems and tools.
Legacy systems with frequent machine failures and increased maintenance costs.	Smart systems with improved machine utilization and reduced maintenance costs.
Tied to systems or machines for data, therefore zero or limited data for decision making; process-driven decision making.	Update or receive data on the go, therefore complete data for faster decision making; data-driven decision making.
Limited technology involvement.	Internet-of-things (IoT), sensor, mobile app, radio frequency identification (RFID) enabled.
Zero or limited visibility on operations, productivity data.	Increased transparency, visibility on operations and production data.
Limited innovation in production development.	Smart and intelligent products.
Inaccurate asset tracking process and poor resource utilization.	Accurate asset tracking using IoT, RFID; improved resource utilization.
Poor interoperability.	High interoperability.
The production line is fixed unless manually reconfigured by people with system power down.	When switching between different types of products, the needed resources and the route to link these resources should be reconfigured automatically and online.

4 glavne značilnosti pametne tovarne

- **Senzorji:** to so naprave, ki imajo sposobnost samoorganiziranja, učenja in vzdrževanja okoljskih informacij za analizo vedenja in sposobnosti. Zato lahko senzorji sprejemajo odločitve, ki jim omogočajo prilagajanje spremembam v okolju.
- **Interoperabilnost:** s povezovanjem med različnimi napravami je mogoče izboljšati usklajevanje med njimi, kar omogoča fleksibilnost v konfiguracijskih protokolih proizvodnega sistema.
- **Integracija:** roboti in umetna inteligenca (AI) pametnim tovarnam omogočajo visoko stopnjo integracije med procesi. AI, skupaj z vključevanjem človeških intelektualnih zmožnosti, omogoča tovarnam, da izvajajo analize in odločanje.
- **Tehnike virtualne resničnosti:** VR je ena od komponent pametne tovarne na visoki ravni, saj olajša integracijo človeka in stroja z virtualizacijo proizvodnih procesov z uporabo računalnikov, obdelave signalov, animacijske tehnologije, inteligentnega sklepanja, predvidevanja ter simulacijskih in multimedijskih tehnologij.

- Pametne tovarne sestavljajo inteligentni stroji, naprave in nadzorna oprema, ki nadzira vitalne parametre proizvodnih procesov in stabilno sodelovanje med stroji, kar povečuje povpraševanje po zanesljivih senzorjih. Senzorji so ključni elementi v pametni tovarni, saj zbirajo in v proizvodnjo vnašajo natančne podatke za izboljšanje predvsem kakovosti izdelkov.
- Senzorji so električne, opto-električne ali elektronske naprave sestavljene iz občutljivih materialov, ki pomagajo ugotoviti prisotnost določene veličine ali funkcionalnosti. V mnogih primerih se fizični dražljaji s pomočjo senzorjev pretvorijo v električni signale, ki jih je mogoče ovrednotiti in analizirati za odločanje o izvajanih proizvodnih operacijah. Razvoj senzorskih tehnologij je proizvajalcem omogočil nadzor in pridobivanje podatkov kot še nikoli doslej.
- V pametnih tovarnah uporabljamo tako aktivne kot pasivne fizične senzorje
 - Aktivni senzorji potrebujejo fizikalno stimulacijo da lahko zaznavajo merjeno veličino (npr. senzor barve predhodno potrebuje pravilno osvetlitev)
 - Pasivni senzorji ne potrebujejo dodatne fizikalne stimulacije, saj je ta že prisotna (npr. IR senzor)

Tipične vrste senzorjev v pametni tovarni

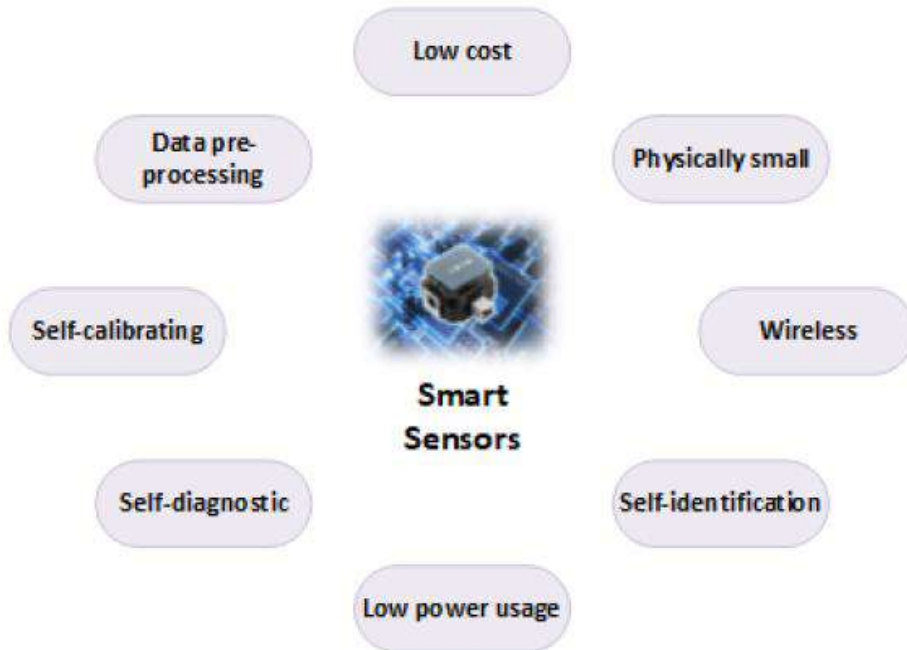
- Temperaturni senzorji
 - Thermistor
 - Resistance thermometer
 - Thermocouple
- Senzorji tlaka
 - Resonant
 - Capacitive
 - Piezoelectric
 - Optical
- Senzorji pretoka
 - Positive displacement
 - Mass Flow
 - Velocity Flow
- Senzorji pozicije
 - Potentiometric
 - Capacitive
 - Magnetostrictive Linear Position
 - Eddy Current based
 - Optical
- Senzorji sile
 - Load cells
 - Strain gauges
 - Force sensing resistors (FSR)
- Slikovni senzorji
 - CCD
 - CMOS

Specifični senzorji

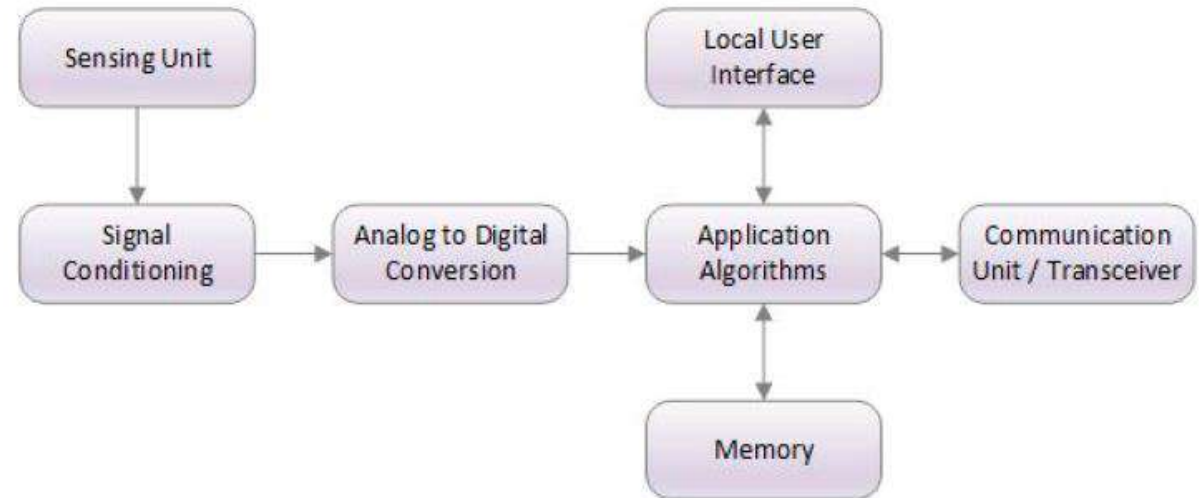
- Plazemski senzorji (kontrola debeline plazemskega nanosa)
- Bio senzorji (uporabljajo se v živilski industriji za merjenje ogljikovih hidratov, alkoholov in kislin, na primer med postopki nadzora kakovosti. Uporabljajo se tudi za preverjanje fermentacije med proizvodnjo piva, jogurta in brezalkoholnih pijač.)
- Okoljski senzorji (merjenje CO₂, hrupa, škodljivih plinov, radioaktivnosti...)
- Ultrazvočni senzorji (merjenje nivojev in razdalj)
- Mikro senzorji - MEMS (integracija z mikroelektroniko)
- Nano senzorji- NEMS (merilniki pospeška, biološki senzorji in senzorji kemikalij v zraku)
- Virtualni senzor (navidezni senzor je vrsta programske opreme, ki glede na različne razpoložljive informacije/podatke pripravlja izvedene podatke kot kombinacijo pridobljenih podatkov (lahko iz več fizičnih senzorjev). Z uporabo umetne inteligence se nauči interpretirati razmerja med različnimi spremenljivkami in npr. opazuje odčitke iz različnih instrumentov).

Inteligentni senzorji

Tipične lastnosti



Tipični gradniki inteligentnega sensorja



- Z integracijo računalništva in IoT v industrijskih procesih so fizični senzorji preoblikovani v inteligentne senzorje, ki omogočajo izvedbo zapletenih izračunov z zbranimi podatki.
- Kompleksne večplastne operacije, kot so zbiranje surovih podatkov, prilagajanje občutljivosti in filtriranje, zaznavanje gibanja, analiza, in komunikacija so glavne funkcije inteligentnih senzorjev
- Informacije več senzorjev lahko kombiniramo, na primer podatke o temperaturnem in tlačnem senzorju lahko npr. uporabimo za sklepanje o začetku a mehanske okvare.

Lastnosti inteligentnih senzorjev

- **Zmožnost kalibracije**

Sposobnost senzorja, da določi svojo normalno funkcijo, se imenuje kalibracijska sposobnost. V mnogih primerih je samokalibracija preprosta in za različne senzorje so na voljo različne tehnike kalibracije:

- Senzorji z električnim izhodom izvajajo kalibracijo z uporabo znane referenčne vrednosti napetosti.
- Senzorji, kot so merilne celice, ki se uporabljajo za tehtalne sisteme, lahko svojo moč prilagodijo ničli, kadar ni sile.
- Drugi senzorji lahko uporabljajo kalibracijske vpogledne (look-up) tabele (velika poraba spominskih kapacitet) ali pa interpolacijo (matrika korekcijskih točk).

- **Samodiagnoza napak**

- Inteligentni senzorji izvajajo samodiagnozo z opazovanjem notranjih signalov za napake. Ločevanje med običajnimi merilnimi odstopanji in napakami senzorjev je za nekatere senzorje lahko izziv, ki ga rešujejo s shranjevanjem več izmerjenih vrednosti okoli nastavitvene točke ter izračunom najmanjših in največjih vrednosti za izmerjeno količino.
- Da bi merili vpliv napake senzorja na izmerjeno količino, se uporabljajo tehnike negotovosti. To omogoča nadaljevanje uporabe senzorja po nastanku napake.

Hvala za vašo pozornost!



Strateško razvojno inovacijsko partnerstvo
TOVARNE PRIHODNOSTI

Dodana vrednost povezovanja!

Tržaška cesta 315, 1000 Ljubljana, Slovenija

W www.ctop.ijs.si E: ctop@ijs.si



Rudi Panjtar

TEMPERATURNI SENZORJIV INDUSTRIJI

Aleksandra Lepenik
ELPRO Lepenik & Co.

14. januar 2021

ELPRO
Lepenik

30 let 😊



623 200 h

Temperatura je z nami že 30 let, vsak dan.

- proizvodnja temperaturnih tipal
- prodaja merilno regulacijske tehnike
- akreditiran kalibracijski laboratorij
- servis industrijske elektronike
- razvoj in skrb za temperaturno energetska učinkovitost

H kupcu usmerjena vizija

*"Everything we do
we aspire to provide efficient products
for industries to conduct their work safely and energy efficient.*

*From solution to result is our dedication.
We want to make your life easier and
our Earth to stay green for future generations."*

TEMPERATURA

definicije

- Temperatura je ena osnovnih termodinamičnih spremenljivk, ki določa stanje teles. Merimo jo s termometrom.
- Termodinamika zahteva vpeljavo pojma temperature, ki meri, kako toplo ali hladno je nekaj.
- **Temperatura je fizikalna veličina, ki se izraža s toplotnim stanjem nekega telesa in je ena od osnovnih veličin v termodinamiki. Temperatura ne more prehajati iz telesa na telo, ampak prehaja toplota, pri tem pa se temperaturi teles izenačujeta.**
- Vpeljemo jo lahko tudi kot količino, s katero je sorazmerna prenesena toplota pri Carnotovem toplotnem stroju - to je tako imenovana termodinamična definicija.
- Temperature pravzaprav ne bi bilo treba vpeljevati posebej - s poznavanjem mikroskopske zgradbe jo lahko izpeljemo iz mikroskopskih mehanskih lastnosti plina. Ker pa so ljudje temperaturo definirali, še preden so jih poznali, je ostala definicija, kot jo poznamo.

INDUSTRIJA

Sifrant

- ⊕·A - KMETIJSTVO IN LOV, GOZDARSTVO, RIBIŠTVO
- ⊕·B - RUDARSTVO
- ⊕·C - PREDELOVALNE DEJAVNOSTI
- ⊕·D - OSKRBA Z ELEKTRIČNO ENERGIJO, PLINOM IN PARO
- ⊕·E - OSKRBA Z VODO; RAVNANJE Z ODPLAKAMI IN ODPADKI; SANIRANJE OKOLJA
- ⊕·F - GRADBENIŠTVO
- ⊕·G - TRGOVINA; VZDRŽEVANJE IN POPRAVILA MOTORNIH VOZIL
- ⊕·H - PROMET IN SKLADIŠČENJE
- ⊕·I - GOSTINSTVO
- ⊕·J - INFORMACIJSKE IN KOMUNIKACIJSKE DEJAVNOSTI
- ⊕·K - FINANČNE IN ZAVAROVALNIŠKE DEJAVNOSTI
- ⊕·L - POSLOVANJE Z NEPREMIČNINAMI
- ⊕·M - STROKOVNE, ZNANSTVENE IN TEHNIČNE DEJAVNOSTI
- ⊕·N - DRUGE RAZNOVRSTNE POSLOVNE DEJAVNOSTI
- ⊕·O - DEJAVNOST JAVNE UPRAVE IN OBRAMBE; DEJAVNOST OBVEZNE SOCIALNE VARNOSTI
- ⊕·P - IZOBRAŽEVANJE
- ⊕·Q - ZDRAVSTVO IN SOCIALNO VARSTVO
- ⊕·R - KULTURNE, RAZVEDRILNE IN REKREACIJSKE DEJAVNOSTI
- ⊕·S - DRUGE DEJAVNOSTI
- ⊕·T - DEJAVNOST GOSPODINJSTEV Z ZAPOSLENIM HIŠNIM OSEBJEM; PROIZVODNJA ZA LASTNO RABO
- ⊕·U - DEJAVNOST EKSTERITORIALNIH ORGANIZACIJ IN TELES

SENZORJI TEMPERATURE

Pri senzorju se vse začne!

#SENZOR, sensor, ZAZNAVALO, TIPALO, SONDA#

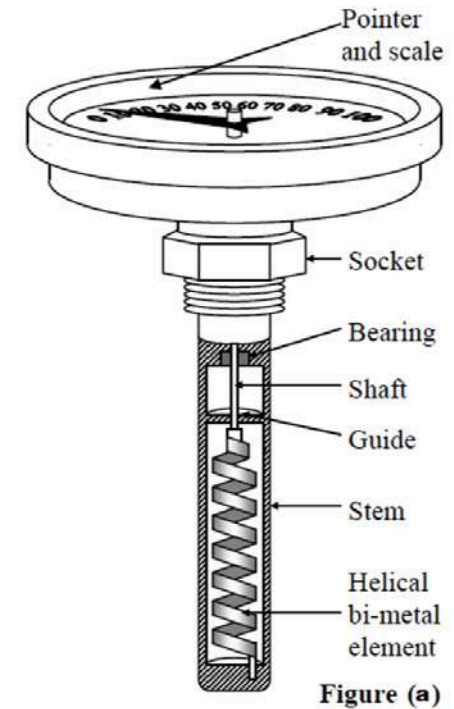
- Bimetal (-50 ... 500 °C; 1 - 3 % točnosti)
- RTD (-200 ... 850 °C; 0,1 - 0,3 (0,6) % točnosti)
- TC (-200 ... 1750 °C; 1,5 - 2,5 (4) % točnosti)
- Pirometri (-50 ... 2500 °C; 1 + % točnosti)
- Ostali: tekočinski, plinski, PTC, NTC ... dogovorimo, da jih v tem sklopu, zaradi manjšega deleža uporabe v industriji, ne obravnavamo. Z zanimanjem čakamo napredek na področju optičnih vlaken, nano senzorjev in novih metod.

BIMETALNI TERMOMETER

Trak iz dveh različnih materialov in z različnimi temperaturnimi raztezki se pri povišanju temperature upogne navznoter.

Pri segrevanju se razteguje/zvija, zato:

- se razlika preko mehanizma prenaša na kazalec (kar odčitamo kot temperaturo, to je bimetalni termometer)
- se spoži kontakt (sklene električni tokokrog) in s tem regulira temperaturo (termostat, fen, likalnik, temperaturne varovalke, varnostni termostati)
- + Zaradi svoje enostavnosti in vzdržljivosti, so pogosto v uporabi v izdelkih široke potrošnje, varnostni tehniki, termoelektrarne, nuklearke...
- + Lokalni prikaz
- Preobremenitve povzročijo trajne poškodbe materialov, ki pa ne rezultirajo takoj v odpovedi, ampak pomenijo napačne meritve
- Slabša točnost za današnje precizne sisteme
- Težje kalibracije - ni odprave napake senzorja



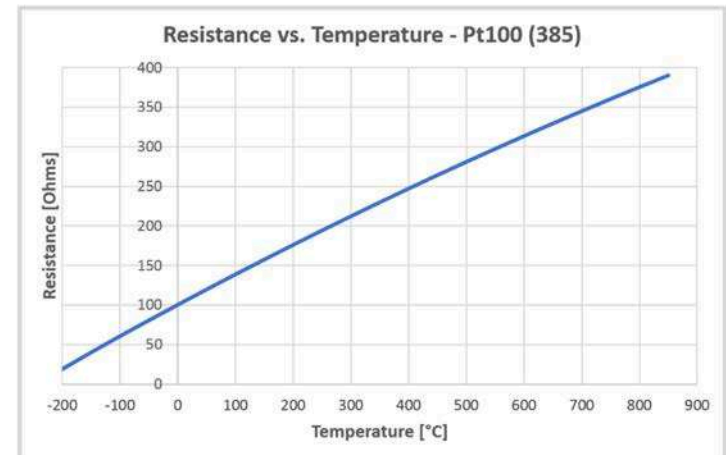
Senzorji temperature

Osnovna značilnost električnega sensorja temperature je meritev lastne temperature. Z vgradnjo v ohišje ga zaščitimo, hkrati pa mu podaljšamo odzivni čas. S kvaliteto sensorjev in materialov, načinom izdelave, povezav, polnil in vgradnimi globinami vplivamo na točnost meritve. **Te lastnosti izkoriščamo za prilagoditev zahtevam naročnika oziroma procesa ter za pravilno obravnavo rezultatov.**

Na splošno imajo uporovni sensorji in termočleni dokaj široko območje uporabe in standardizirane lastnosti. Imajo pa tako eni kot drugi značilnosti s katerimi izvajamo že zgoraj omenjene prilagoditve, zato ni vseeno katero senzorsko tehniko uporabimo za določen namen. Tukaj so pomembne izkušnje in testne/kalibracijske sposobnosti proizvajalcev temperaturnih tipal.

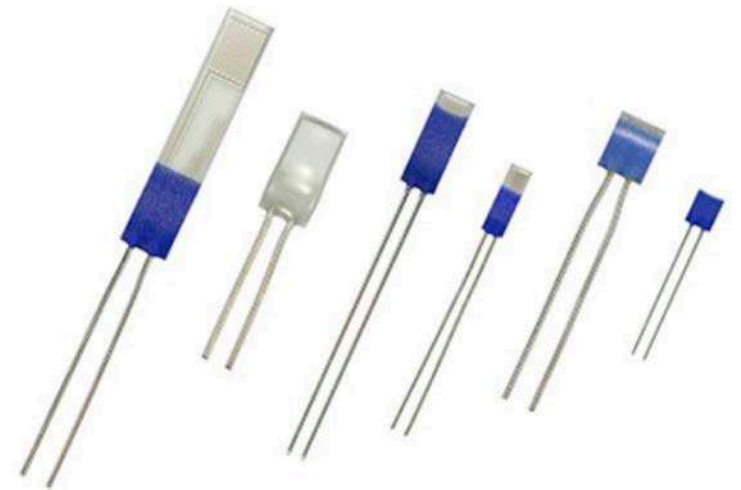
RTD

- **RTD = resistance temperature device**
- slovensko poimenovanje: uporovni senzor
- SIST EN 60751_2009
- klase točnosti: AA, A, B, C (*C ni prisoten v splošni industrijski rabi*)
- odzivni čas je običajno podan za T₉₀ (voda/zrak)
- RTD žica je najpogosteje platina (Pt) ali nikel (Ni), redkeje baker (Cu); **upornost žice s temperaturo narašča**; najbolj temperaturno linearna je platina, sledi nikel, veliko slabši je baker
- **širok razpon uporabe med -200 ... 850 °C**
- **Odlična stabilnost!**
- **Odlična točnost!**
- 2, 3 in 4 vodni priklop (*2 vodnim se izogibamo*)
- pogosti predstavniki: Pt 100, Pt 1000
- enojna, dvojna izvedba



RTD thin film

- **naparjeni** (thin film = ultra tanka kovinska plast (platina) naparjena na keramični material)
- potrebno je manj materiala, kar jih naredi **cenovno učinkovite za natančne meritve**
- priključljivost žice preko stiskanja, **trdega spajanja**, varjenja (**laser**) in spajkanja
- raven profil je pogosto prednost pri uporabi, vgradnji
- **širok razpon meritev**
- steklena mikro zaščita nudi odlično **šok zaščito, vibracijsko zaščito in okoljsko neodvisnost** (platina!)
- različne velikosti, tolerance in oblike
- uporaba: avtomobilska, procesna, elektronika, razvoj, HVAC, building, bela tehnika ...

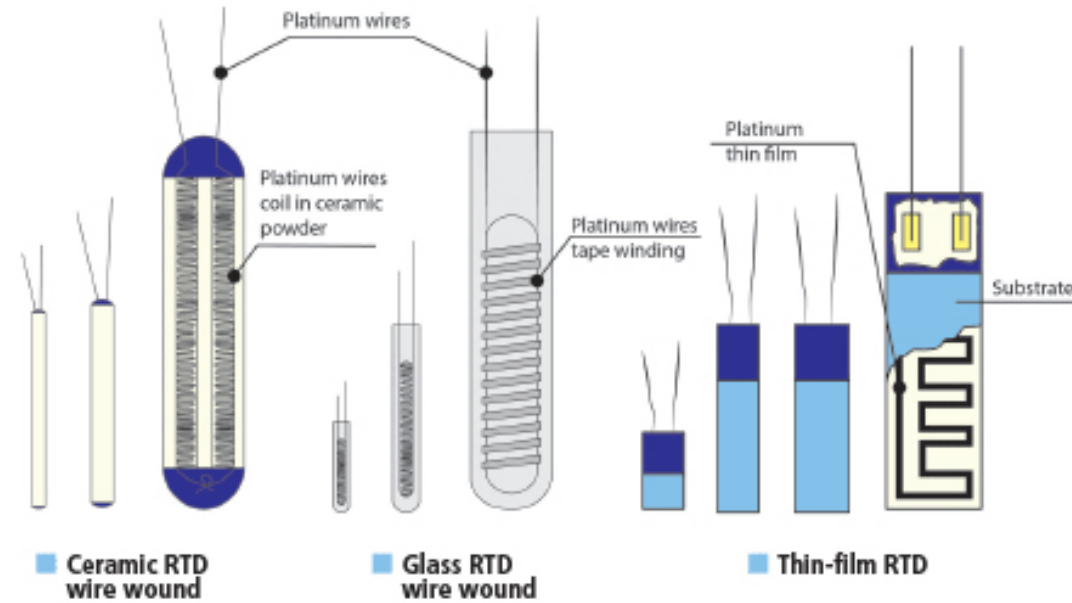
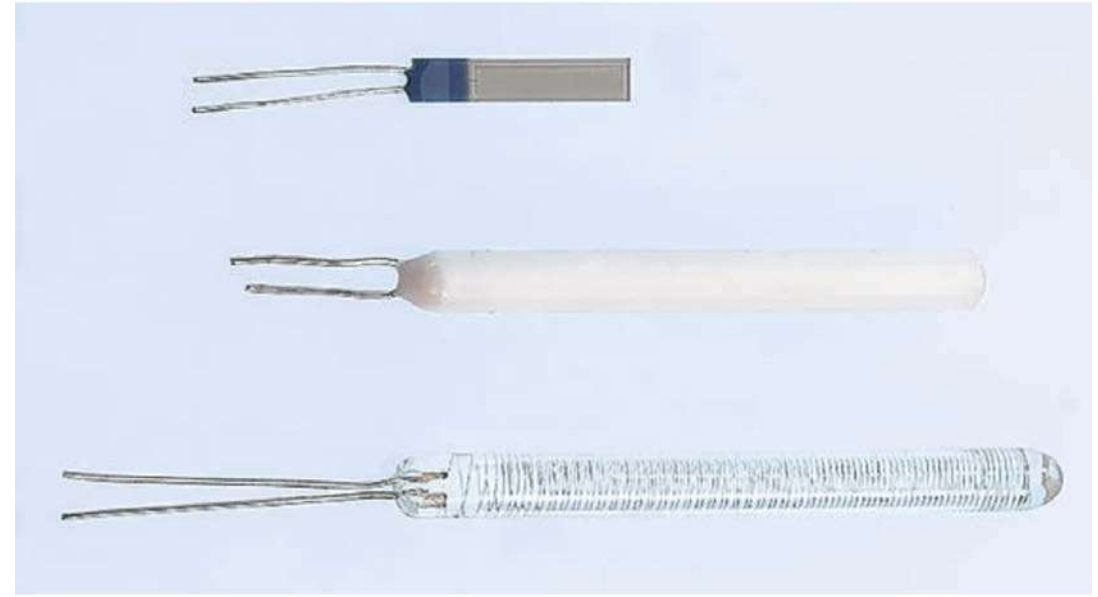


RTD keramični steklen

- keramični **žično navit** platinast RTD
- žica navita v spiralo znotraj keramične cevke visoke čistosti
- prednosti so **znatno zmanjšani učinki histereze** in trajne spremembe električnega upora
- **izjemna stabilnost skozi čas**
- zaščita platinaste žice na zunanji tlak ali sile
- -200 ... 960 °C (-196 ... 850 °C)
- **za aplikacije visoke točnosti**
- POZOR: nekateri proizvajalci v keramično ohišje namestijo thin film senzor (za pretok zraka ipd.)
- **uporablja se tudi žično navit platinast RTD v steklenem ohišju**

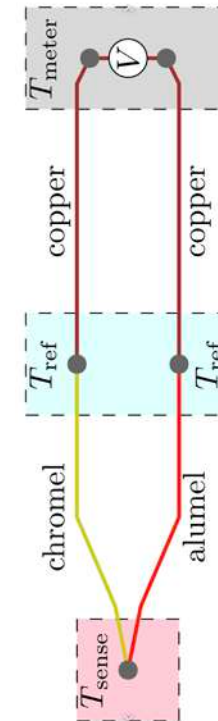


RTD



TC

- **TC = Thermo couple (par homogenih kovin ali kovinskih zlitin z različnima termonapetostima); platina, rodij, nikel, baker, krom, železo, silicij ...**
- Seebeckov pojav je osnova za izdelavo termočlenov. Za meritev temperature uporabimo spoj dveh različnih prevodnikov. Nastane razlika napetosti med merilnim koncem in primerjalno točko, ki je točka z znano temperaturo, rečemo ji hladen konec. Termočlen je merilnik temperature razlike med vročim in hladnim koncem.
- Slovensko poimenovanje: termopar, termočlen, termoelement
- „Za izdelavo termočlena uporabimo termoapar in dobimo termoelement“ (razlaga AL)
- SIST EN 60584-1_2014, SIST EN 60584-3_2008
- razredi točnosti: 1, 2, 3 ($\pm 1,5$; $\pm 2,5$; ± 4)
- v primerjavi z RTD:
 - uporaba za nižje in višje temperature (-270 ... 1750 °C)
 - enostavnost, dosegljivost, hiter odziv
 - **slabša točnost, slabša stabilnost**
- pogosti predstavniki: S tip (Pt10RhPt), K tip (NiCr-Ni), J tip (Fe-CuNi), T tip (Cu-CuNi), N (NiCrSi-NiSi)
- enojni, dvojni termoelementi ali več
- **obvezna kompenzirana povezava (kabli, konektorji, sponke)**
- **nujno je preprečevanje oksidacije elementa (ustrezna zaščita)**

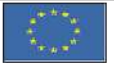


















































KLASIFIKACIJA

vir: Wikipedija

The table below describes properties of several different thermocouple types. Within the tolerance columns, T represents the temperature of the hot junction, in degrees Celsius. For example, a thermocouple with a tolerance of $\pm 0.0025 \times T$ would have a tolerance of ± 2.5 °C at 1000 °C.

Type	Temperature range (°C)				Tolerance class (°C)		Color code		
	Continuous		Short-term		One	Two	IEC ^[30]	BS	ANSI
	Low	High	Low	High					
K	0	+1100	-180	+1370	-40 – 375: ± 1.5 375 – 1000: $\pm 0.004 \times T$	-40 – 333: ± 2.5 333 – 1200: $\pm 0.0075 \times T$			
J	0	+750	-180	+800	-40 – 375: ± 1.5 375 – 750: $\pm 0.004 \times T$	-40 – 333: ± 2.5 333 – 750: $\pm 0.0075 \times T$			
N	0	+1100	-270	+1300	-40 – 375: ± 1.5 375 – 1000: $\pm 0.004 \times T$	-40 – 333: ± 2.5 333 – 1200: $\pm 0.0075 \times T$			
R	0	+1600	-50	+1700	0 – 1100: ± 1.0 1100 – 1600: $\pm 0.003 \times (T - 767)$	0 – 600: ± 1.5 600 – 1600: $\pm 0.0025 \times T$			Not defined
S	0	+1600	-50	+1750	0 – 1100: ± 1.0 1100 – 1600: $\pm 0.003 \times (T - 767)$	0 – 600: ± 1.5 600 – 1600: $\pm 0.0025 \times T$			Not defined
B	+200	+1700	0	+1820	Not available	600 – 1700: $\pm 0.0025 \times T$	No standard	No standard	Not defined
T	-185	+300	-250	+400	-40 – 125: ± 0.5 125 – 350: $\pm 0.004 \times T$	-40 – 133: ± 1.0 133 – 350: $\pm 0.0075 \times T$			
E	0	+800	-40	+900	-40 – 375: ± 1.5 375 – 800: $\pm 0.004 \times T$	-40 – 333: ± 2.5 333 – 900: $\pm 0.0075 \times T$			
Chromel/AuFe	-272	+300	N/A	N/A	Reproducibility 0.2% of the voltage. Each sensor needs individual calibration.				

ELPRO TERMOELEMENT									
Tip	+ pol	- pol		Internacionalni IEC 584-3	Internacionalni IEC 584-3 za lažno varne naprave (EX)	Nemški DIN 43710*	ZDA ANSI MC96.1	Velika Britanija BS 1843	Francija NF C 42-324
K	NiCr	Ni	KX* -25 ... +200°C						
J	Fe	CuNi	JX -25 ... +200°C						
R/S	Pt10Rh Pt13Rh	Pt Pt	RC/SC 0 ... +200°C						
T	Cu	CuNi	TX -25 ... +100°C						
N	NiCrSi	NiSi	NC -25 ... +200°C						
B	Pt30Rh	Pt6Rh	BC 0 ... +200°C						
E	NiCr	CuNi	EX -25 ... +200°C						
L*	Fe	CuNi	LX 0 ... +200°C						
U*	Cu	CuNi	UX 0 ... +100°C						

*neuradni simboli ali standardi (umaknjeni standardi)

Podani tipi so kratice. Ob kratici se uporablja dopolnilo C za kompenzacijski kabel (npr. NC je kompenzacijski kabel za tip N) ali dopolnilo X za termo kabel (npr. KX je termokabel za tip K). Znotraj standarda se ponekod -X ali -C izvedbe barvno razlikujejo.

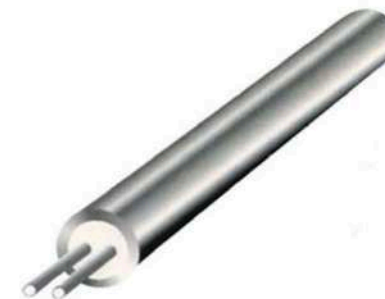
TC žični

- izolirani žici termopara (**polni žici**)
- neizolirana ali izolirana izvedba termoelementa
- **klasa 1: -25 ... 200 °C** (odvisno od izolacije)
- **hitra odzivnost**
- enostavnost ???
- obvezno varjenje brez dodajanja materiala (laser)
- obvezna zaščita pred oksidacijo (uporabnik?)
- **POZOR: pogoste laične poenostavitve!**
- pogosta uporaba: prenosna oprema, kalibracijski nameni, testiranja
- najpogostejša predstavnika: tipa K in T



TC oplaščeni

- **žici termopara v MgO izolaciji in v gibljivem jeklenem plašču**
- poimenovanje: mineralno izolirani (mineral isolated)
- različne kvalitete plaščev (**Inconel**, 1.4571, Nicrobel ...)
- premeri od 0,25 do 8 mm (**1,5; 3,0; 4,5; 6,0**)
- izvedba termočlena: v stiku ali **izolirana** od ohišja
- **klasa 1**, klasa 2
- **odlična vzdržljivost, upogljivost**, vsestranskost
- **zahtevna proizvodnja**, kvaliteta proizvajalcev zelo niha (izredna higroskopičnost materialov – nehomogenost materiala)
- **široka merilna območja: -200 ... 1150 °C** (odvisna od TC, plašča)
- relativno dobra stabilnost, če je izdelava ustrezna
- **pogosta uporaba: peči, komore, oprema, prenosno, grelni elementi, orodja ...**
- najpogostejši predstavniki: tipi K, N, J, T

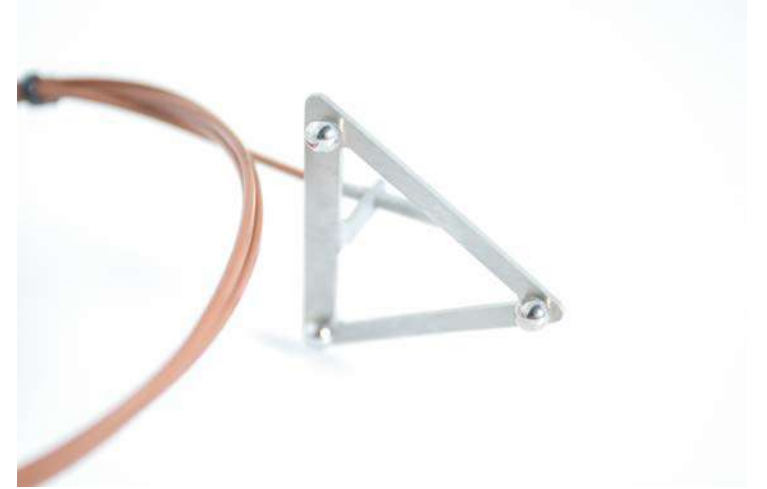


TC za težje pogoje dela

- **termočlen izolirani v keramičnih in kovinskih ceveh**
- poimenovanje: ravni, kotni, platinasti, ON SITE, visokotemperaturni
- različne kvalitete keramičnih in kovinskih zaščitnih cevi
- premeri od 7 do 50 mm (15-22 mm)
- izvedba: izolirana
- **odlična temperaturna vzdržljivost, vsestranskost**
- zahtevna proizvodnja, kvaliteta materialov zelo niha
- merilna območja: 600 ... 1750 °C (odvisna od TC, cevi)
- dobra stabilnost, če je izdelava ustrezna
- pogosta uporaba: **visokotemperaturne peči, sežigalnice ...**
- najpogostejši predstavniki: tipi **S**, R, K, N



TC raznolikost



DEFINICIJA TEMPERATURNEGA TIPALA

EN 60751

PRT = platinum resistance thermometer

Temperature responsive device consisting of one or more sensing platinum resistors within a protective sheath, internal connecting wires and external terminals to permit connection of electrical measurement instruments. Mounting means and connection heads may be included. Not included is any separable protection tube or thermowell.

definicija ELPRO Lepenik:

Temperaturna tipala so izdelki z vgrajenimi ali izvedenimi *senzorji temperature*. Senzorji temperature zaznajo spremembo temperature pretvarjajo v upornost ali napetost, zato jim rečemo tudi temperaturna zaznavala. Merilniki, ki so lahko del temperaturnih tipal ali pa so samostojni, nam to vrednost prikažejo kot temperaturo.

TEMPERATURNNA TIPALA

Ko senzor temperature ožičimo, priključimo in oblečemo v zaščitno ohišje dobimo temperaturno tipalo. S tem posegom omogočimo pravilno delovanje senzorja, pričakovano življenjsko dobo, stabilnost, točnost, standardiziranost, povezljivost.

To lahko naredimo na veliko načinov, zato rečemo, da so **temperaturna tipala narejena po meri naročnika**. Lahko so enostavna, standardna, precizna, referenčna, ON SITE, kalibracijska, prenosna, vtična, objemna, potopna, hitro odzivna, počasi odzivna, eno ali več kanalna, z merilnimi vložki ali brez, s pretvorniki ali brez, s priključno glavo, s priključnim kablom, s konektorjem tem in onim, namenska, letalska, OEM, industrijska, economy, s certifikatom ...

Z vgradnjo ali povezovanjem z merilnimi pretvorniki, senzorjem omogočimo delovanje v analognih in digitalnih zankah sistemov avtomatizacije in digitalizacije.

Vse se začne in konča pri senzorju!



ČE JE ŠE ČAS?

ZMOTE in
RESNICE O
TOČNOSTI
SENZORJEV

Senzor meri temperaturo samega sebe, zato moramo dovoliti, da se temperatura senzorja in temperatura medija čim bolj izenačita.

Ni vsak senzor uporaben za vse, čeprav temperaturno ustreza.

Upoštevati moramo vpliv vgradnje in okolice.

Uporabiti moramo ustrezne povezovalne kable in upoštevati njihov vpliv.

Poznati moramo delovne in mejne vrednosti senzorjev in vseh uporabljenih materialov, da lahko definiramo vrednosti temperaturnih tipal.

Od izvedbe in kvalitete izdelave je odvisno kako hitro se bodo temperature izravnale (prehod toplote!).

Ne samo senzor, pomemben je proizvodni postopek, oprema s katero delamo da NE onesnažimo senzorja in povezave, polnila ali ne polnila (zrak!), izolacijski materiali, spojni elementi, čistoča prostora in izvajalca ...

Kako se izvaja primerjava, s čim, kdo?

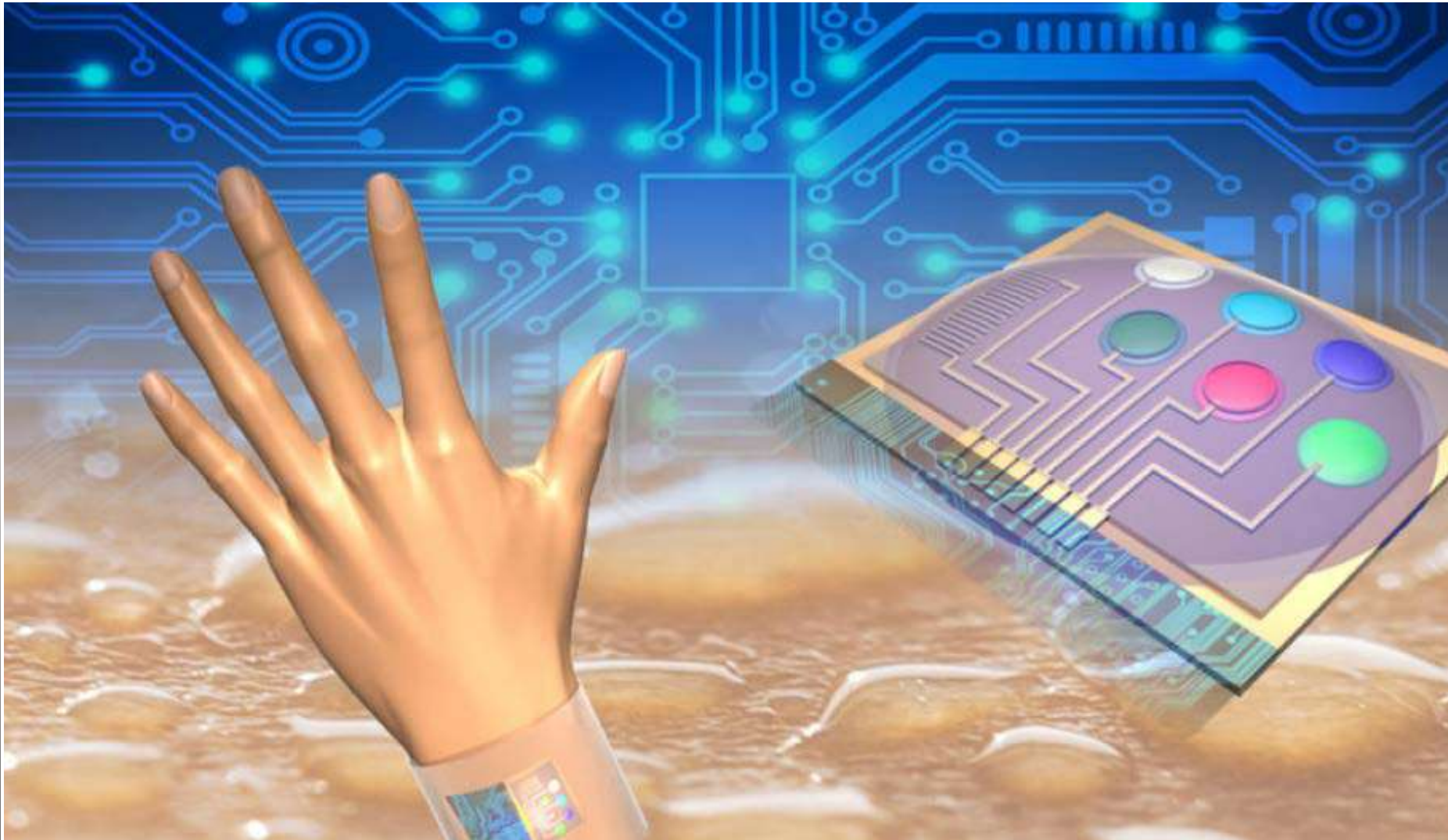
Kalibracija ali akreditirana kalibracija? **AKREDITACIJA = ZAUPANJE**

KONTAKT

- ELPRO Lepenik & Co. d.o.o.
- www.elpro.si
- info@elpro.si

- Aleksandra LEPENIK
- 031 663 808
- aleksandra@elpro.si

HVALA, z veseljem sem delila z vami naše znanje in izkušnje 😊

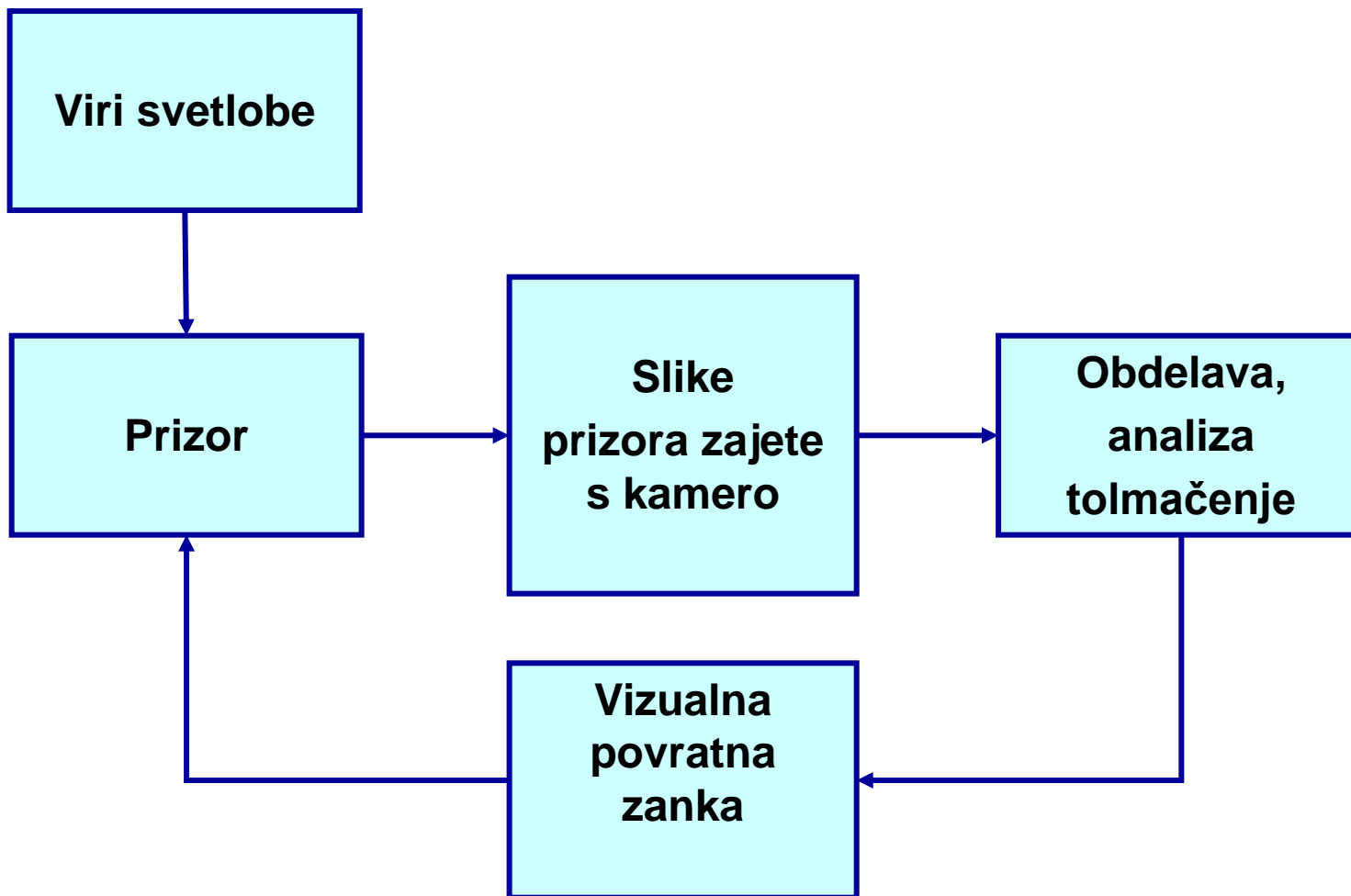


Uvod v strojni vid
Dušan Gleich, UM-FERI
Maribor, 14.1.2021

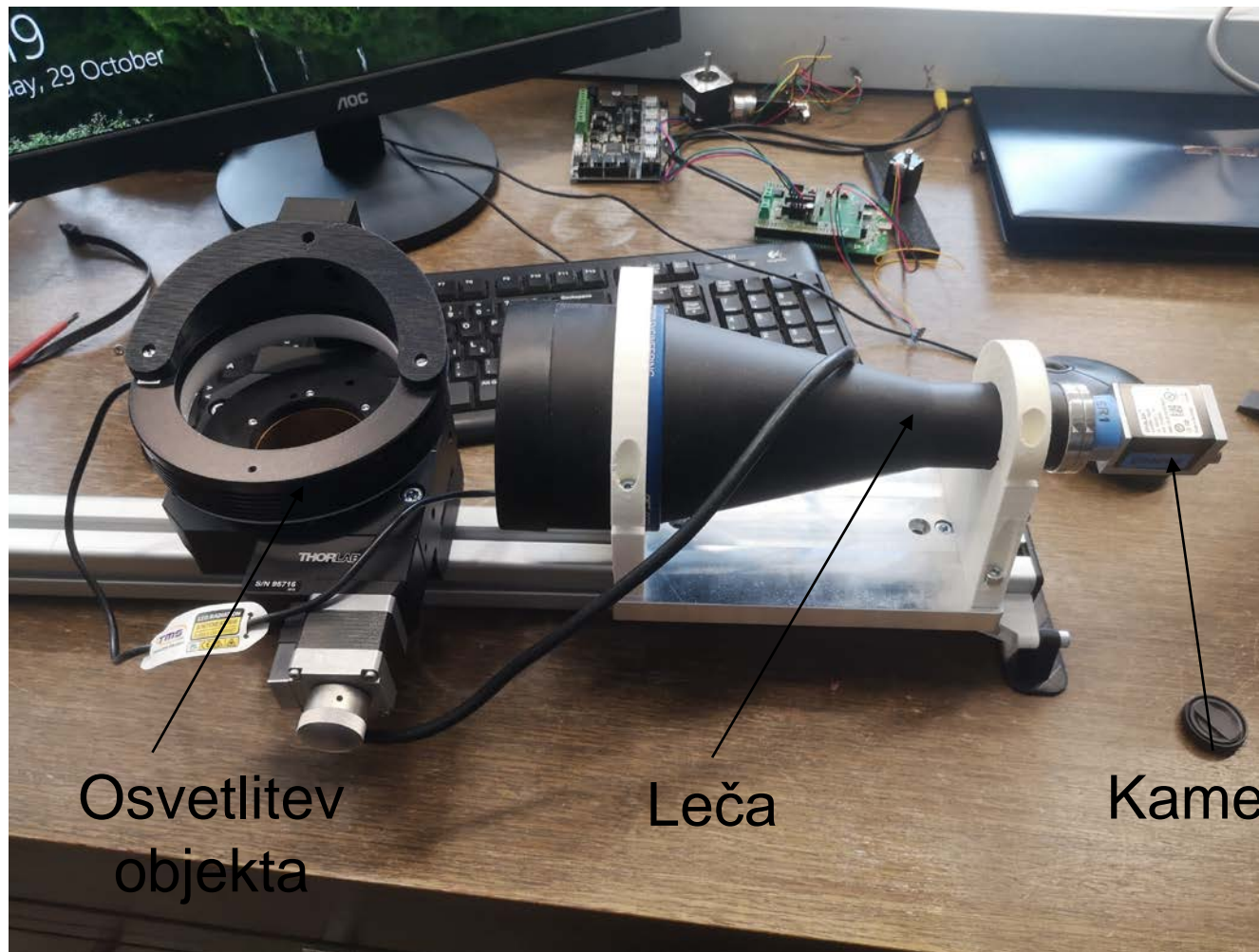
Vsebina

- Uvod
- Nastanek slike
- Leče
- Tipi osvetlitev
- Tipi kamer
- Barvni prostori
- Osnove procesiranja slik

Sistemi strojnega vida



Uvod

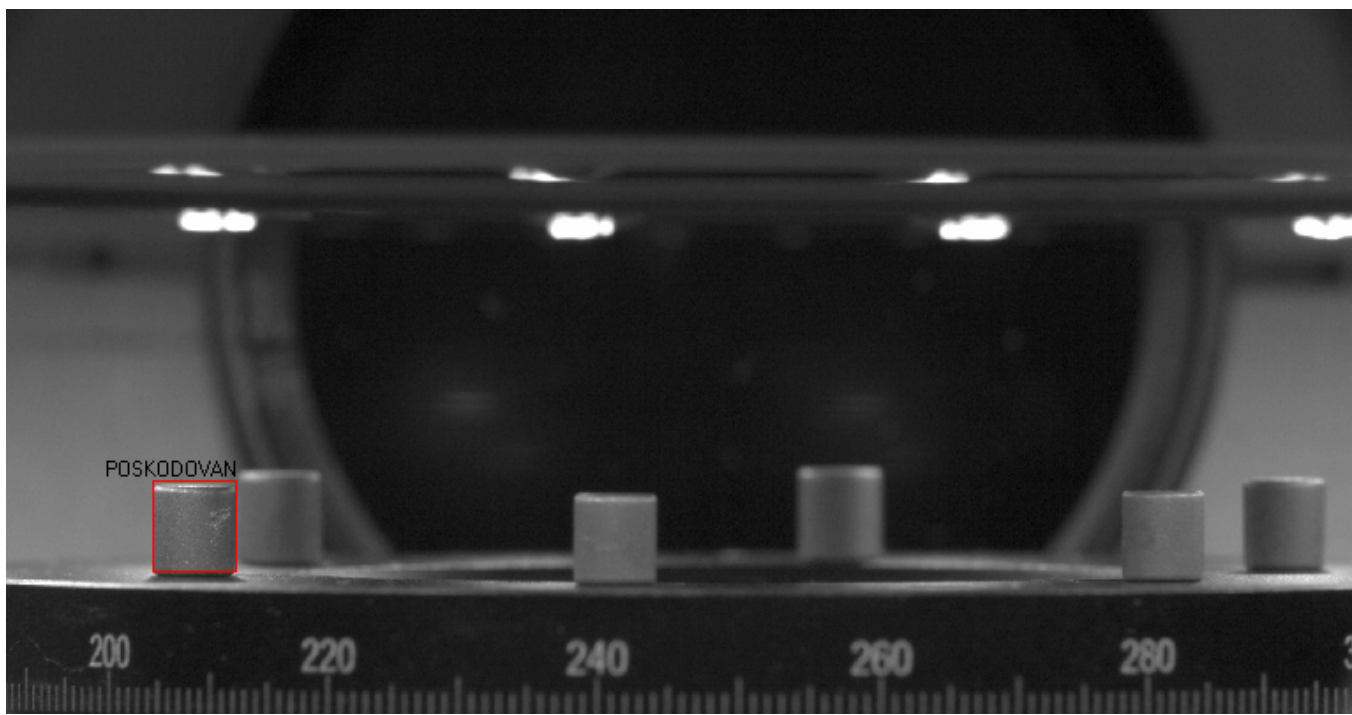
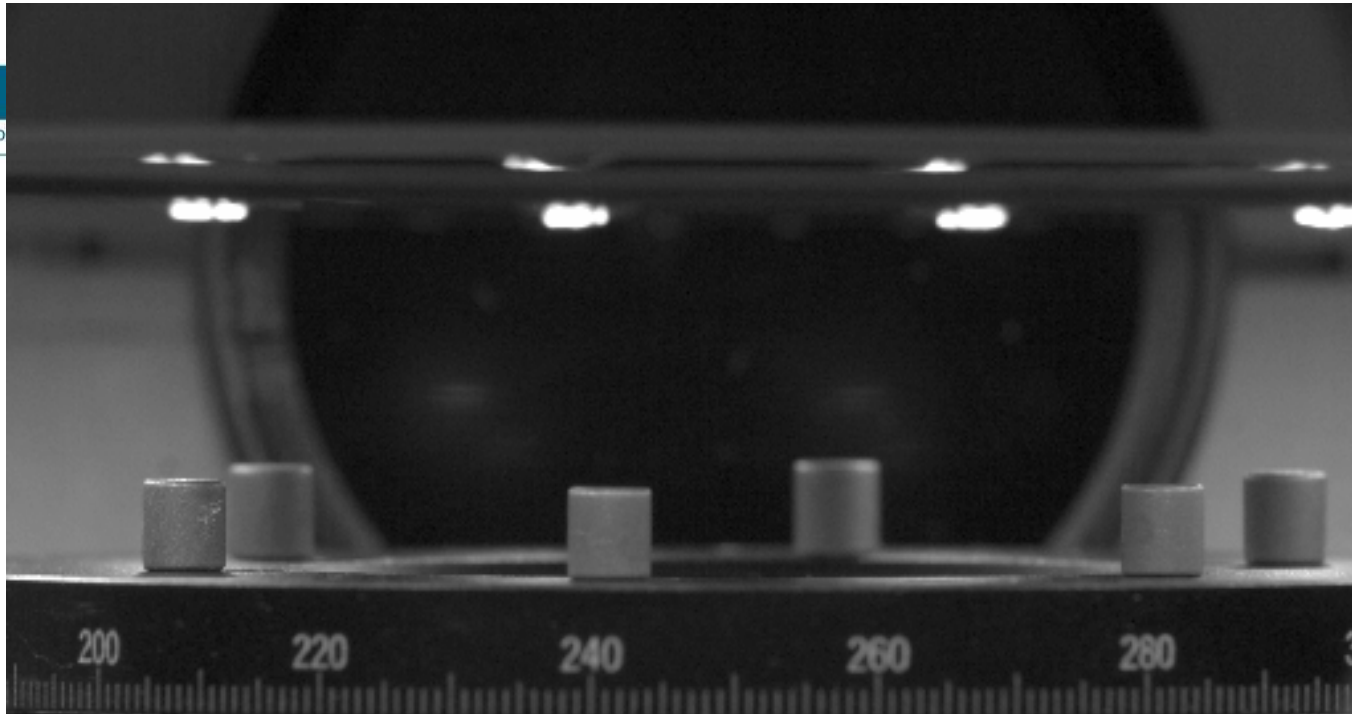


Osvetlitev
objekta

Leča

Kamera

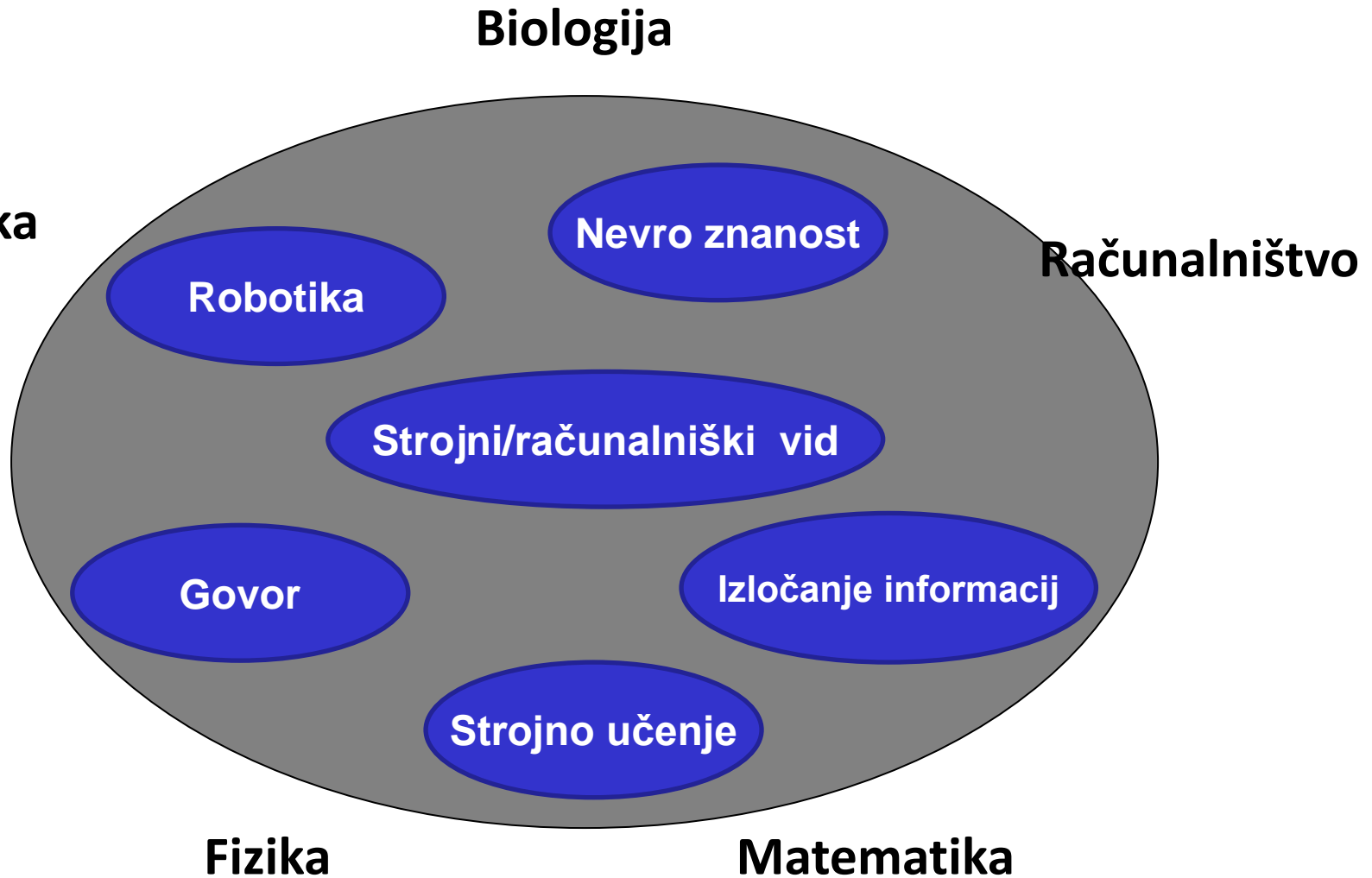
**Zajeta
slike s
kamero**



**Obdelana
slika**

Aplikativni vidiki strojnega vida

- Zagotavljanje kakovosti, vizualno pregledovanje, merjenje, ...
- Opazovanje, video nadzor, varnost
- Biometrija, analiza obrazov, prstnih odtisov, dlani, gest, oči, ...
- Nadzor prometa, ocenjevanje gostote in pretoka prometa, ...
- Avtonomna vozila, avtomobili, plovila, helikopterji, ...
- ...



Problem

Želimo, da računalnik samodejno/avtomatsko interpretira sliko

Realna slika



Naprav za zaznavanje



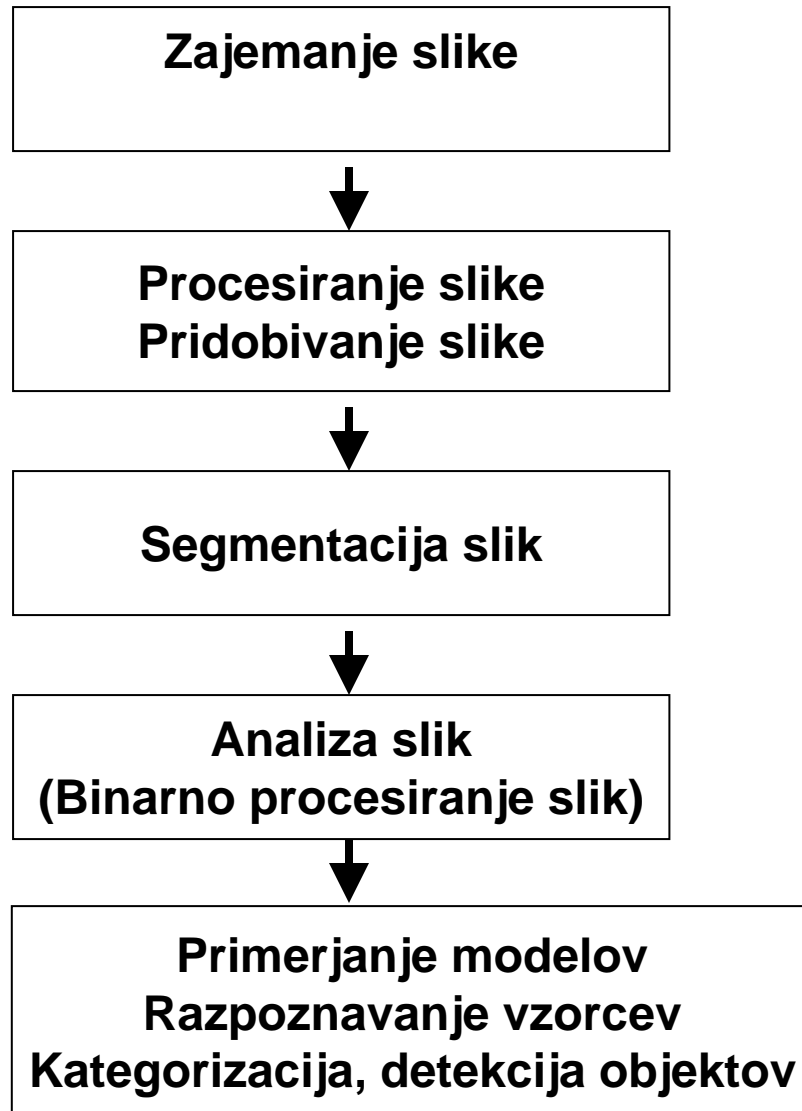
Naprava za interpretiranje



Interpretacija

Oseba/robot.

Stopnje prepoznave pri strojnem vidu



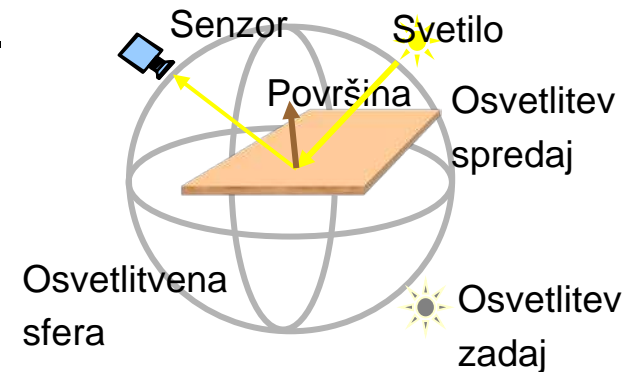
- **A/D pretvorba**
- **Odprava šuma
izboljšanje kontrasta**
- **Iskanje objektov v sliki**
- **Meritve**
- **Iskanje, primerjanje
skladnosti**

Nastanek slike

- Uvod
- **Nastanek slike**
- Leče
- Tipi osvetlitev
- Tipi kamer
- Barvni prostori
- Osnove procesiranja slik

Nastanek slike

- Na nastanek slike vpliva veliko dejavnikov :
 - prostorske/geometrične lastnosti
 - radiometrične/fotometrične lastnosti svetila, lastnosti predmeta in senzorja.
- Geometrične lastnosti:
 - Namestitev svetila in senzorja glede na objekt zanimanja
- Fotometrične lastnosti:
 - Sevanje, širjenje energije in njeni učinki
- Brez svetlobe / energije ni slike

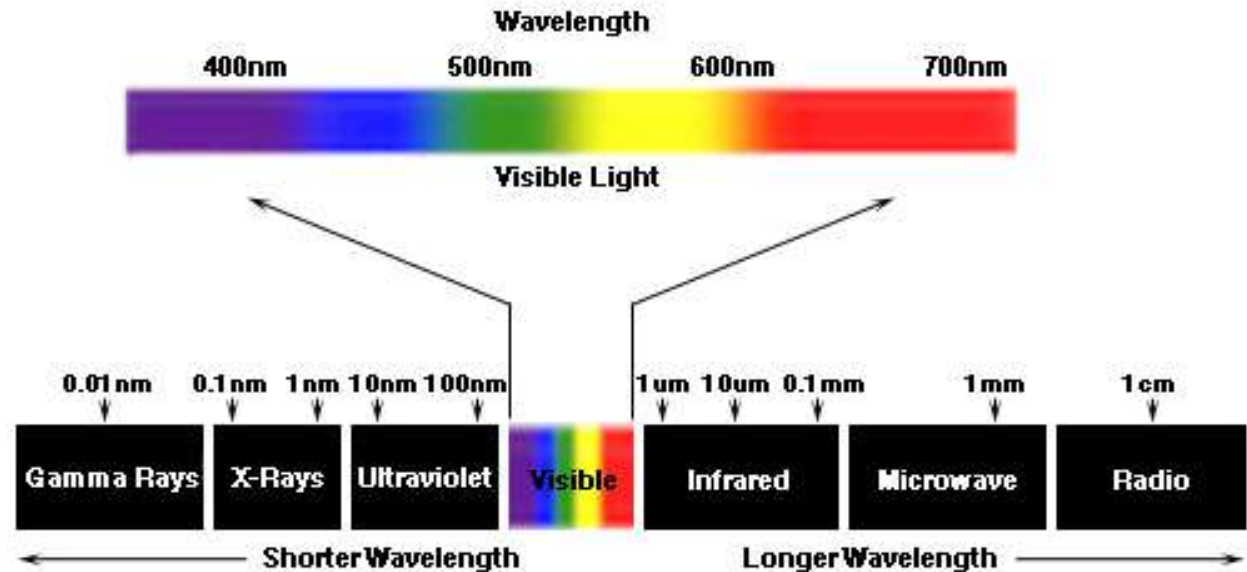


Svetoba

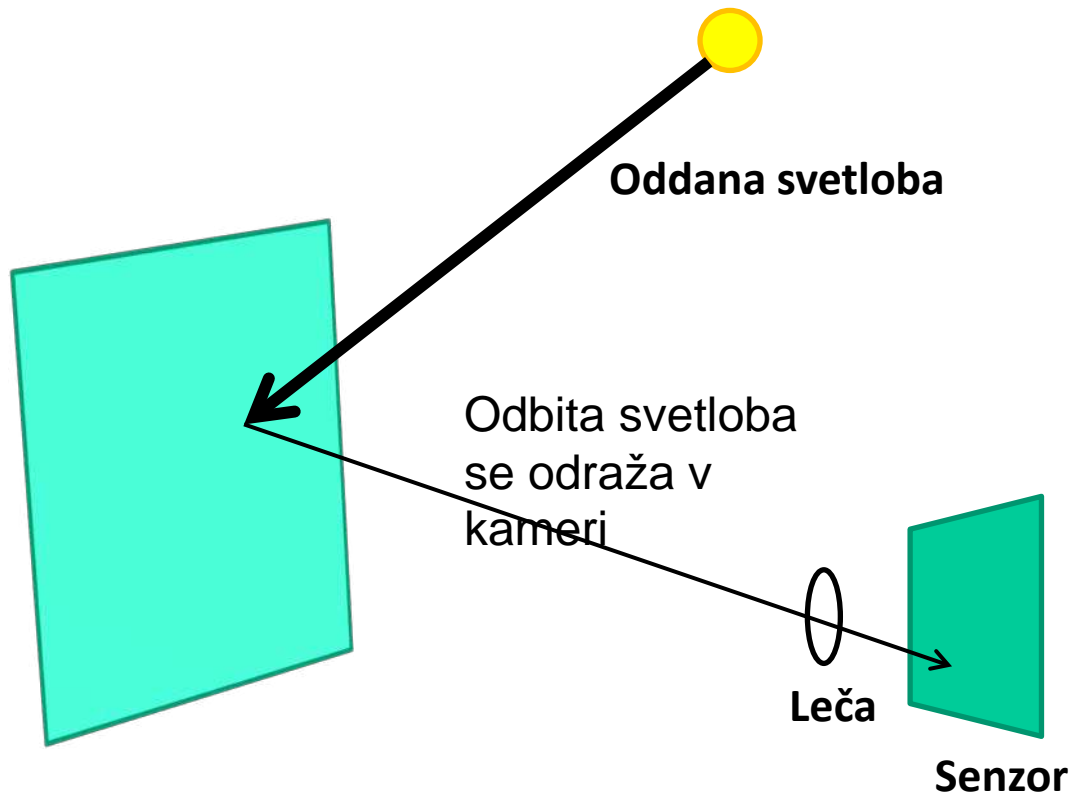
Svetloba je elektromagnetno valovanje

Vidna svetloba

Vijolična	380-420
Modra	440-490
Zelena	490-560
Rumena	560-590
Oranžna	590-630
Rdeča	630-760

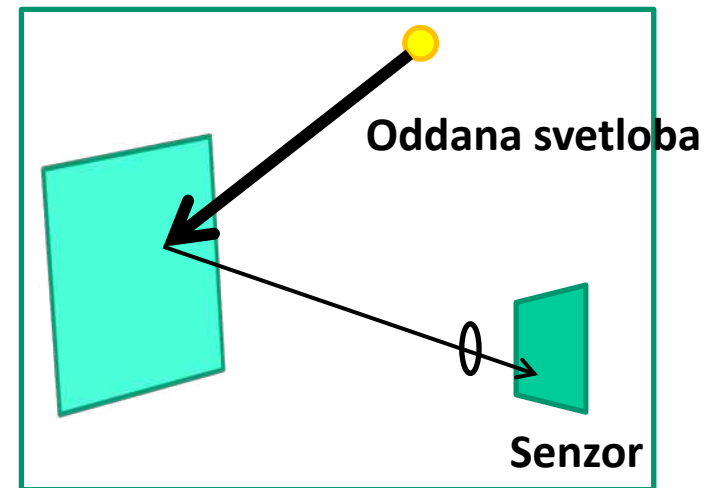


Kako dobi točka v sliki vrednost?



Kako dobi točka v sliki vrednost?

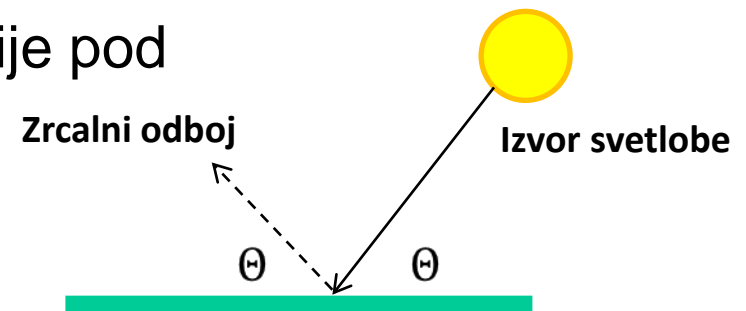
- Glavni dejavniki
 - ▶ Moč in smer osvetlitve
 - ▶ Površinska geometrija
 - ▶ Površinski material
 - ▶ Bližnje površine
 - ▶ Ojačanje / osvetlitev kamere



Osnovni modeli odboja svetlobe

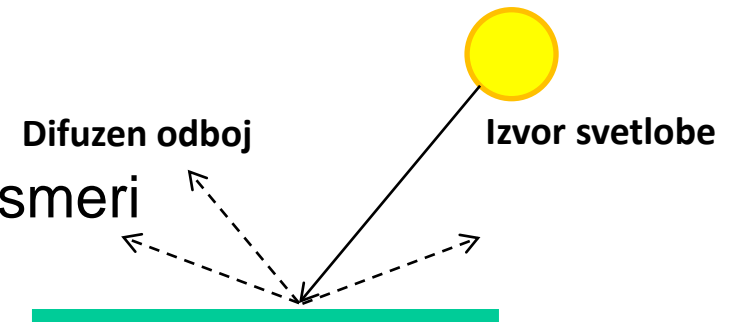
- Zrcalna refleksija: svetloba se odbije pod enakim vpadnim kotom

- ▶ primer, ogledalo



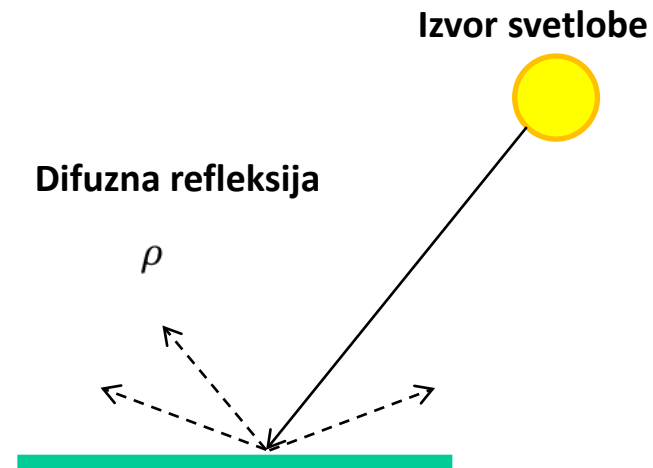
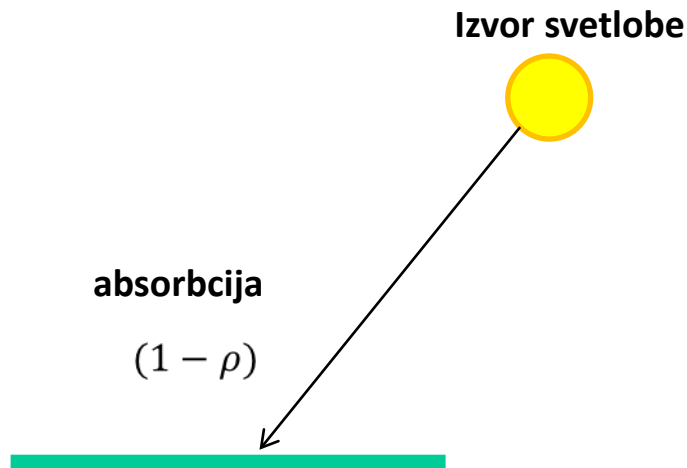
- Difuzna: svetloba se razprši v vse smeri

- ▶ opeka, krpa, surovi les



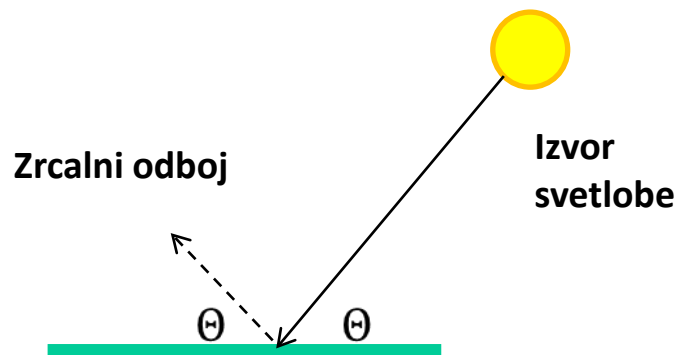
Lambertov model refleksije

- Nekaj svetlobe se absorbira (funkcija albeda ρ)
- Preostala svetloba je razpršena (razpršen odboj)
 - ▶ Primeri: mehka krpa, beton, mat barve



Zrcalna refleksija

- Odsevna smer je odvisna od usmeritve svetlobe in normalne površine
 - ▶ E.g., ogledala
 - ▶ Večina površin se lahko modelira kakor vsota difuznega in zrcalnega pojava



Flickr, by suzysputnik



Večina površin ima tako zrcalne kot difuzne komponente

- Zrcalnost = mesto, kjer prevladuje zrcalni odsev (običajno odseva vir svetlobe)

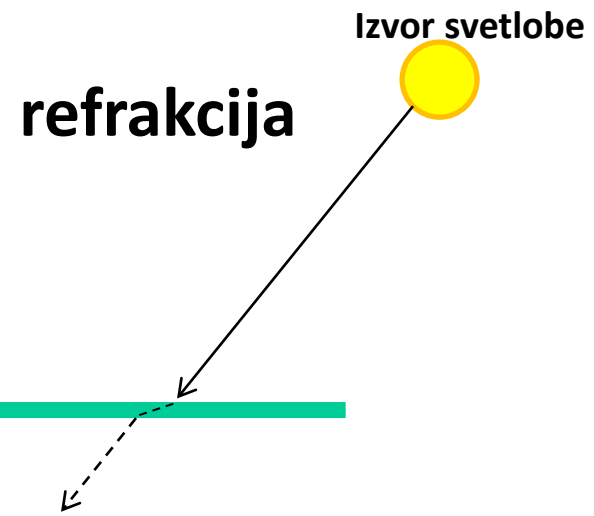
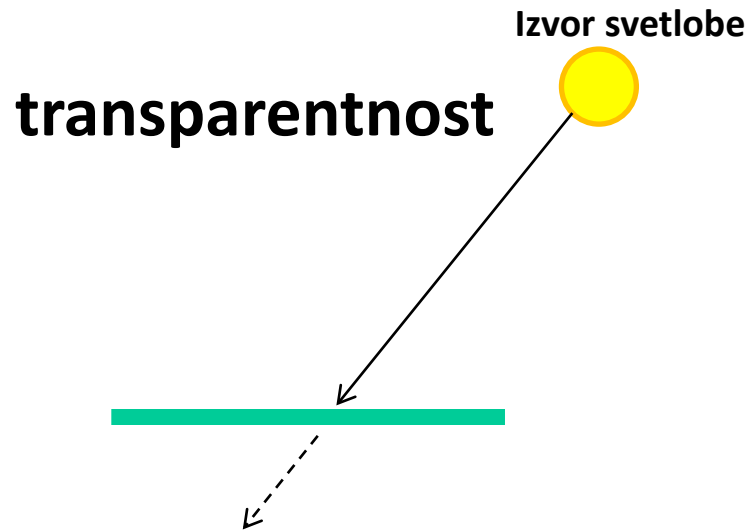


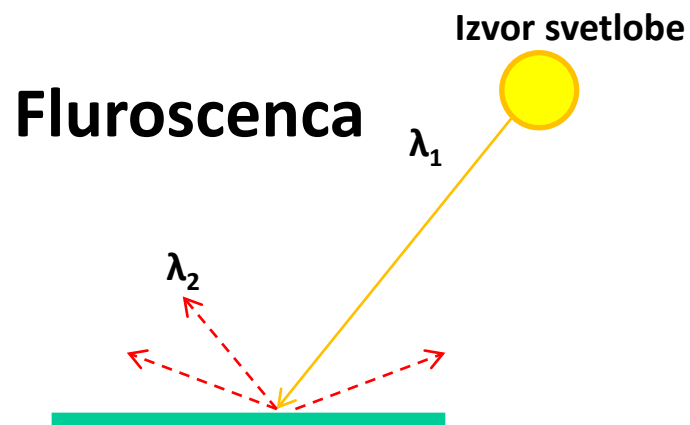
Photo:
northcountryhardwoodfloors.com



Tično, zrcalna komponenta je majhna

Ostali možni efekti





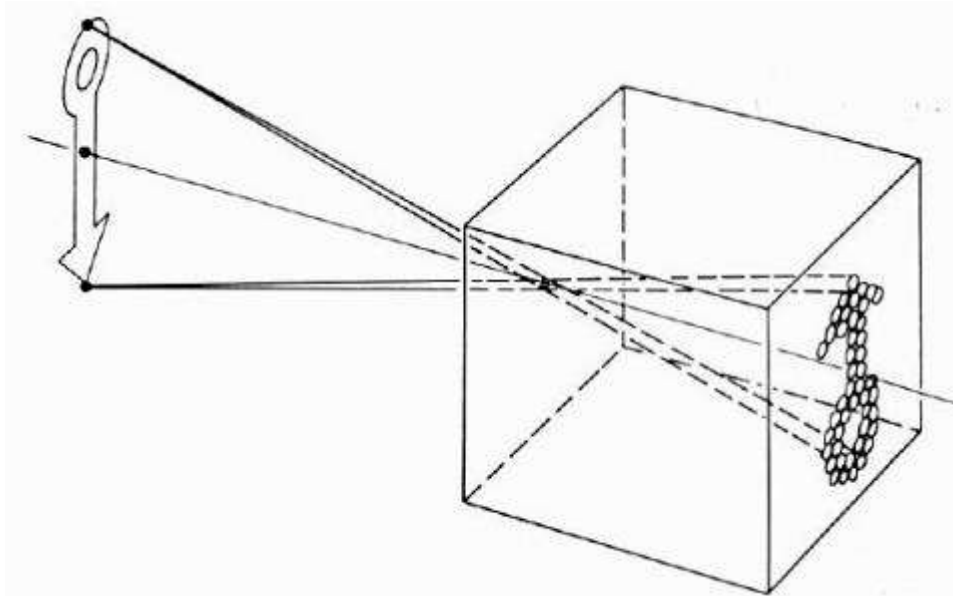


**podpovršinsko
sipanje**

Izvor svetlobe



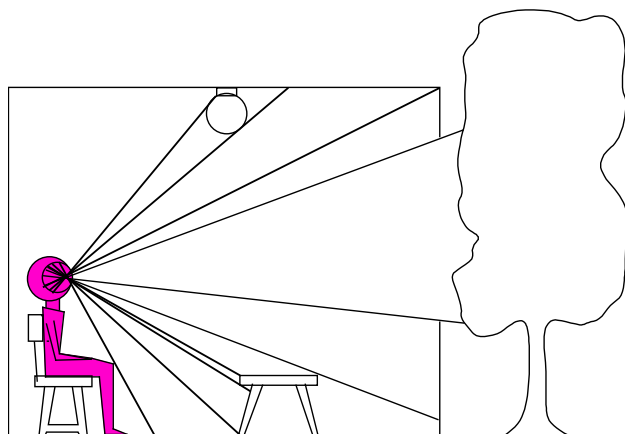
Model kamere



- ▶ **Zajamemo točke**
- ▶ **Center projekcije (goriščna točka)**
- ▶ **Slika se formira v slikovni ravnini**

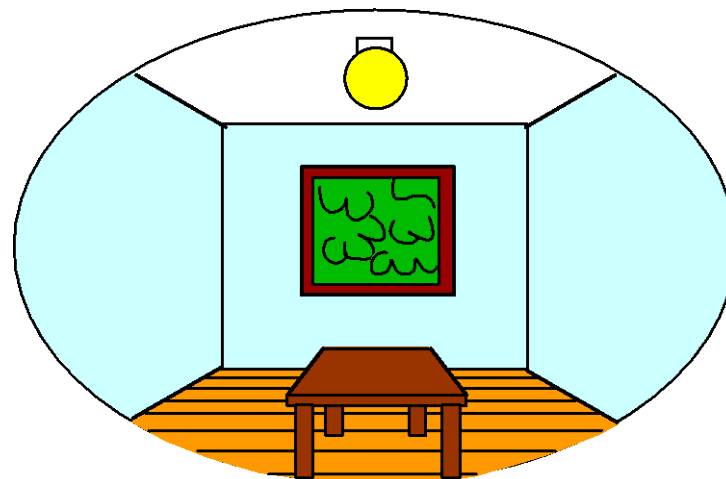
Iz 3D na 2D

3D



Point of observation

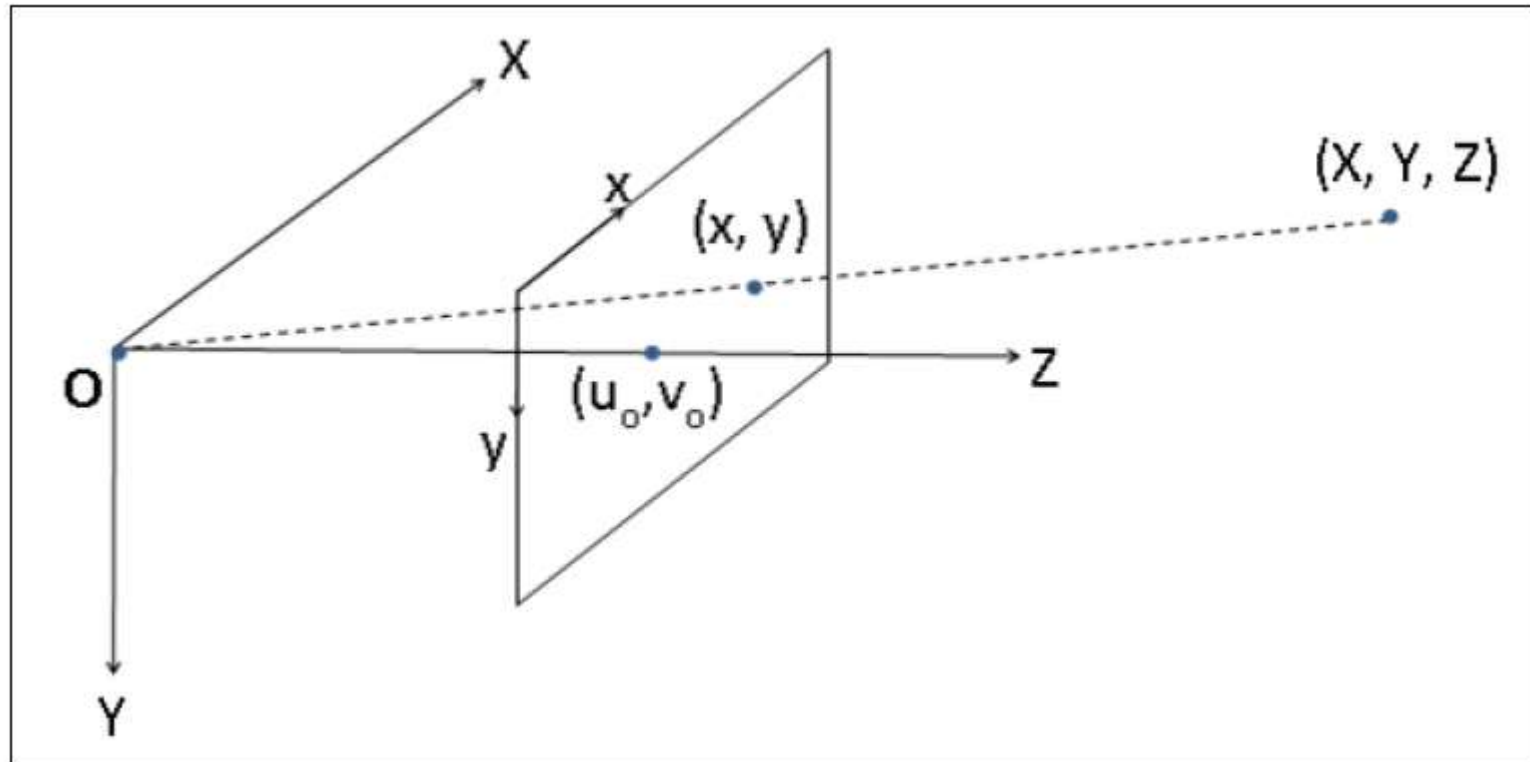
2D slika



Kaj smo izgubili?

- Kote
- Razdalje

Preslikava 3D v 2D



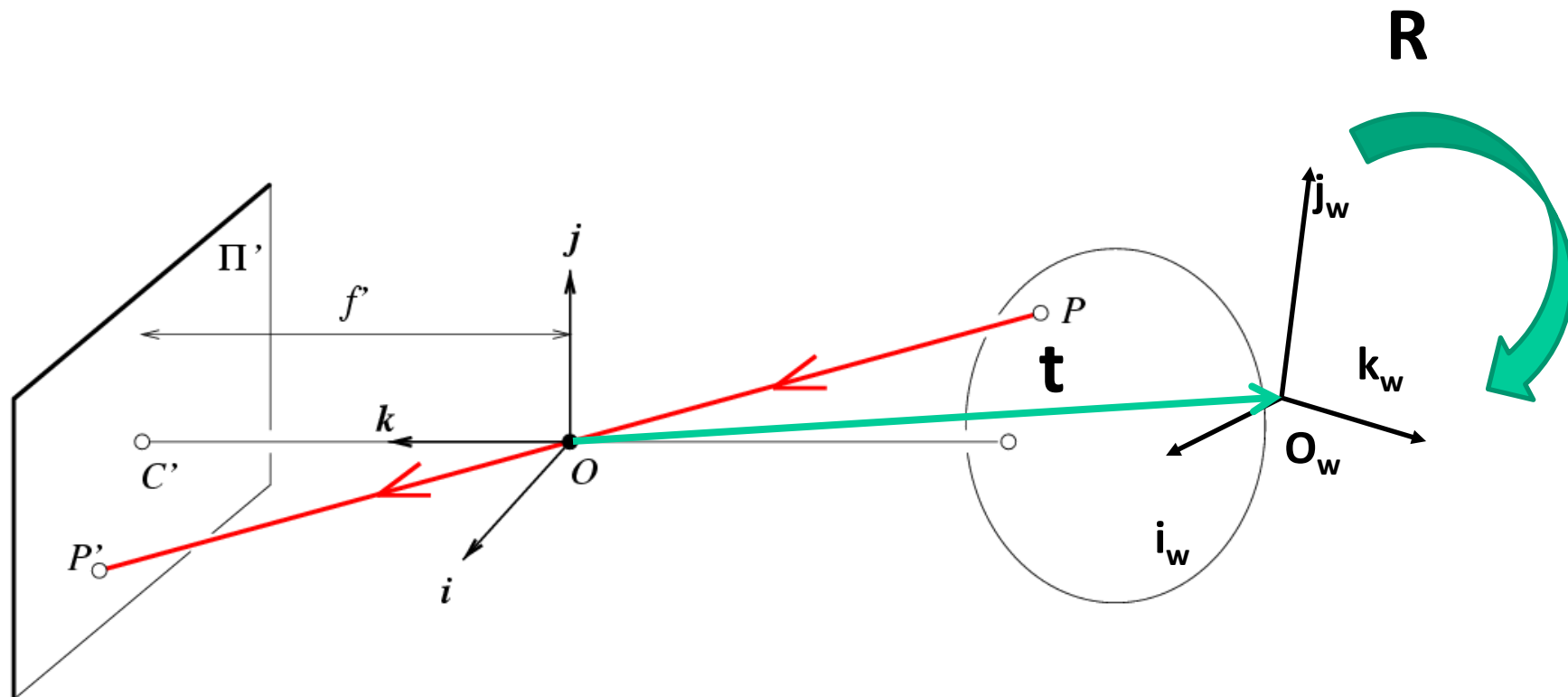
f_x =gor. raz./px

$$x = \frac{f_x X}{Z} + u_0$$

$$y = \frac{f_y Y}{Z} + v_0$$

px resolucija v mm

Model projekcije točke



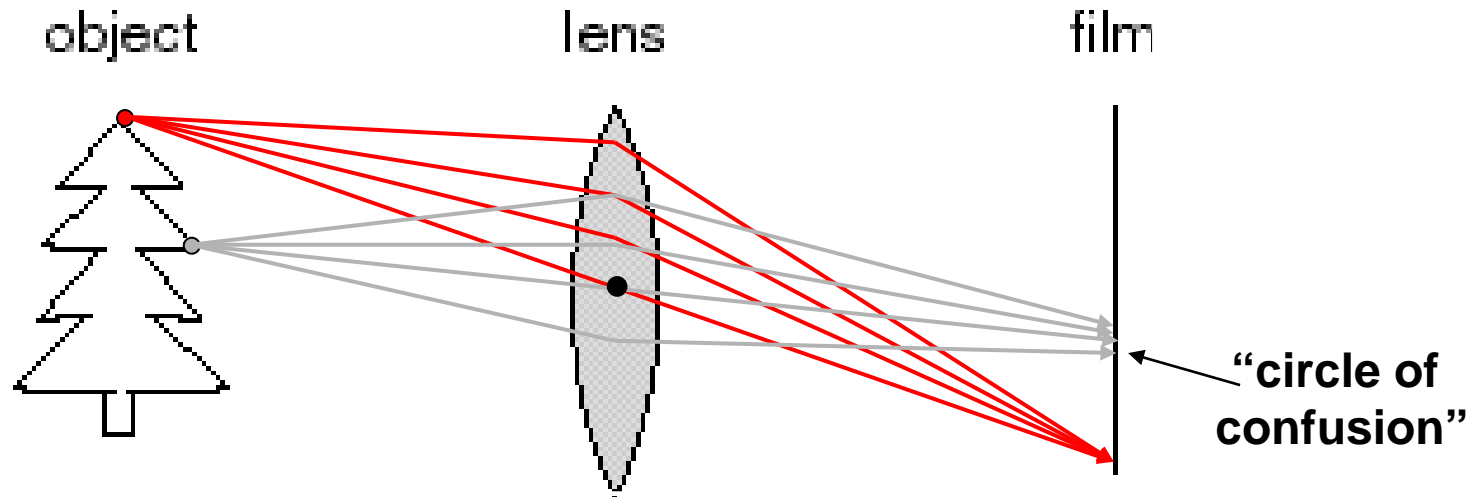
Model projekcije točke

$$\mathbf{x} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \end{bmatrix} \mathbf{X}$$

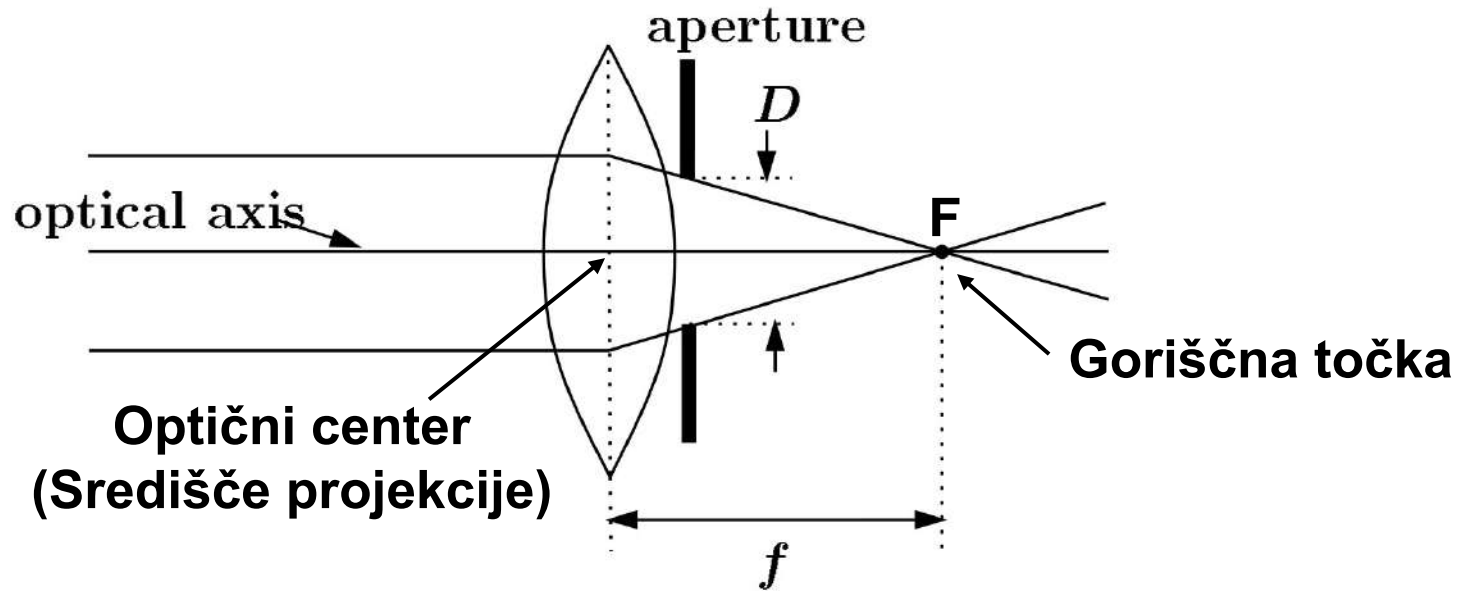


$$w \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & s & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Dodamo lečo



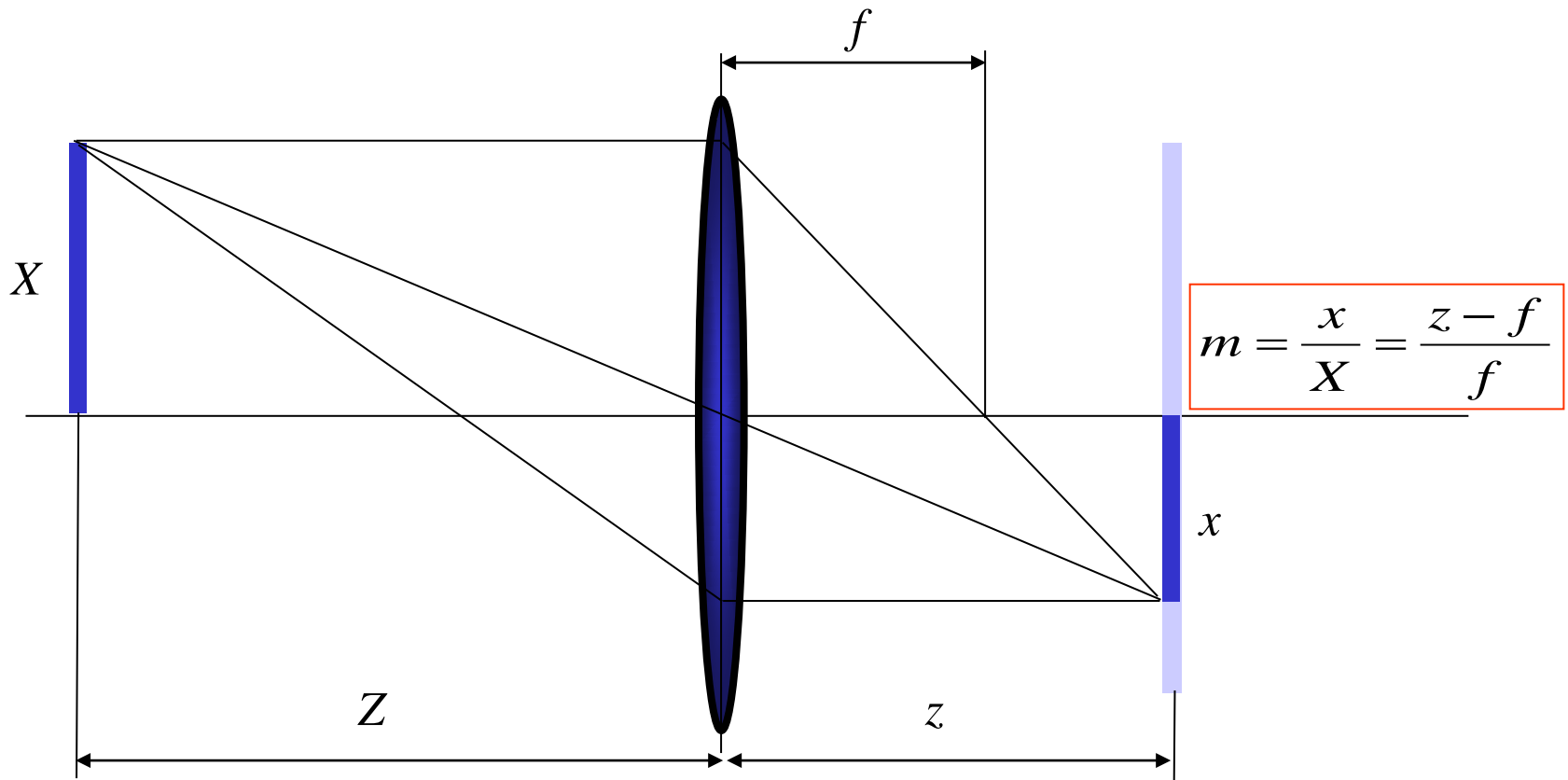
- Leča usmerja svetlobo na film



- Leča fokusira vzporedne žarke na eno žarišče
- žariščna točka na razdalji f nad ravnino leče
- Odprtina premera D omejuje obseg žarkov

Leče

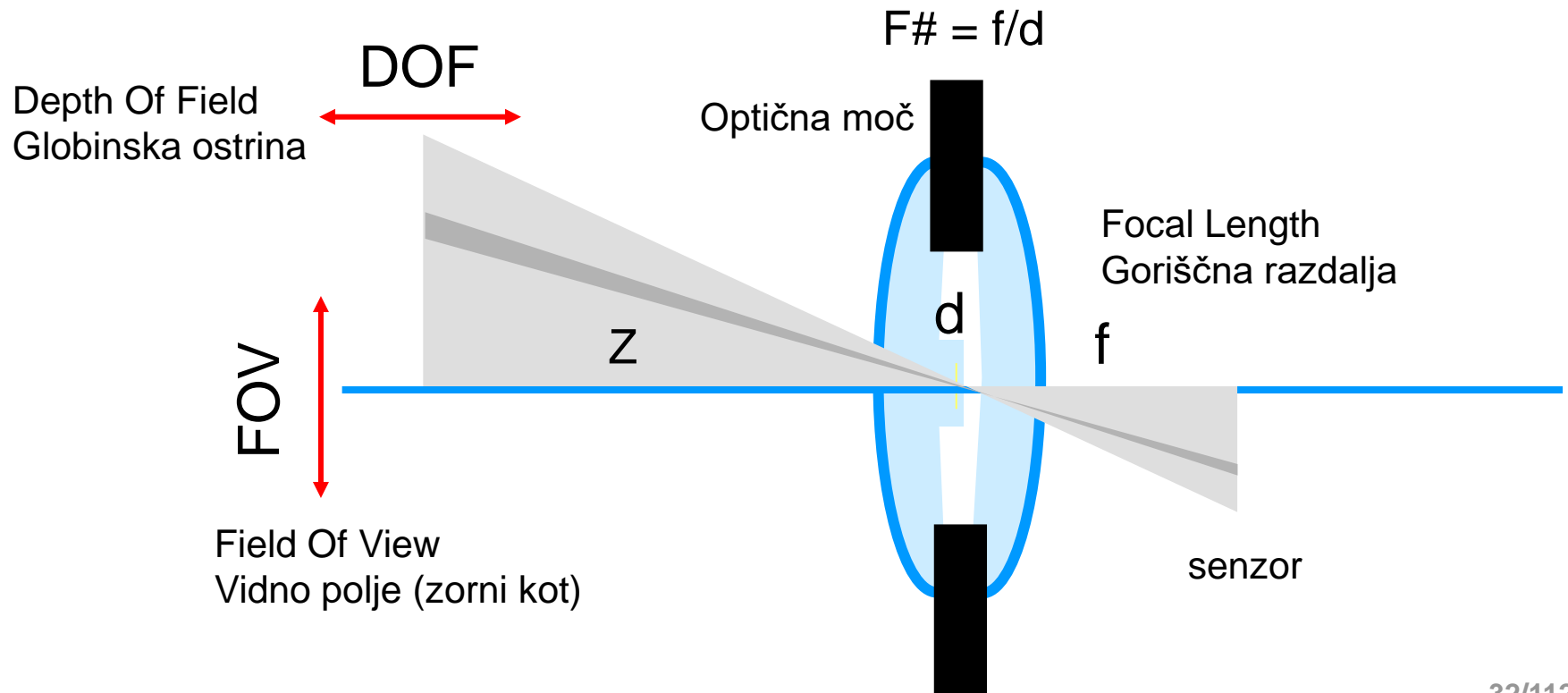
- Uvod
- Nastanek slike
- **Leče**
- Tipi osvetlitev
- Tipi kamer
- Barvni prostori
- Osnove procesiranja slik



$$m = \frac{x}{X} = \frac{z}{Z} \approx \frac{f}{Z}$$

Parametri leče

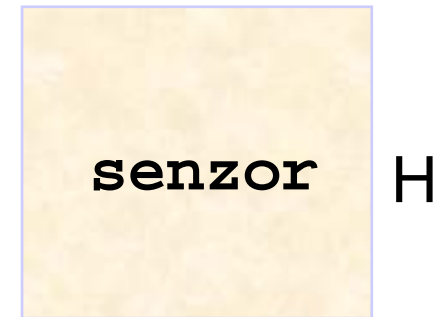
- **Klasična leča:**
velikost slike predmeta je odvisna od razdalje do predmeta.



Parametri leče

- Vidno polje (zorni kot)

$$FOV = 2 \times \arctan \frac{H}{2f}$$



- Širokokotna leča – majhen f.
- Zorni kot leče običajno poda proizvajalec.
- Je pa v praksi potrebno upoštevati še velikost senzorja.

Parametri leče

DOF: globinska ostrina - interval med največjo in najmanjšo razdaljo, na katerem je slika ostra

$$DOF = \frac{1}{m^2} \times F\# \times p$$

p – velikost piksla

Npr.: $m = 0.2$, $F\# = 16$, $p = 11 \mu\text{m}$, $DOF \approx 5 \text{ mm}$
(DOF najbolje ugotoviti s poskušanjem)

Vrste leč

Ozkokotne (10°)
Normalnokotne (30°)
Širokokotne ($60^\circ \rightarrow$)

Fiksne
Nastavljive

Ročne
Avtomatske
Motorizirane

Standardne
Makro ($m \approx 1$)
Telecentrične

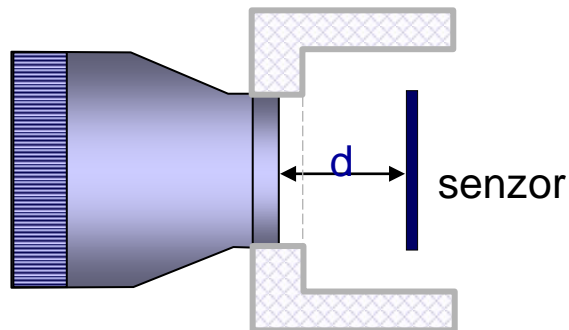
C - nastavek
CS – nastavek
F – nastavek
Vmesni obročki

Specialne
Integrirane

Nastavek

C – nastavek in CS – nastavek (angl. C/CS mount)

Razlika je v potrebni razdalji med lečo, to je nastavkom kamere za pritrditev leče, in senzorjem.



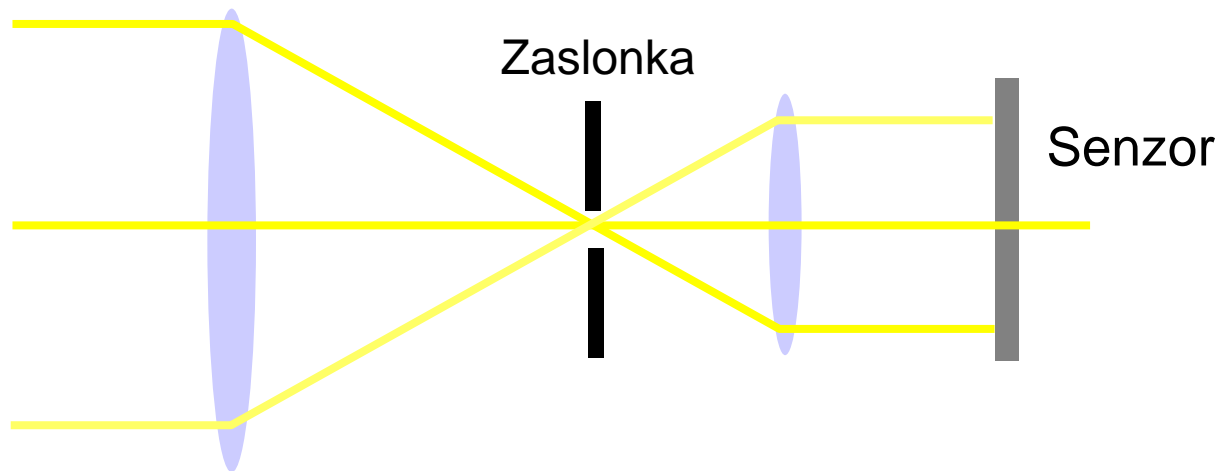
$d = 12.5$ mm za CS - nastavek

$d = 17.5$ mm za C - nastavek

Pri izbiri kamere in leče je to potrebno upoštevati.

Telecentrične leče

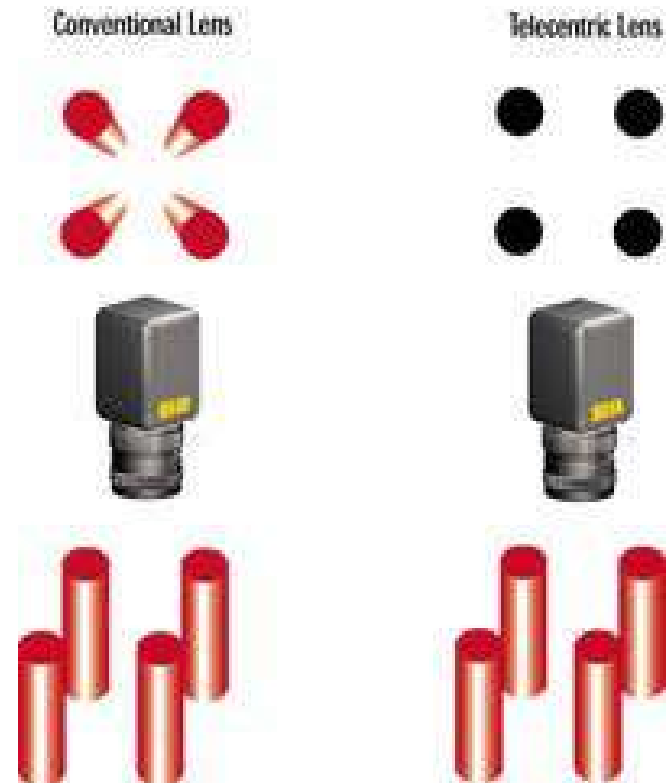
- Velikost slike ni odvisna od razdalje do predmeta
- Ostrina slike ni odvisna od razdalje do predmeta (vendar le v danem delovnem področju)



- Zunanja telecentričnost (na strani predmeta)
- Notranja telecentričnost (na strani senzorja)

Telecentrične leče

- Idealno:
 - Ni napake paralakse
 - Ni spremembe velikosti
- Dejansko:
 - Napaka telecentričnosti
- Pomembna podatka leče:
 - Delovna razdalja (npr. 100 mm)
 - Premer (npr. 70 mm)
 - Področje telecentričnosti
(sprememba razdalje, ki povzroči spremembo velikosti slike za μm)



Kamere

- Uvod
- Nastanek slike
- Leče
- **Tipi kamer**
- Tipi osvetlitev
- Barvni prostori
- Osnove procesiranja slik

Kamere

Linijske
Matrične

Pravokoten
Kvadraten piksel

Standardne
Industrijske

S prepletanjem
Progresivne

Črno bele
Barvne

Z visoko ločljivostjo
Z visoko hitrostjo

Analogne
Digitalne

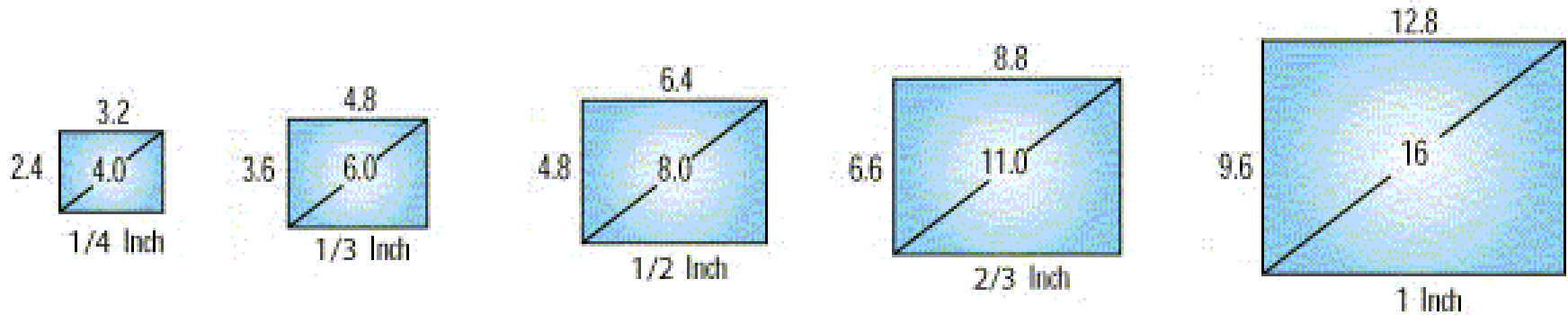
Nastavek, C (17.5mm),
CS (12.5mm), F

ToF kamere
Stereo kamere

Inteligentne

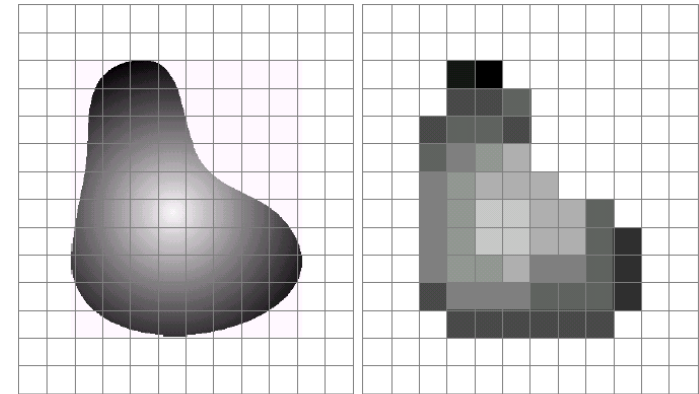
Matrične kamere

Standardne velikosti (CCD) senzorja



- Pri izbiri leče je potrebno format senzorja upoštevati.
- Leča je lahko tudi za večji format, ne pa za manjši.

Digitalne kamere

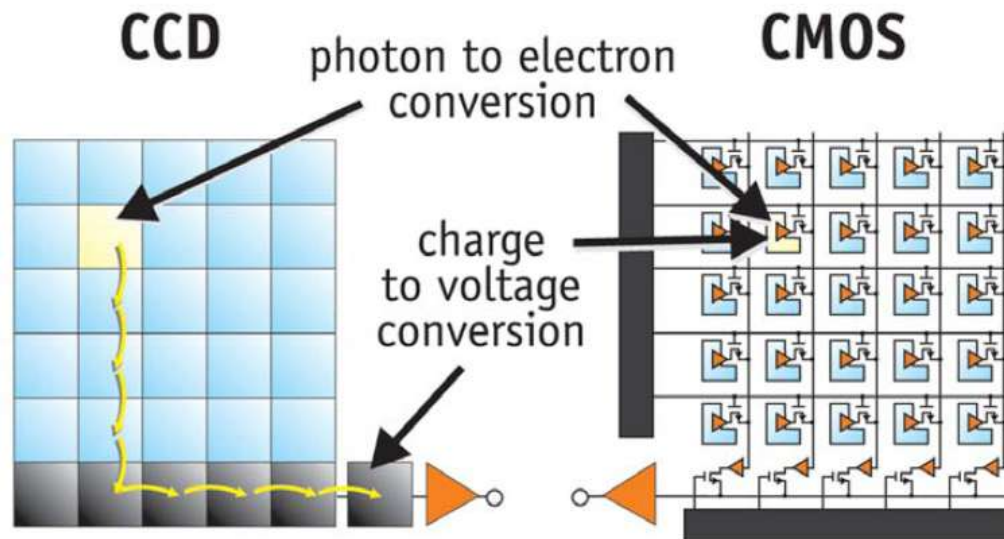


a b
FIGURE 2.17 (a) Continuous image projected onto a sensor array. (b) Result of image sampling and quantization.

- **Digitalna kamera je zamenjala film s senzorjem (polje senzorjev)**
 - ▶ Vsaka celica v senzorju je dioda, ki je občutljiva na svetlobo in foton sprememni v elektron
 - ▶ Dva tipična predstavnika
 - Charge Coupled Device (CCD)
 - Complementary metal oxide semiconductor (CMOS)
 - ▶ <http://electronics.howstuffworks.com/digital-camera.htm>

- **Charge Coluped Device:** prenese naboj posamezne točke preko skupnega vozlišča. AD pretvornik pretvori vrednost točke v digitalno obliko
- **Complementary metal–oxide–semiconductor - CMOS:** uporablja tranzistorje za vsako točko in „ožičenje“ za vsako točko, ker je CMOS senzor digitalen, ne potrebuje ADC.

<http://electronics.howstuffworks.com/digital-camera.htm>



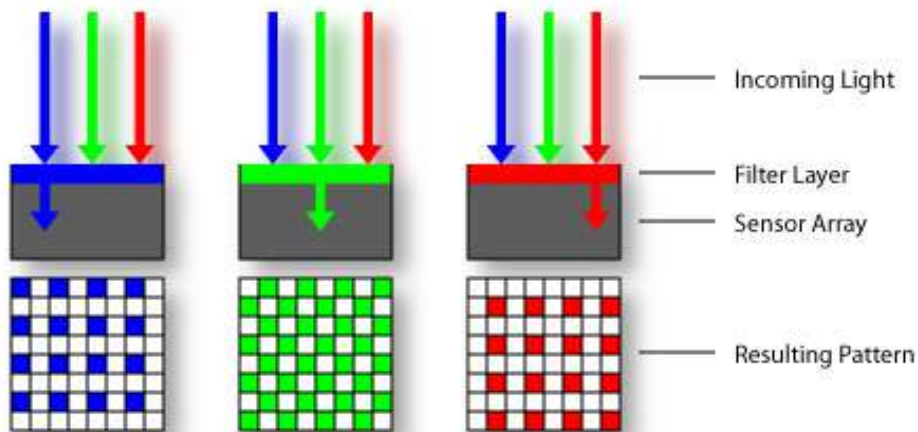
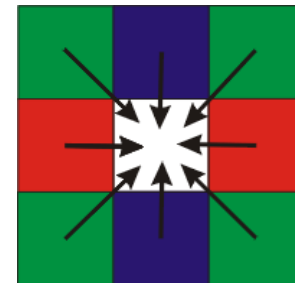
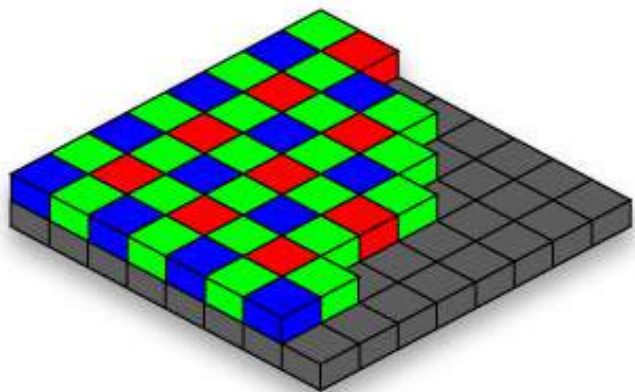
CCDs move photogenerated charge from pixel to pixel and convert it to voltage at an output node. CMOS imagers convert charge to voltage inside each pixel.

<http://www.dalsa.com/shared/content/pdfs/CCD vs CMOS Litwiller 2005.pdf>

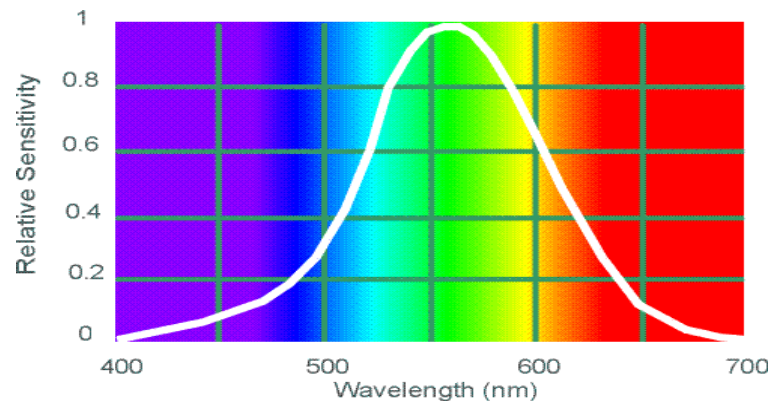
Barvne kamere

Bayer mreža

Ocena manjkajočih točk (demaicing)



Zakaj več zelene?

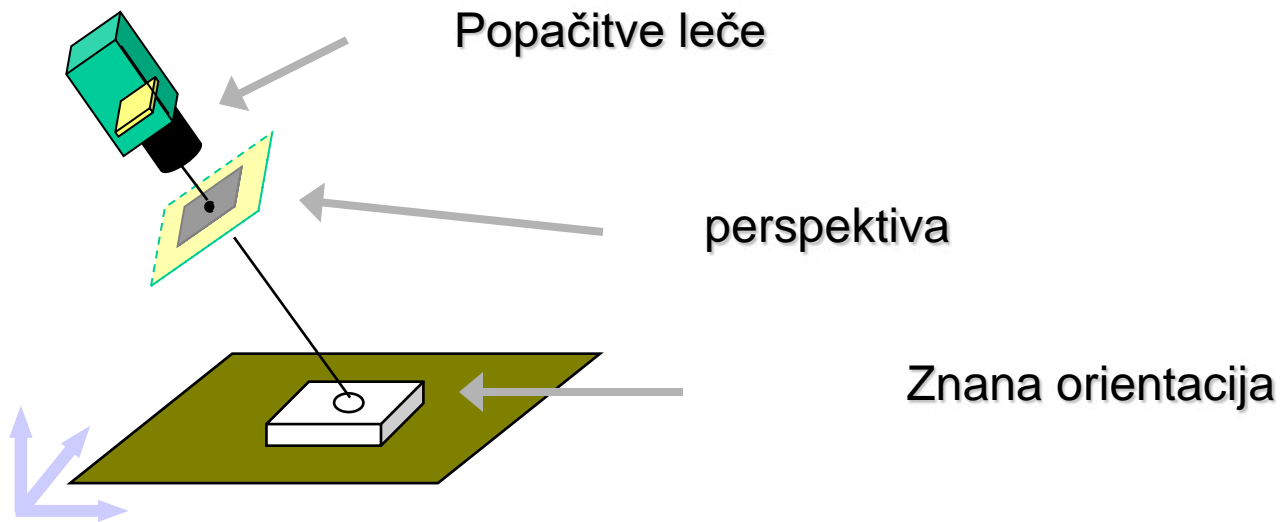


Občutljivost človeškega očesa



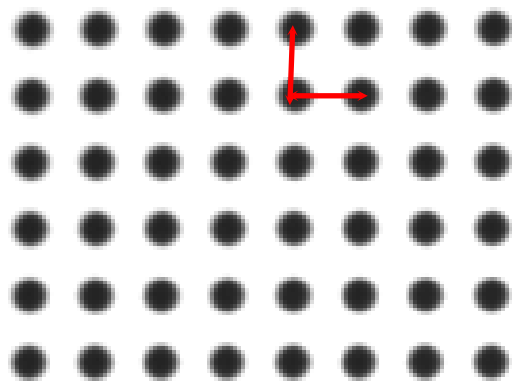
Kalibracija kamere

- Upoštevati moramo napake zaradi:

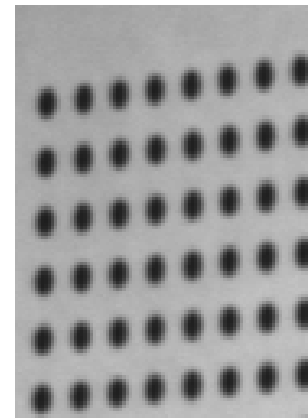


Kalibracija kamere z mrežo

- ▶ Poznati moramo razdalje med točkami
- ▶ Izmeriti moramo popačitve ter jih odpraviti



Originalni template

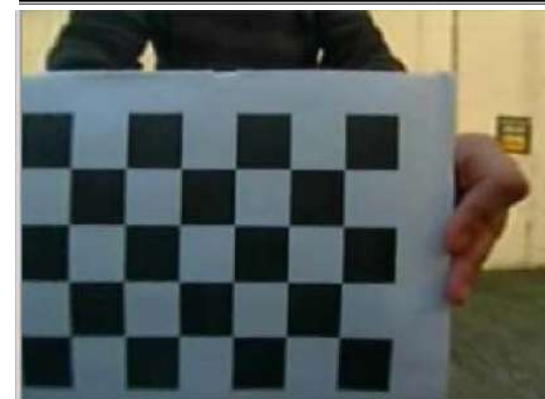
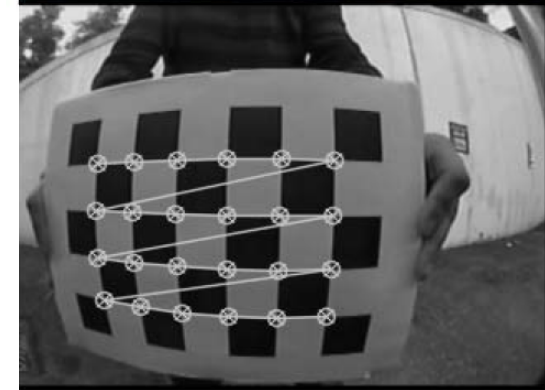


Zajeta slika

Transformacijska matrika

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r1 & r2 & r3 & t1 \\ r4 & r5 & r6 & t2 \\ r7 & r8 & r9 & t3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$



Tipi osvetlitev

- Uvod
- Nastanek slike
- Leče
- Tipi kamer
- **Tipi osvetlitev**
- Barvni prostori
- Osnove procesiranja slik

Osvetlitev

- **Izbira osvetlitve je zelo pomembna**
 - ▶ **Loči objekt od ozadja**
 - ▶ **Omogoči lažje razpoznavanje objektov**
 - ▶ **Odstrani sence in zagotavlja vedno enake pogoje**
- ▶ **Radialna osvetlitev**
- ▶ **Točkovna osvetlitev**
- ▶ **Osvetlitev ozadja**
- ▶ **Difuzna osvetlitev**

Radialna osvetlitev

- Luč obda lečo kamere

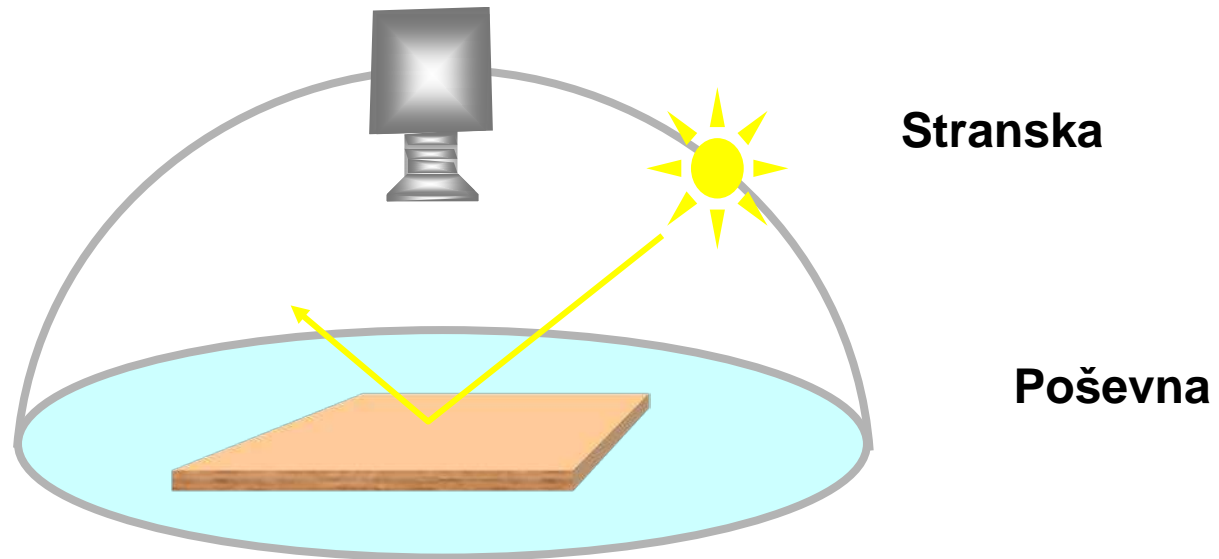


Točkovna osvetlitev

- **Impulzi svetlobe se prožijo ob vsakem okvirju**
- **Prednosti: Zmanjšujejo t.i. šum zaradi gibanja (motion blur)**
- **Slabosti: delna osvetlitev, sence**



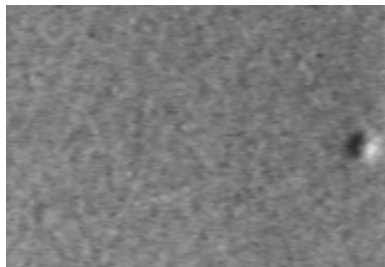
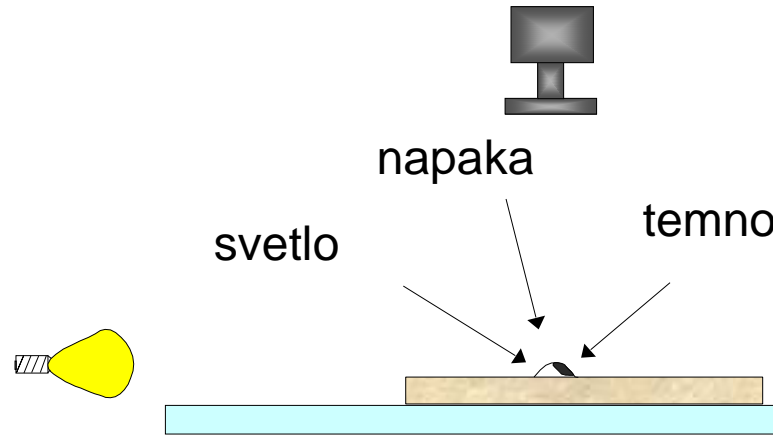
Osvetlitev spredaj



- **Stranska osvetlitev**, usmerjena, temno polje, povzroča sence, odbleske izboklin, vboklin
- **Poševna osvetlitev**, dobra za kotrolo ravnosti površin

Poševna osvetlitev-primer

Namen:
odkrivanje
površinskih
napak

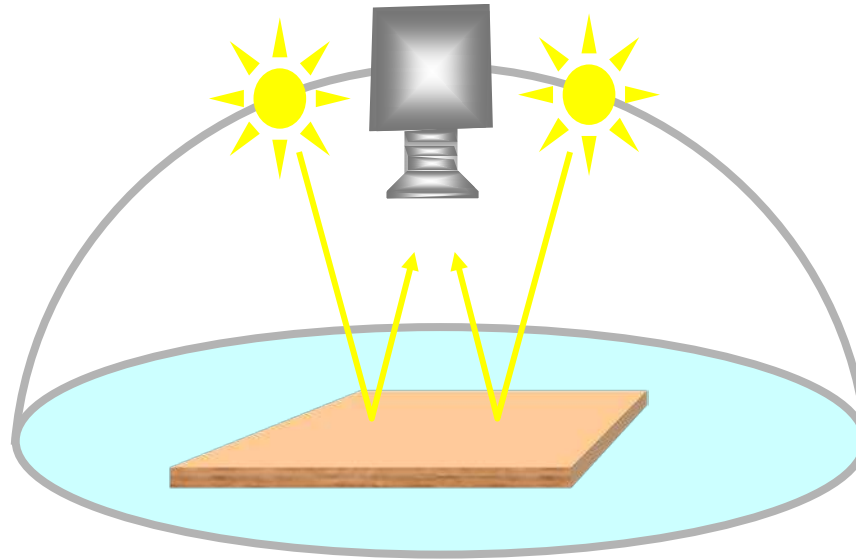


ploščica



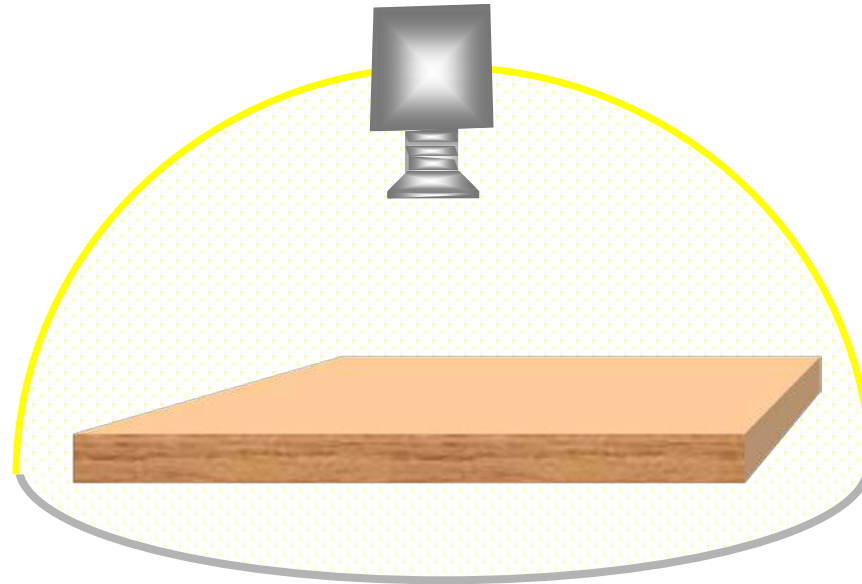
napaka

Osvetlitev z vrha



- **Osvetlitev z vrha**, usmerjena ali difuzna, v svetlem polju, **ne povzroča senc**
- **Koaksialna osvetlitev** (poseben primer) primerna za ravne, odbojne/vpojne površine (PCB)
 - Dober kontrast

Homogena osvetlitev



Difuzna - homogena osvetlitev

- ne povzroča senc
- primerna za odbojne nepravilne površine

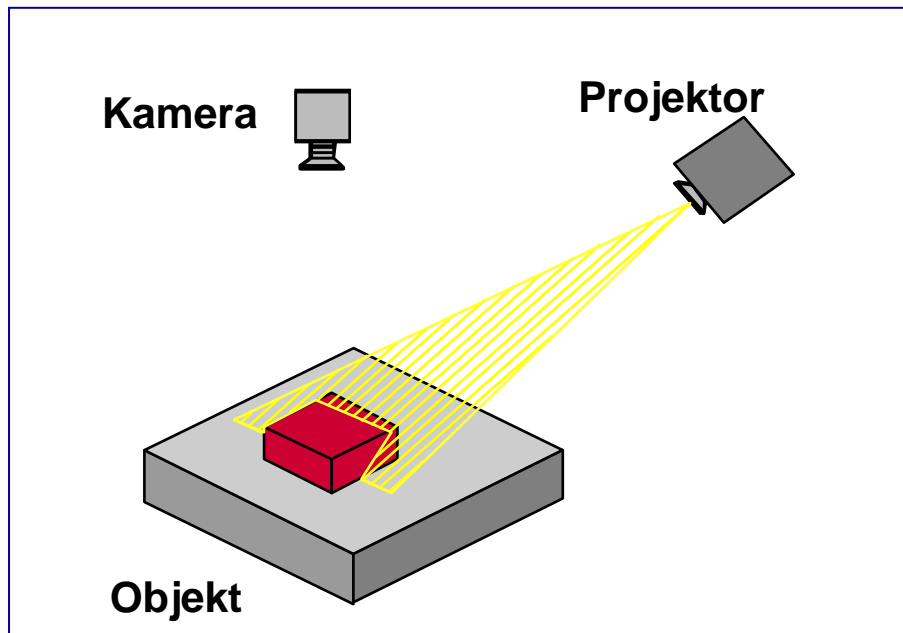
Homogena (difuzna) svetloba

- ▶ Odboj svetlobe zaradi teksture ali tipa površine objekta
- ▶ Odpravimo zrcalni odboj

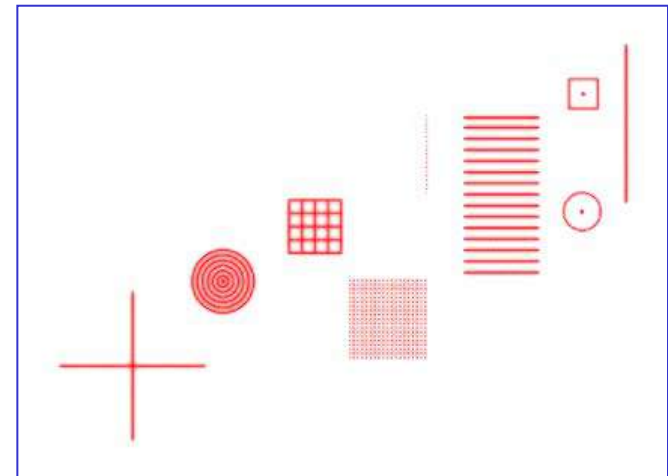


Strukturirana osvetlitev

Zajemanje 3D oblike (globine) na osnovi 2D slik

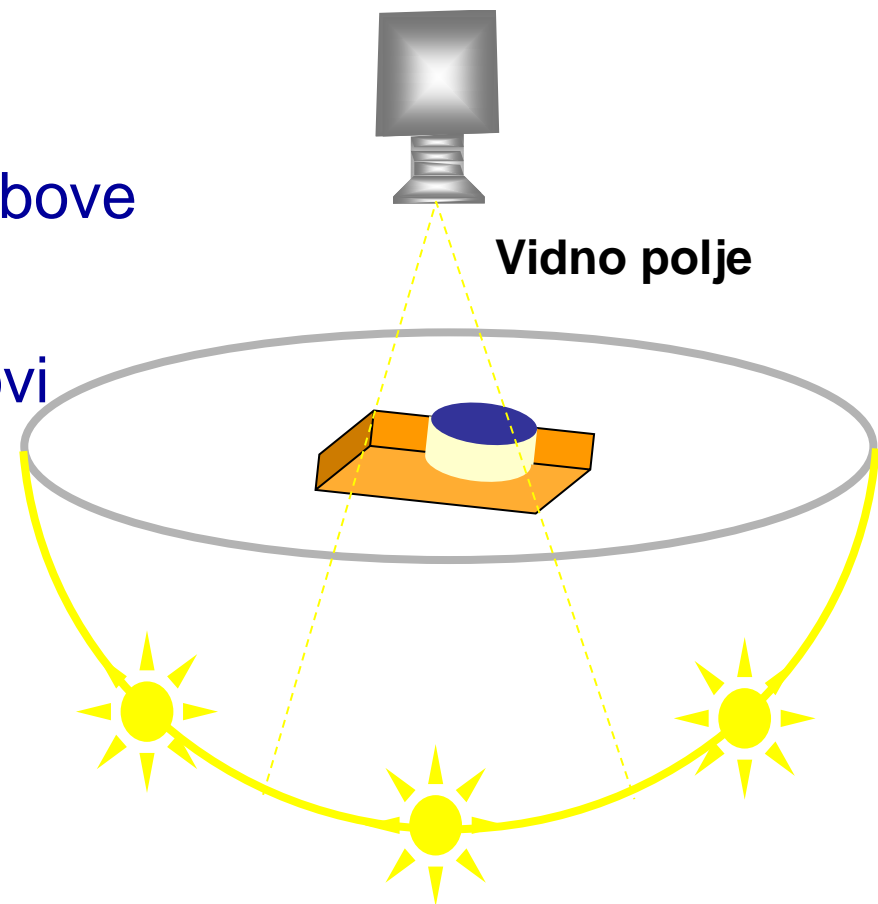


Svetlobni vzorci



Osvetlitev ozadja

- difuzna, usmerjena, kolimirana
 - neprosojni predmeti
 - obris - silhueta
- daje ostre in stabilne robove
 - prosojne snovi
- kontrola strukture snovi



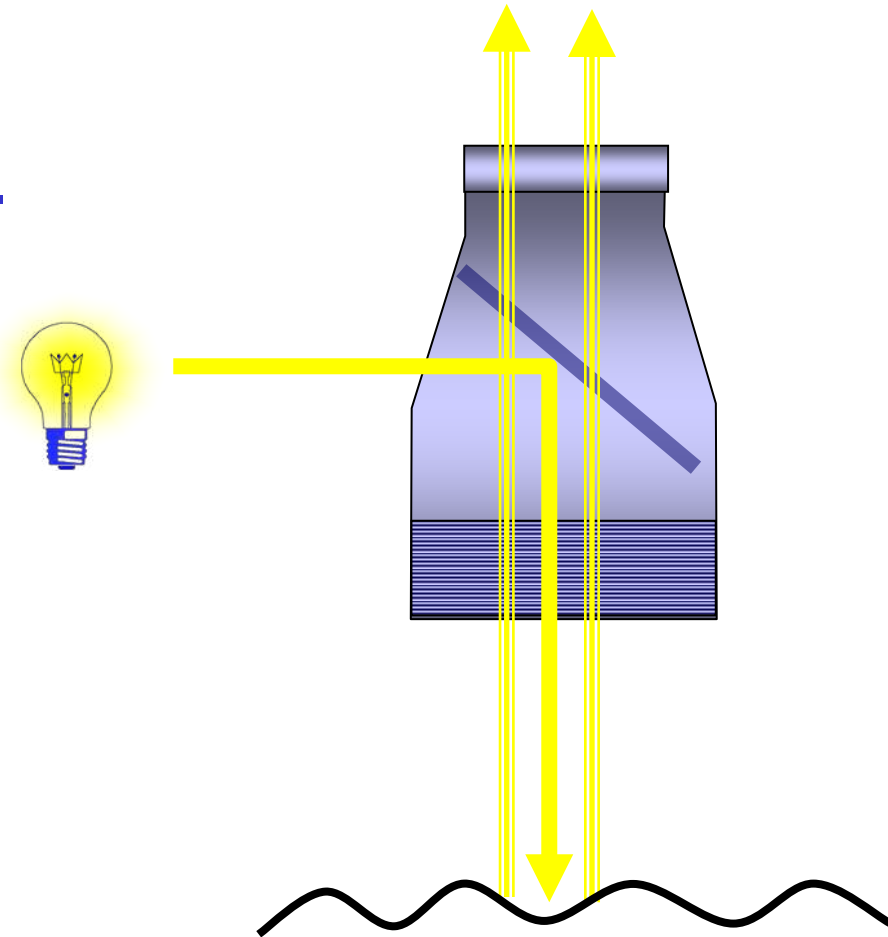
Osvetlitev ozadja

- **Objekt se nahaja med kamero in izvorom svetlobe**
- **Dobimo ostre robove in ostro sliko**
- **Slabosti: ukrivljeni objekti lahko popačijo svetlobo**



Specialne leče

Leča s svetilom in pol-prepustnim zrcalom



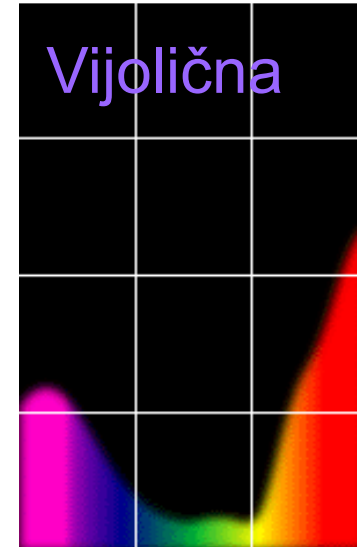
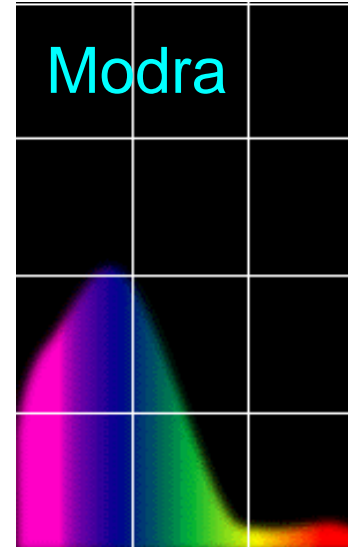
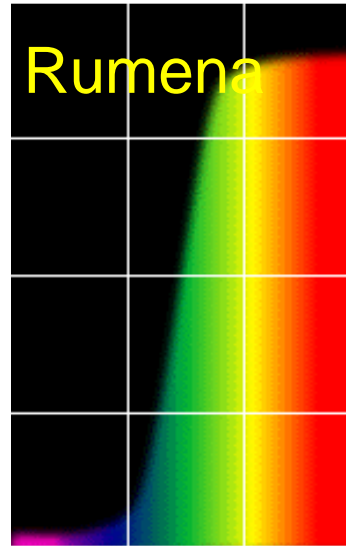
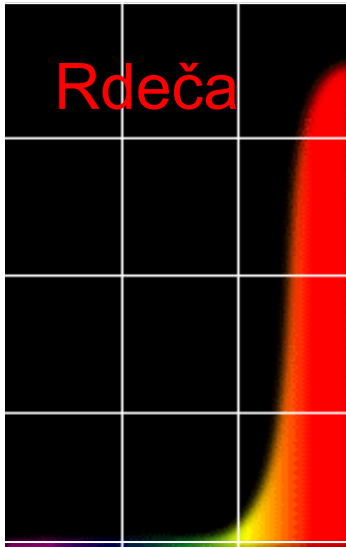
Barve

- Uvod
- Nastanek slike
- Leče
- Tipi kamer
- Tipi osvetlitev
- **Barvni prostori**
- Osnove procesiranja slik

Kaj je barva?

- Barva je psihološka lastnost naših vizualnih izkušenj, ko gledamo predmete in luči, ne pa fizična lastnost teh predmetov ali luči
- **(S. Palmer, *Vision Science: Photons to Phenomenology*)**
- Barva je rezultat interakcije med fizično svetlobo v okolju in našim vizualnim sistemom

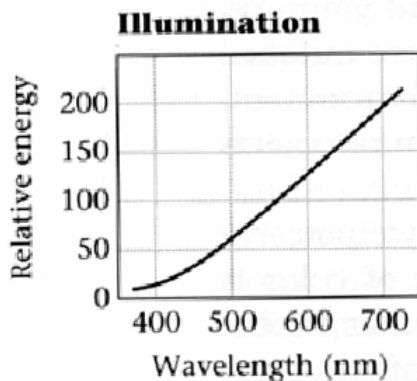
Nekaj primerov odbojnih spektrov površin



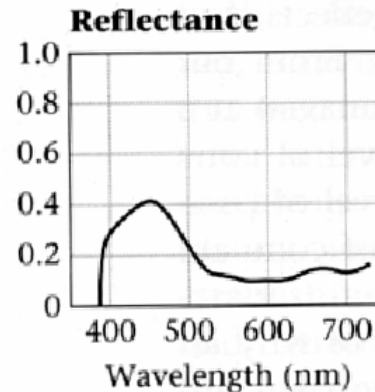
Interakcija svetlobe in površine



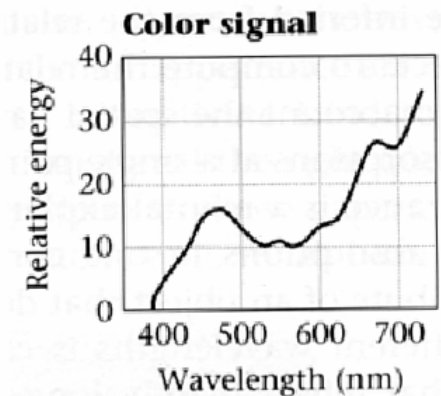
- Odsevana barva je rezultat interakcije spektra svetlobnega vira s površinsko odbojnostjo

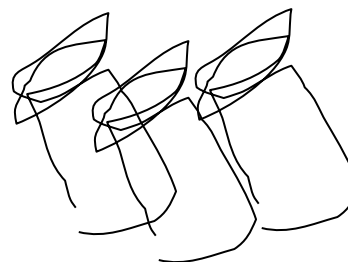
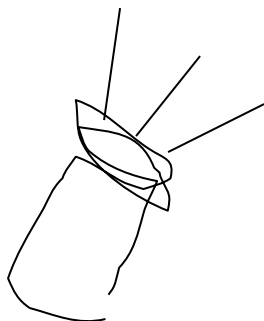
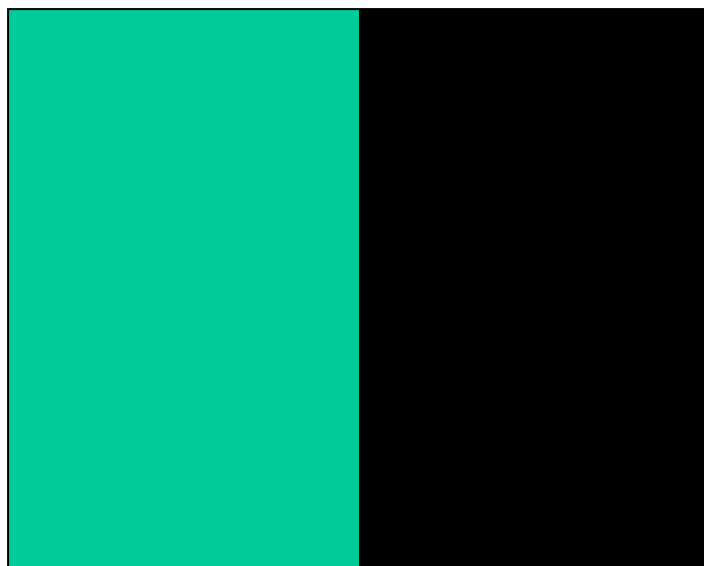


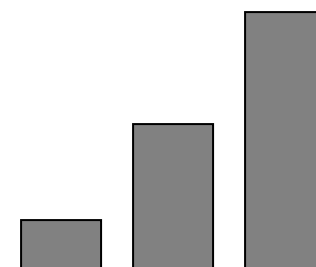
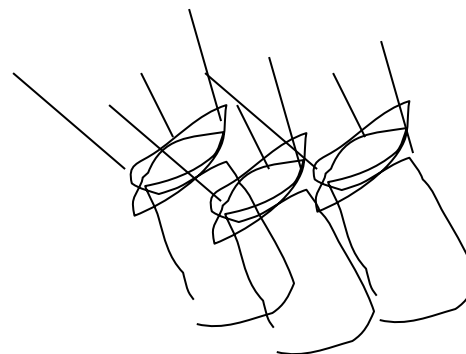
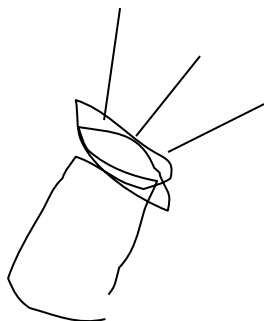
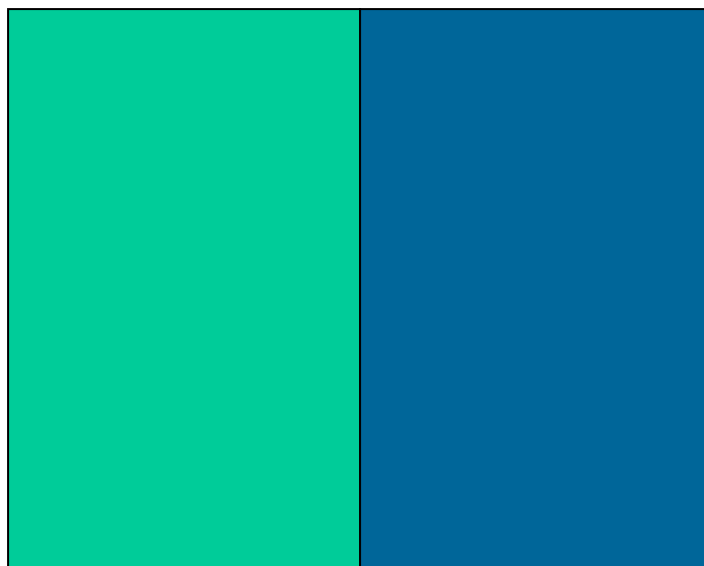
• *



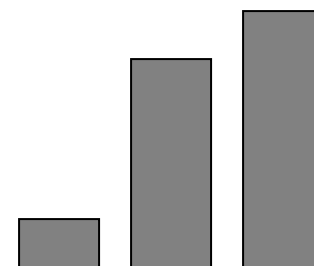
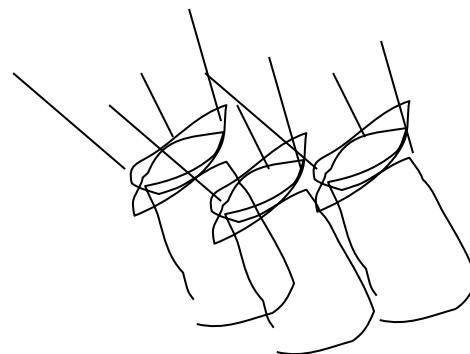
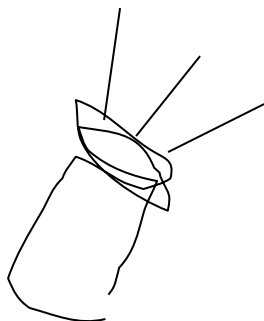
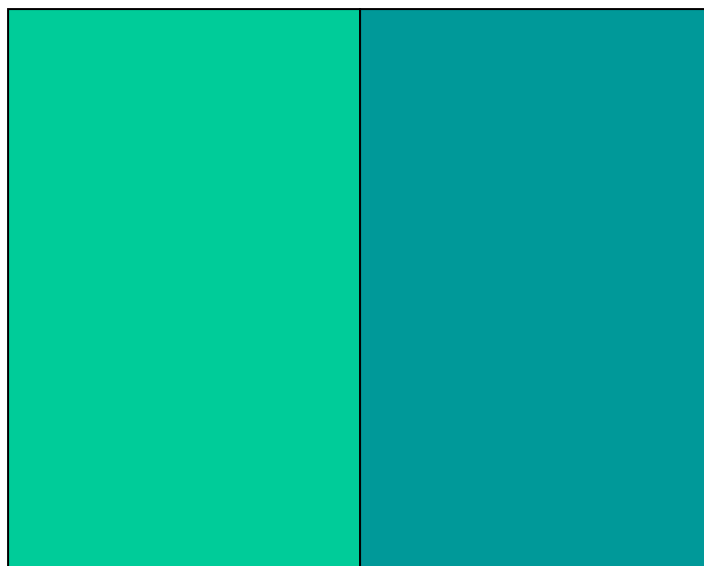
=



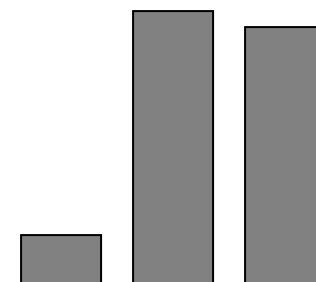
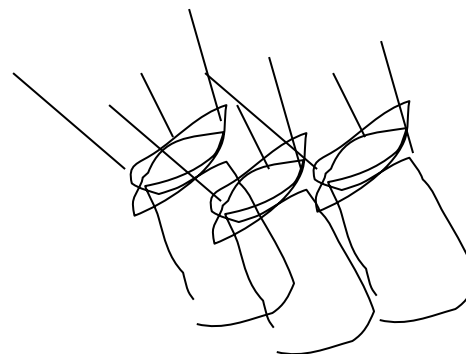
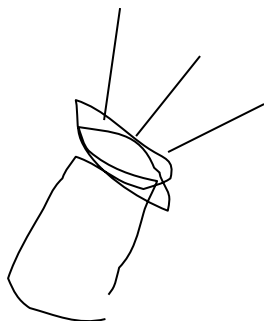
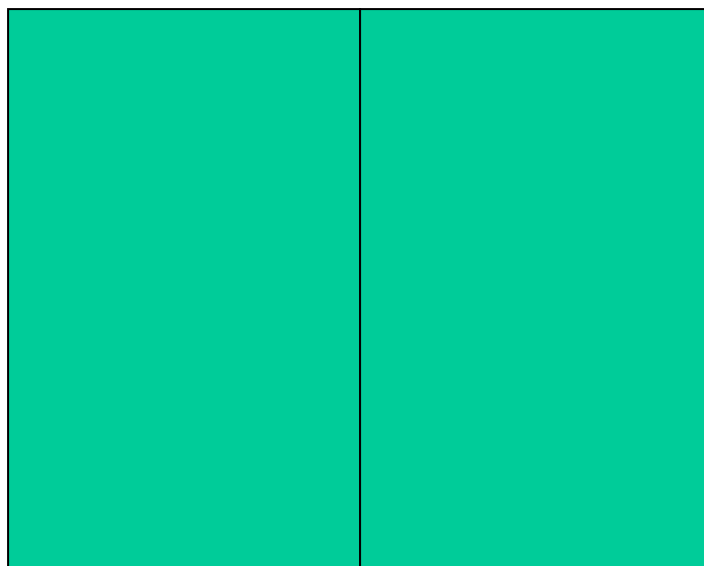




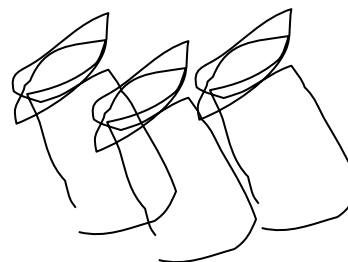
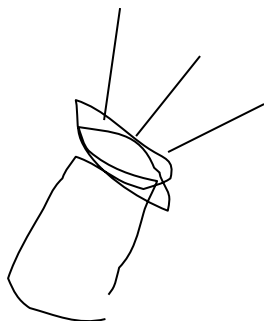
p_1 p_2 p_3

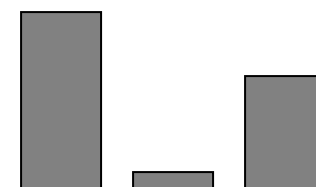
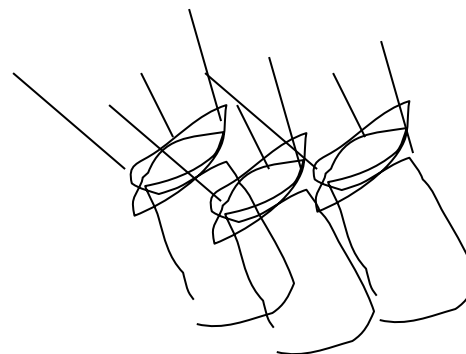
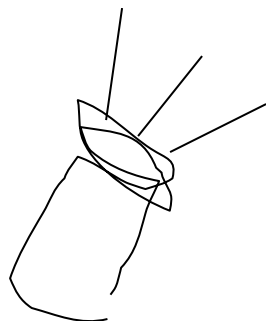
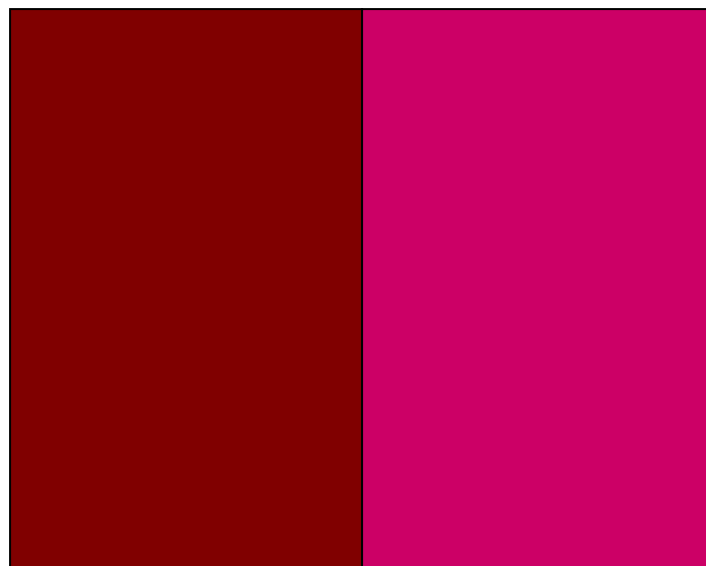


p_1 p_2 p_3

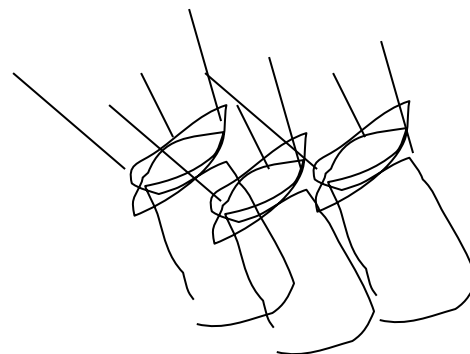
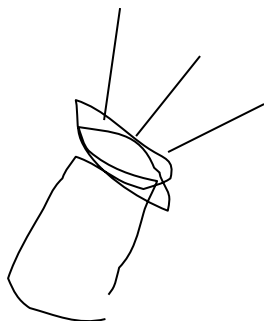
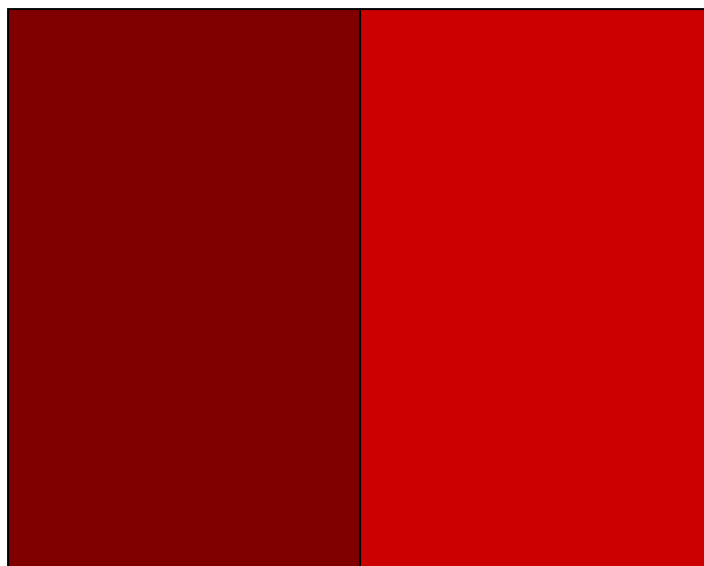


p_1 p_2 p_3



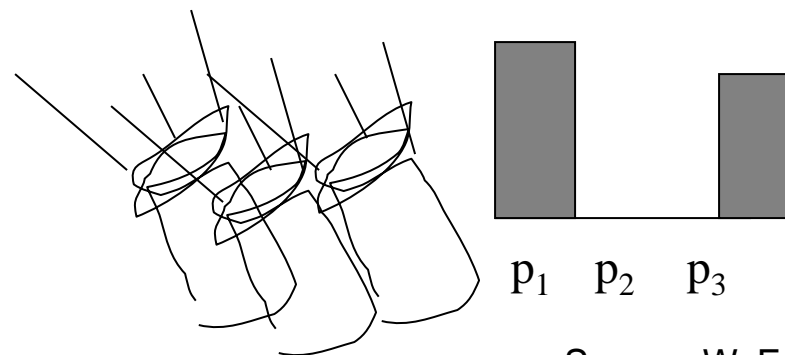
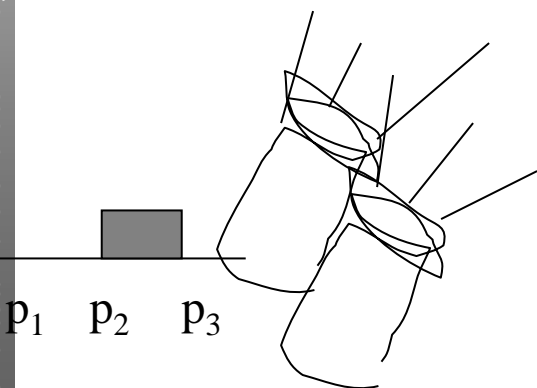
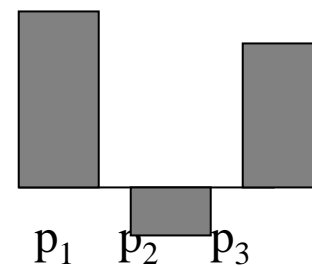
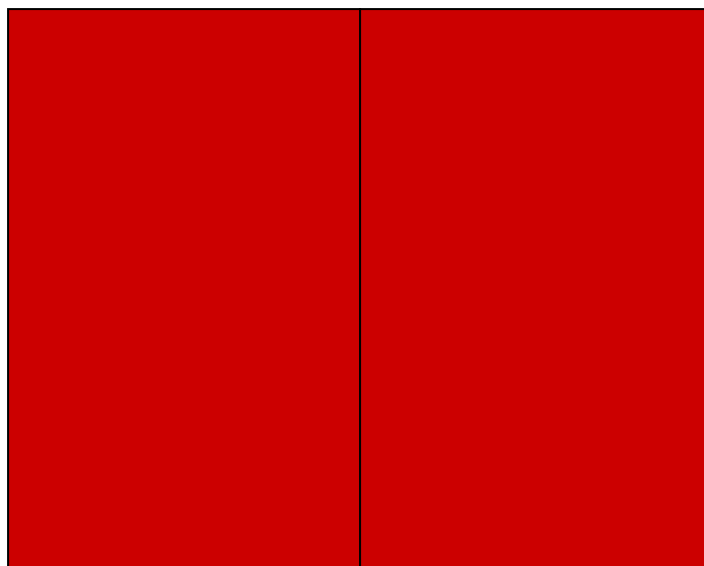


p_1 p_2 p_3

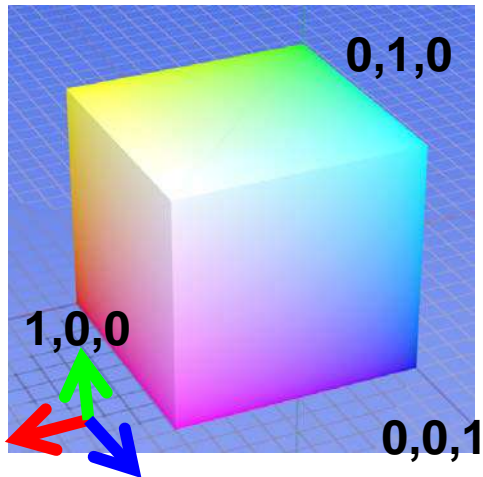


p_1 p_2 p_3

Pravimo, da je bila za ujetanje potrebna »negativna« količina p_2 , ker smo jo dodali na stran testne barve.



Barvni prostori: RGB



R
(G=0,B=0)



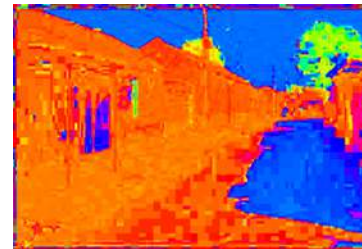
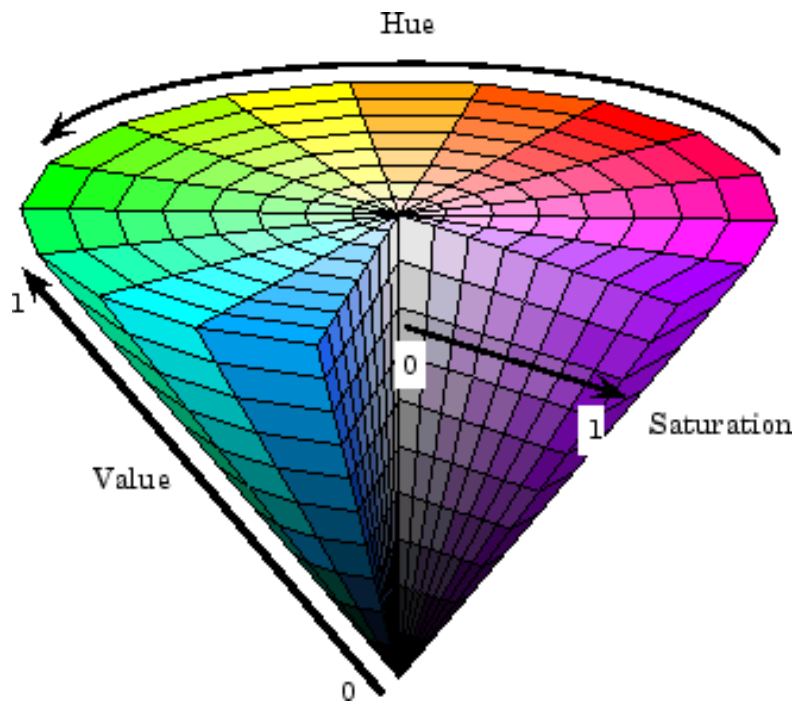
G
(R=0,B=0)



B
(R=0,G=0)

Color spaces: HSV

Intuitive color space



H
(S=1,V=1)

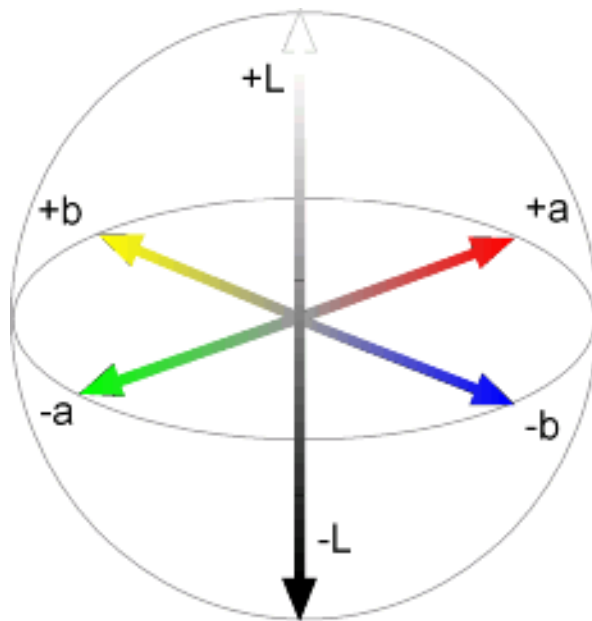


S
(H=1,V=1)



V
(H=1,S=0)

Color spaces: $L^*a^*b^*$



L
($a=0, b=0$)



a
($L=65, b=0$)

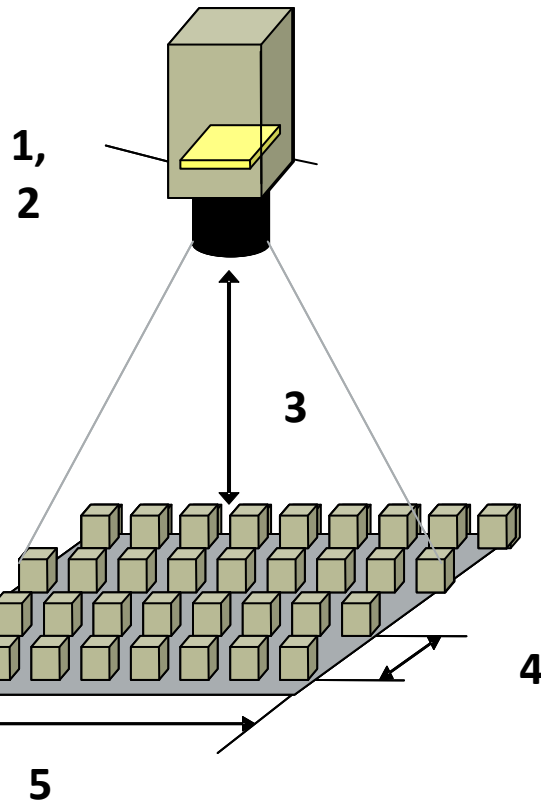


b
($L=65, a=0$)

Osnove obdelave slik

- Uvod
- Nastanek slike
- Leče
- Tipi kamer
- Tipi osvetlitev
- Barvni prostori
- **Osnove procesiranja slik**

Parametri sistema za zajem slike



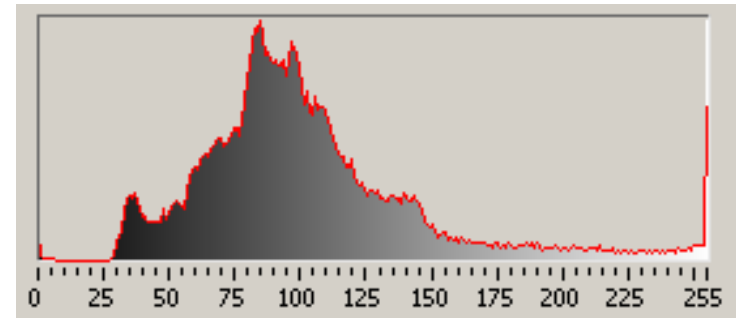
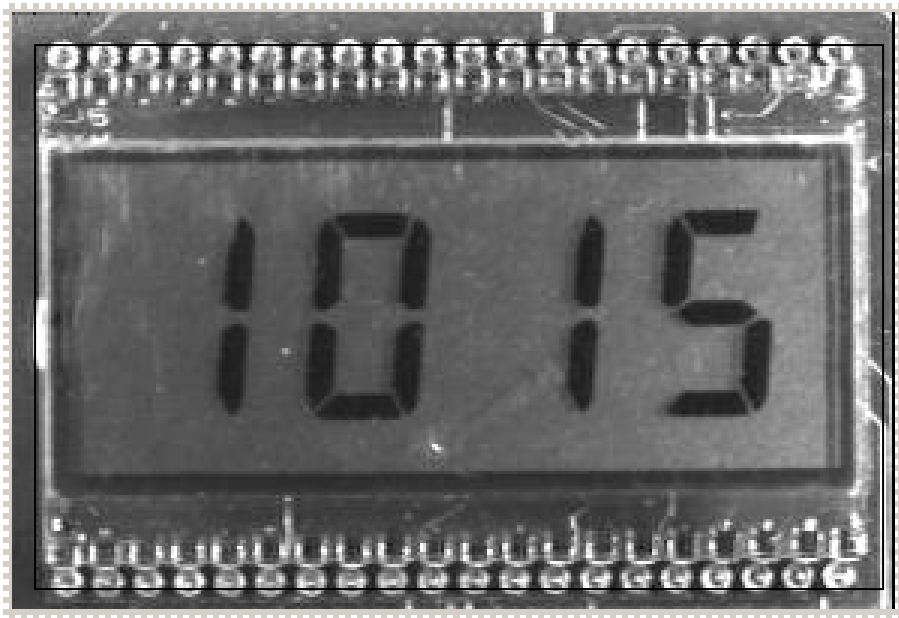
1. **Resolucija senzorja: (velikost pike senzorja) / (s številom vrstic in stolpcev)**
2. **Velikost senzorja: Fizična velikost senzorjevega polja**
3. **Razdalja: Razdalja od leče do objekta**
4. **Resolucija točk na objektu**
5. **Velikost opazovanega polja**
6. **Hitrost spreminjanja dinamike scene (okvirji na sekundo - fps)**

Obdelava slik

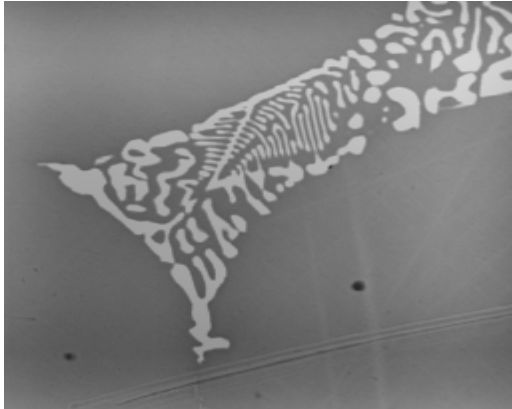
- ▶ **Statistične lastnosti slik**
- ▶ **Analiza delcev**
- ▶ **Primerjava vzorcev**
- ▶ **Zaznavanje robov**
- ▶ **Razvrščanje**
- ▶ **Filtriranje**

Statistične lastnosti slik

- ▶ Zaznavanje objektov s histogrami
- ▶ Ocenitev osvetljenosti in ostrine slike s pomočjo standardne deviacije



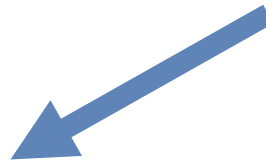
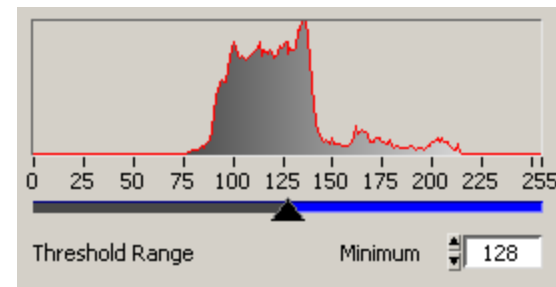
Histogrami in pragovne funkcije



Originalna slika



Histogram slike

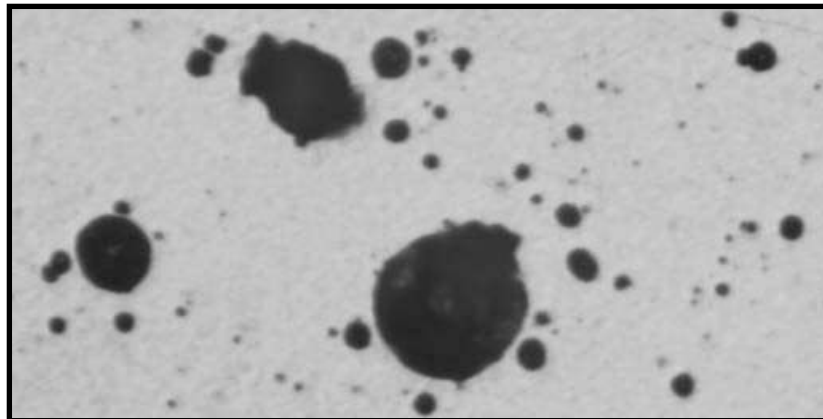
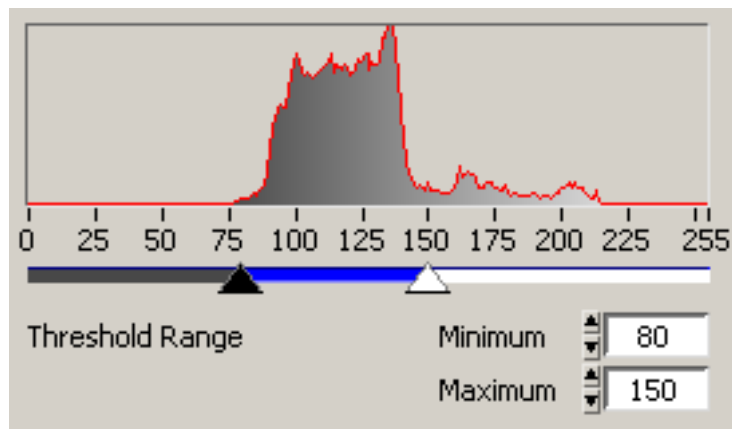
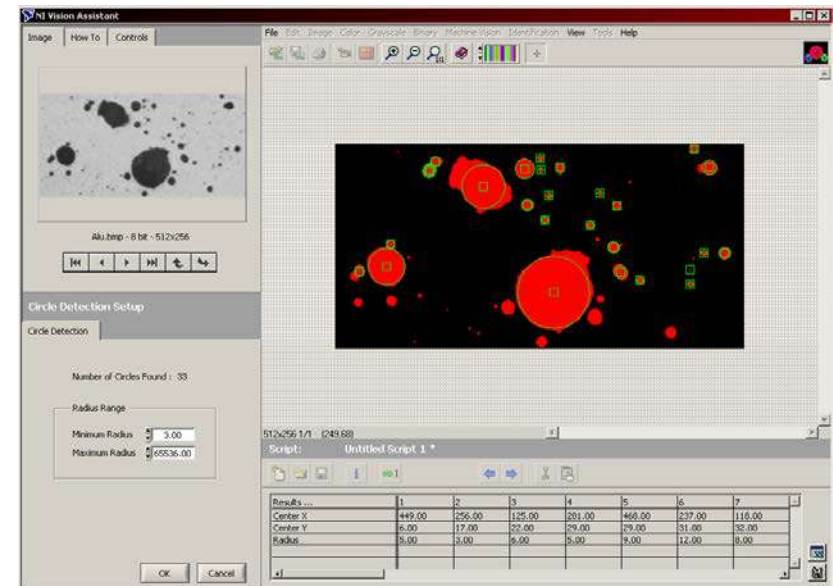


Binarna slika

- Vrednosti nad pragom so ohranjene(1)
- Ostale so odstranjene (0)

Iskanje objektov s sivinami

- Določimo zgornjo in spodnjo mejo v histogramu

Circle Detection Setup

Circle Detection

Number of Circles Found: 33

Radius Range

Minimum Radius: 3.00

Maximum Radius: 65536.00

Result...	1	2	3	4	5	6	7
Center X	449.00	256.00	125.00	201.00	466.00	237.00	116.00
Center Y	6.00	17.00	52.00	29.00	29.00	31.00	32.00
Radius	3.00	3.00	6.00	5.00	9.00	12.00	9.00

(Pred)obdelava slike

- Točkovne operacije:

aritmetične in logične operacije: +, -, *, /, IN, ALI, ...
včasih nastopajo samostojno, še pogosteje pa so sestavni del sestavljenih operacij.

- Lokalne operacije:

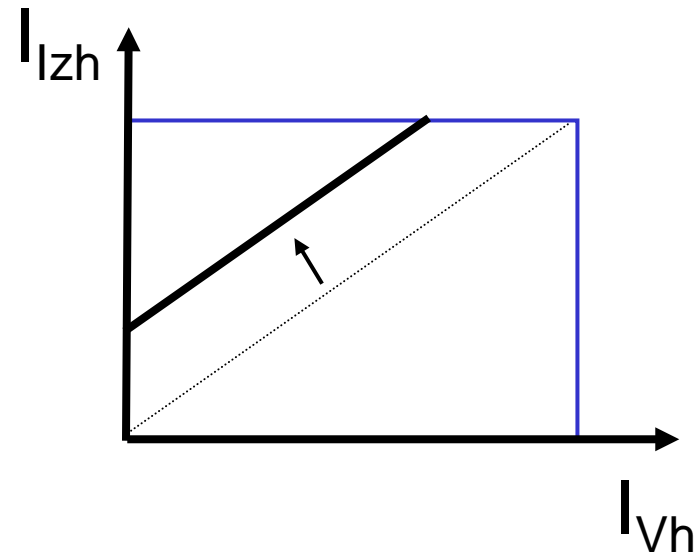
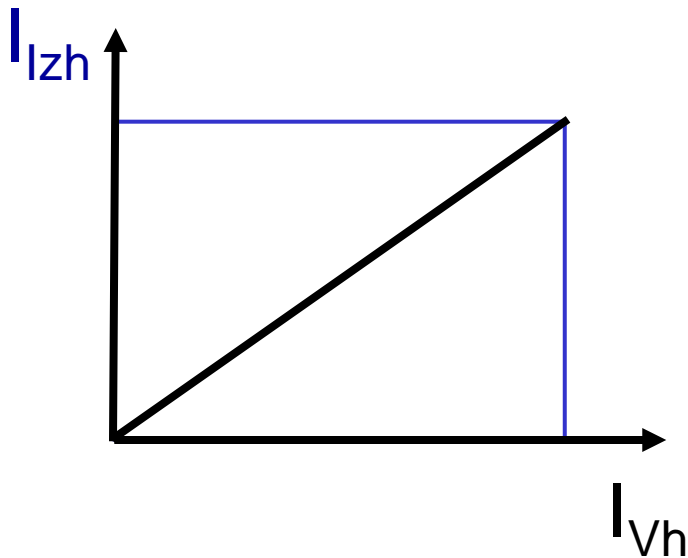
linearno / nelinearno filtriranje "šuma".

- Globalne operacije:

take, ki so rezultat celotne vsebine slike (histogram)

Točkovne operacije

Spreminjanje svetlosti: $I_{Izh} = I_{Vh} + k$

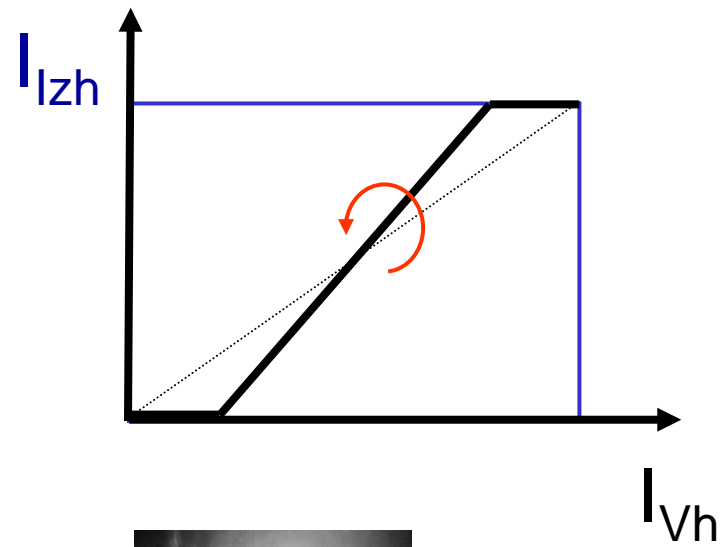
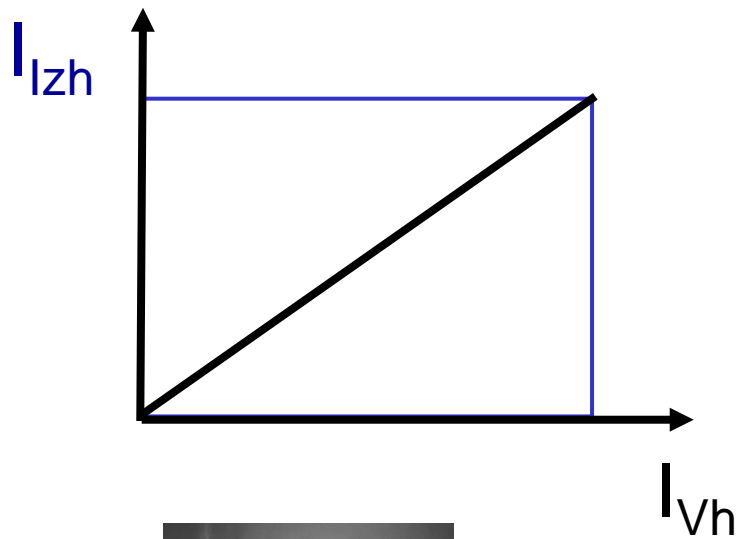


I_{Vh} - Vhodni nivoji svetlosti (sivosti)

I_{Izh} - Izhodni nivoji svetlosti (sivosti)

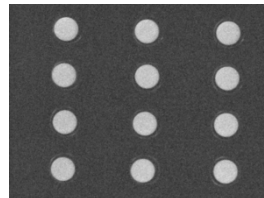
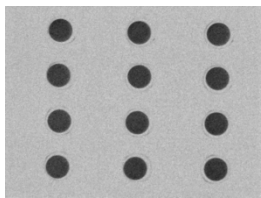
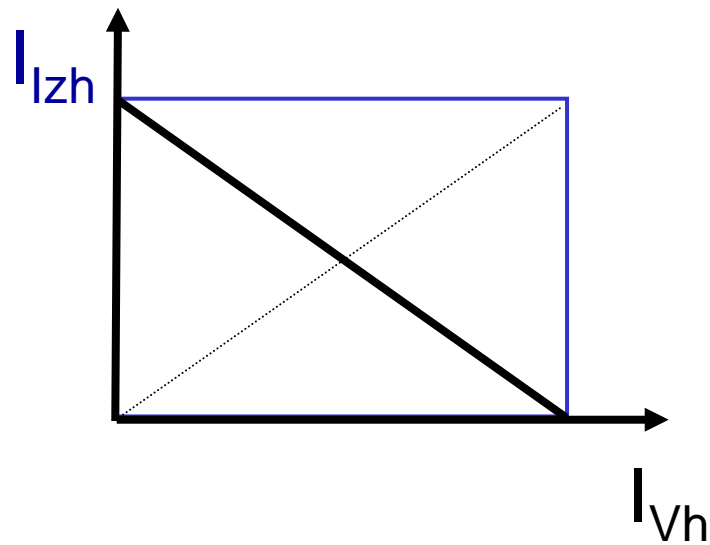
Točkovne operacije

Spreminjanje kontrasta: $I_{Izh} \approx k \cdot I_{Vh}$

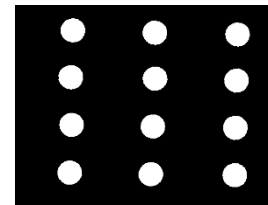
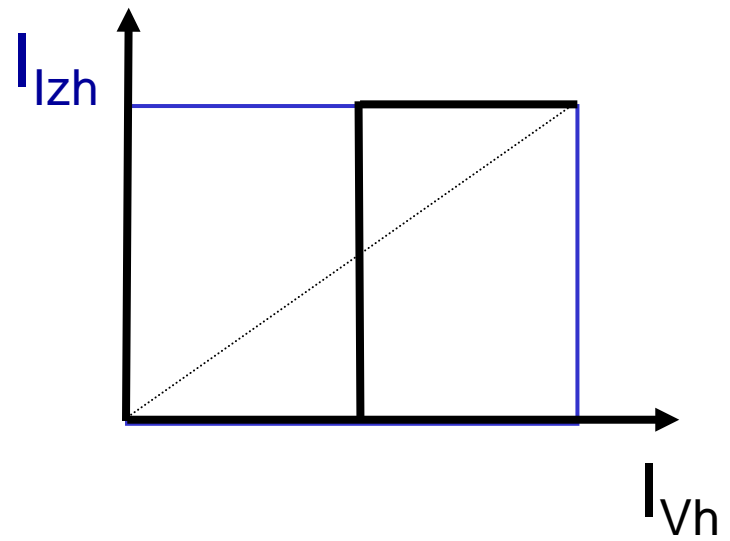


Točkovne operacije

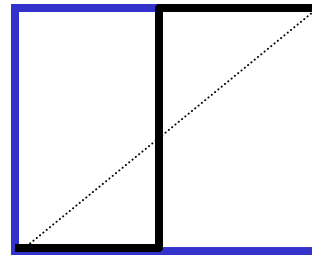
invertiranje



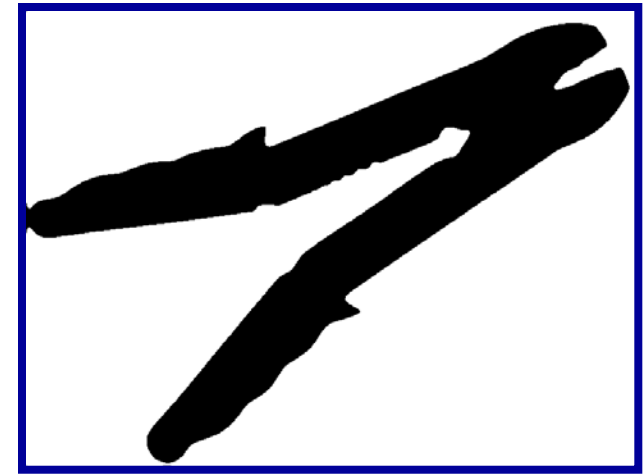
upragovljenje



Upragovljenje

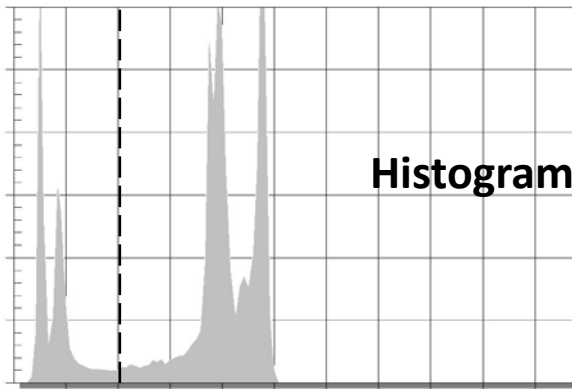


t



Vhod: Sivinska slika

Izhod: Binarna slika



t

Lokalne operacije

- Zmanjšati nivo šuma
 - Gaussov šum
 - Impulzni šum (“poper in sol”)
- Linearno filtriranje (Gaussov filter)
- Nelinearno filtriranje (median filter)

$$I_{Izh}(i, j) = \sum_k \sum_l h(k, l) \times I_{Vh}(i-k, j-l)$$

1	1	1
1	1	1
1	1	1

$f[\cdot, \cdot]$

$h[\cdot, \cdot]$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$$h[m, n] = \sum_{k, l} g[k, l] f[m + k, n + l]$$

1	1	1
1	1	1
1	1	1

$f[\cdot, \cdot]$

$h[\cdot, \cdot]$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	0	10							

$$h[m, n] = \sum_{k, l} g[k, l] f[m + k, n + l]$$

1	1	1
1	1	1
1	1	1

$f[\cdot, \cdot]$

$h[\cdot, \cdot]$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	0	10	20						

$$h[m, n] = \sum_{k, l} g[k, l] f[m + k, n + l]$$

1	1	1
1	1	1
1	1	1

$f[\cdot, \cdot]$

$h[\cdot, \cdot]$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	0	10	20	30					

$$h[m, n] = \sum_{k, l} g[k, l] f[m + k, n + l]$$

1	1	1
1	1	1
1	1	1

$f[\cdot, \cdot]$

$h[\cdot, \cdot]$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	0	10	20	30	30				

$$h[m, n] = \sum_{k, l} g[k, l] f[m + k, n + l]$$

Image filtering

$$g[\cdot, \cdot] \frac{1}{9}$$

1	1	1
1	1	1
1	1	1

$f[\cdot, \cdot]$

$h[\cdot, \cdot]$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	0	10	20	30	30				
							?		
				50					

$$h[m, n] = \sum_{k, l} g[k, l] f[m + k, n + l]$$

$$g[k, l] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$f[.,.]$

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	90	0	90	90	90	0	0
0	0	0	90	90	90	90	90	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$h[.,.]$

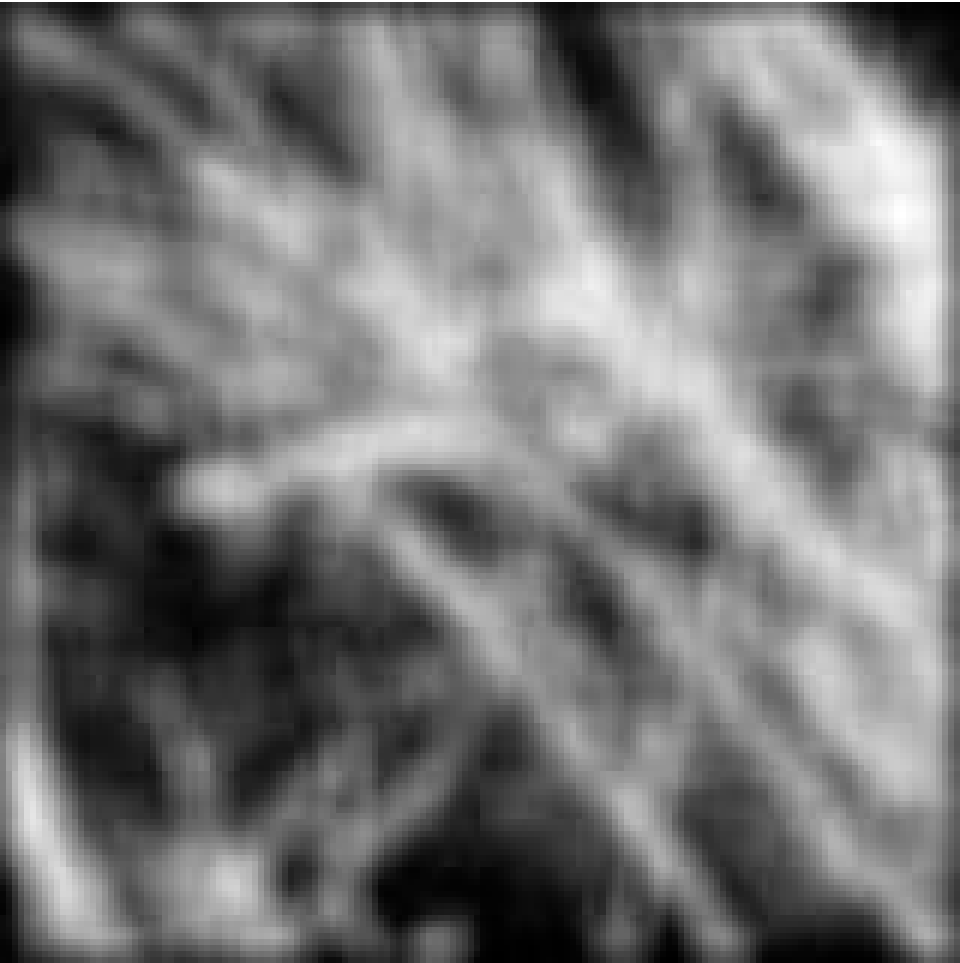
	0	10	20	30	30	30	20	10	
	0	20	40	60	60	60	40	20	
	0	30	60	90	90	90	60	30	
	0	30	50	80	80	90	60	30	
	0	30	50	80	80	90	60	30	
	0	20	30	50	50	60	40	20	
	10	20	30	30	30	30	20	10	
	10	10	10	0	0	0	0	0	

$$h[m, n] = \sum_{k, l} g[k, l] f[m + k, n + l]$$

$g[\cdot, \cdot]$

1
—
9

1	1	1
1	1	1
1	1	1



Uporaba linearnih filtrov



Original

0	0	0
0	1	0
0	0	0

?

Uporaba linearnih filtrov



Original

0	0	0
0	1	0
0	0	0



Ni spremembe

Practice with linear filters



Original

0	0	0
0	0	1
0	0	0

?

Practice with linear filters



Original

0	0	0
0	0	1
0	0	0



Premaknjen za eno točko

Uporaba linearnih filtrov



Original

0	0	0
0	2	0
0	0	0

−

$\frac{1}{9}$

1	1	1
1	1	1
1	1	1

?

Practice with linear filters



Original

0	0	0
0	2	0
0	0	0

■

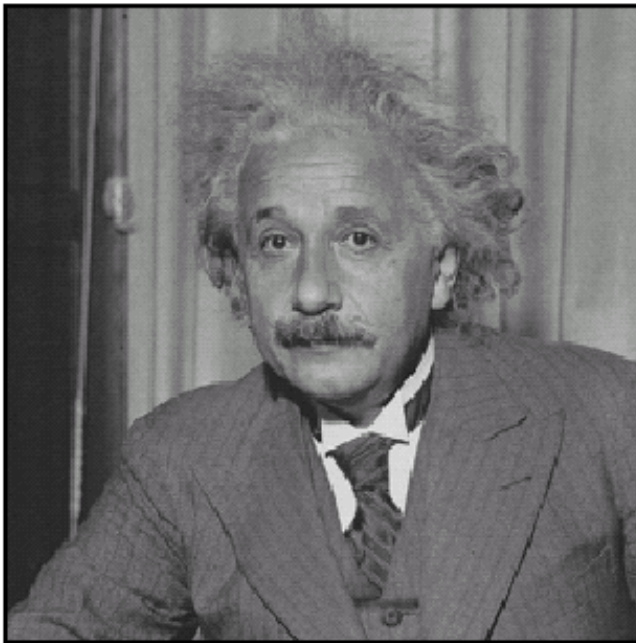
$\frac{1}{9}$

1	1	1
1	1	1
1	1	1

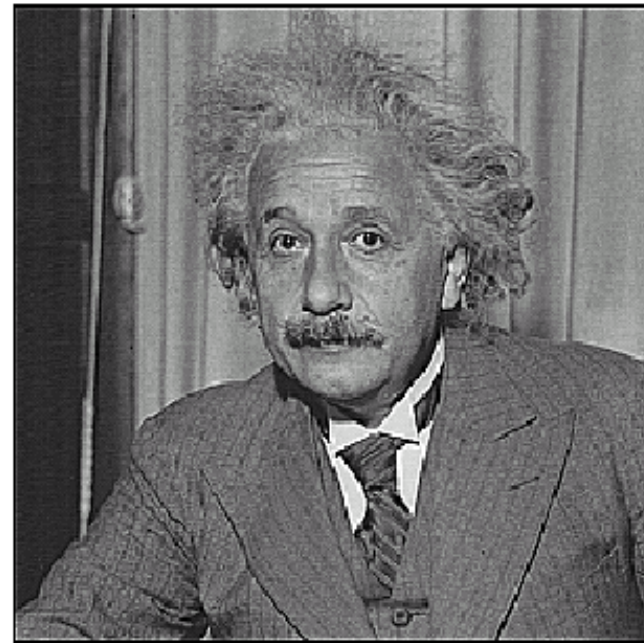


Ostrenje
-Ojači razlike v vrednostih

Ostrenje

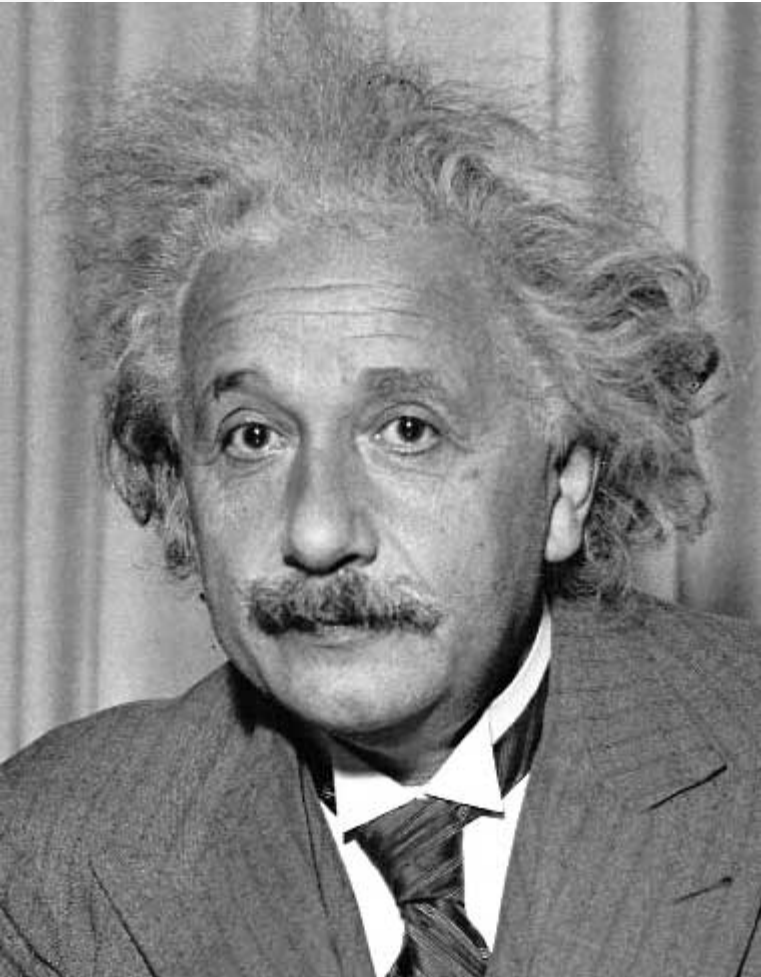


before



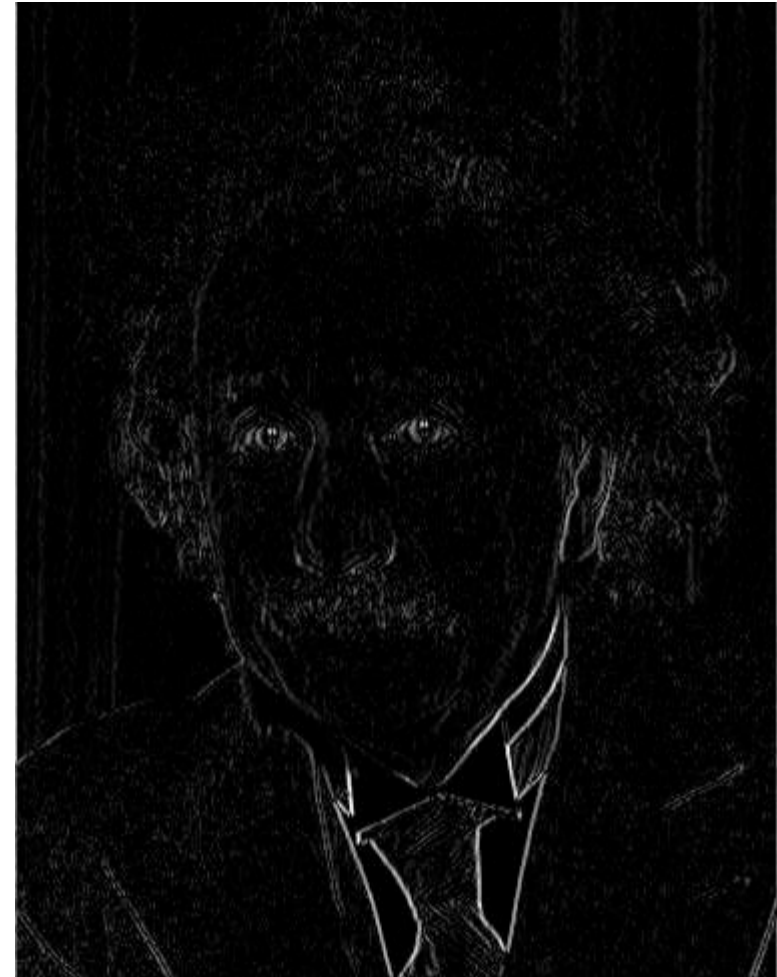
after

Drugi filtri



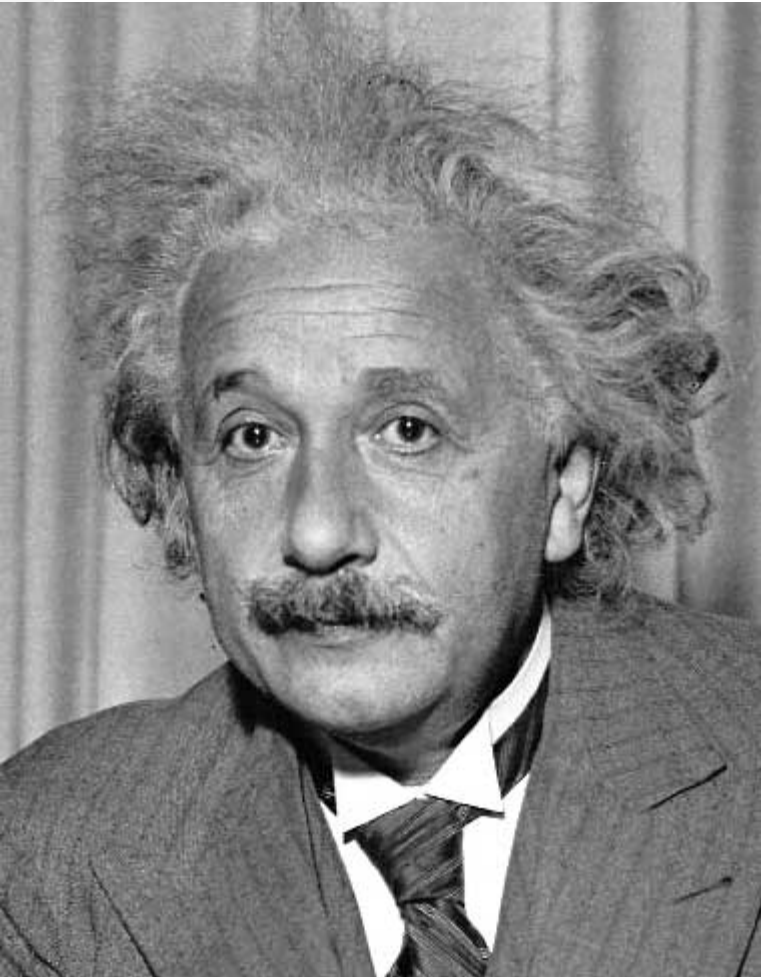
1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

Sobel



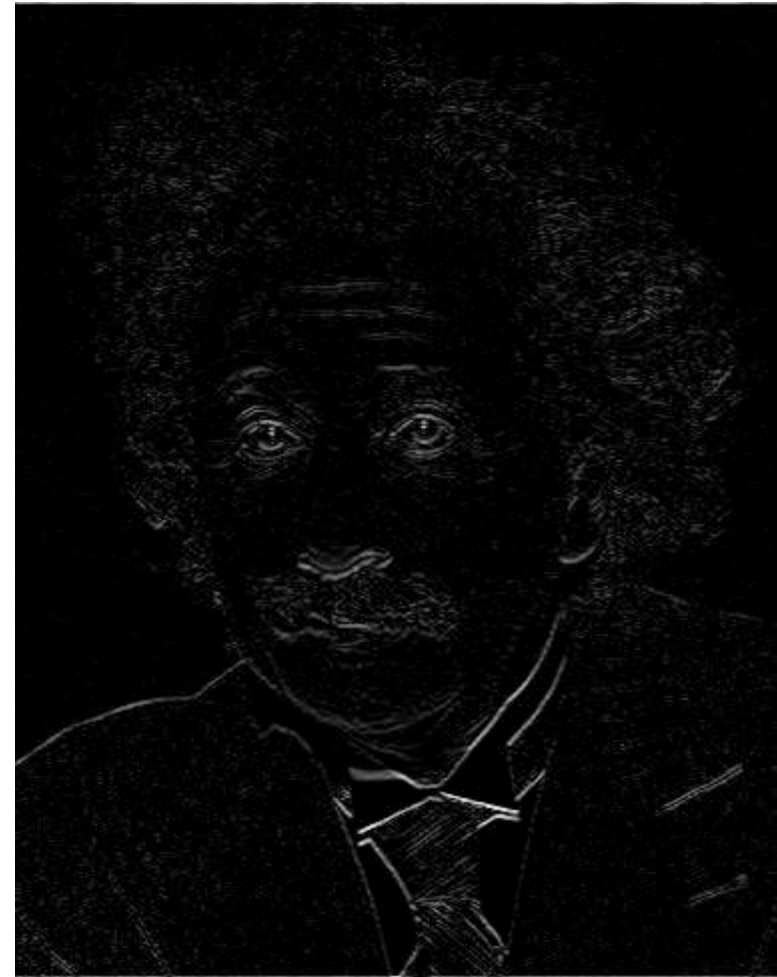
Vertikalni robovi
(absolutna vrednost)

Other filters

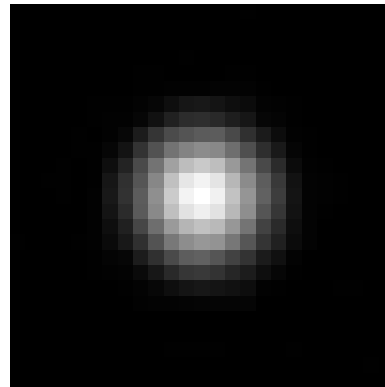
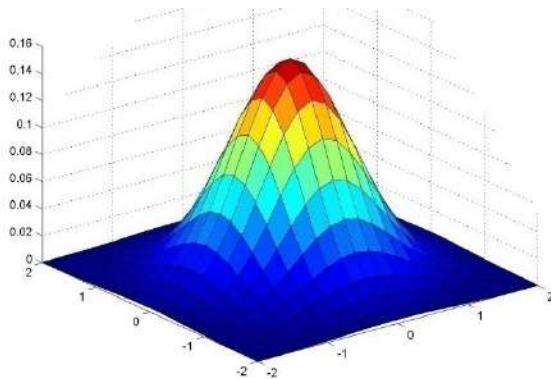


1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

Sobel



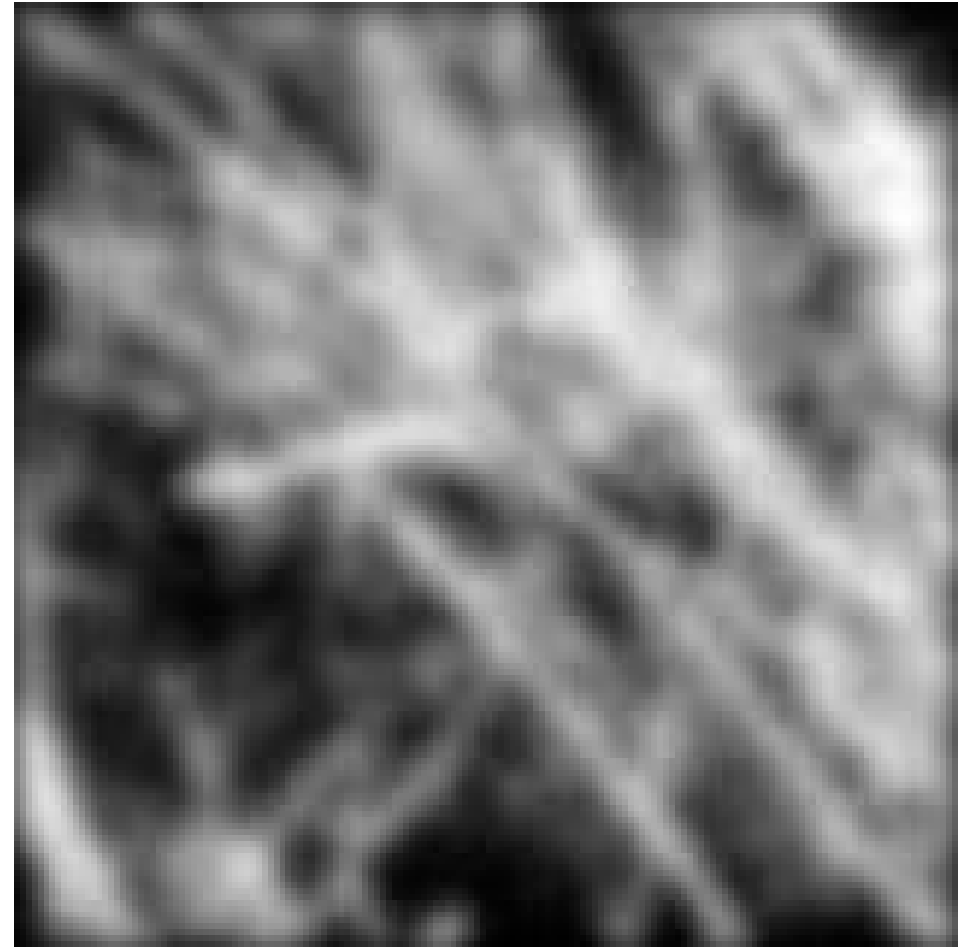
Horizontalni robovi
(absolutna vrednost)

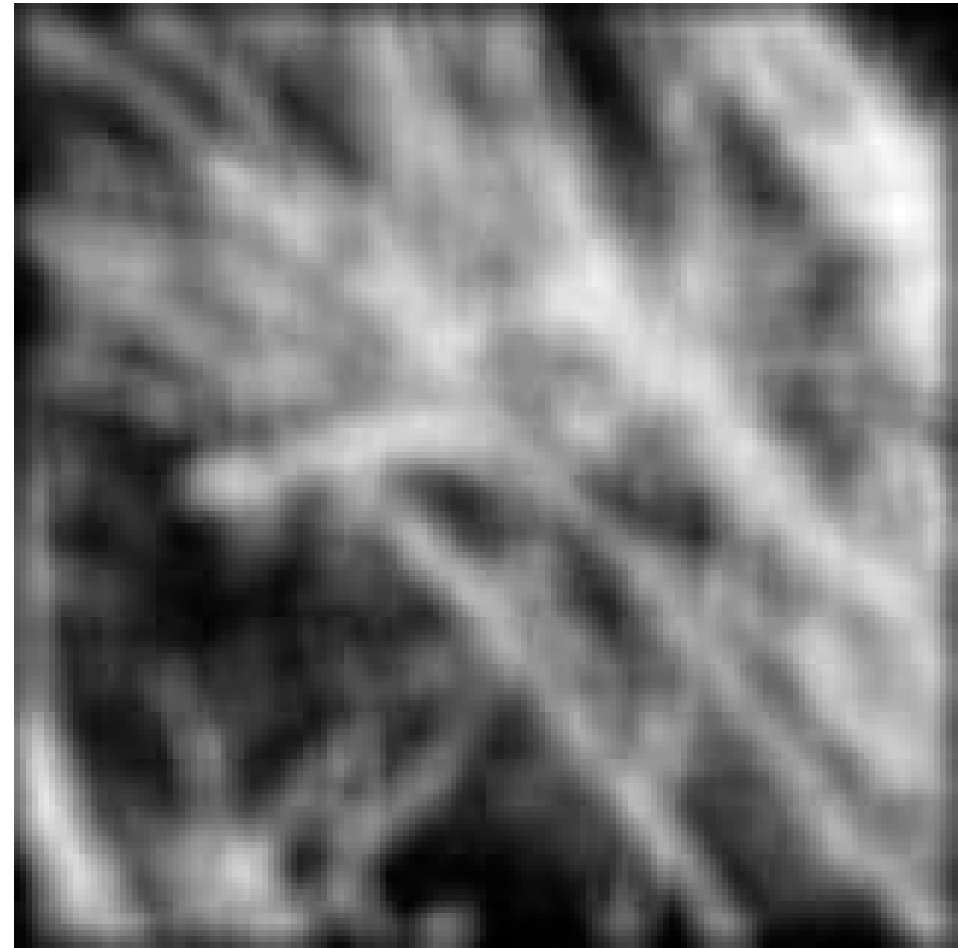


0.003	0.013	0.022	0.013	0.003
0.013	0.059	0.097	0.059	0.013
0.022	0.097	0.159	0.097	0.022
0.013	0.059	0.097	0.059	0.013
0.003	0.013	0.022	0.013	0.003

5 x 5, $\sigma = 1$

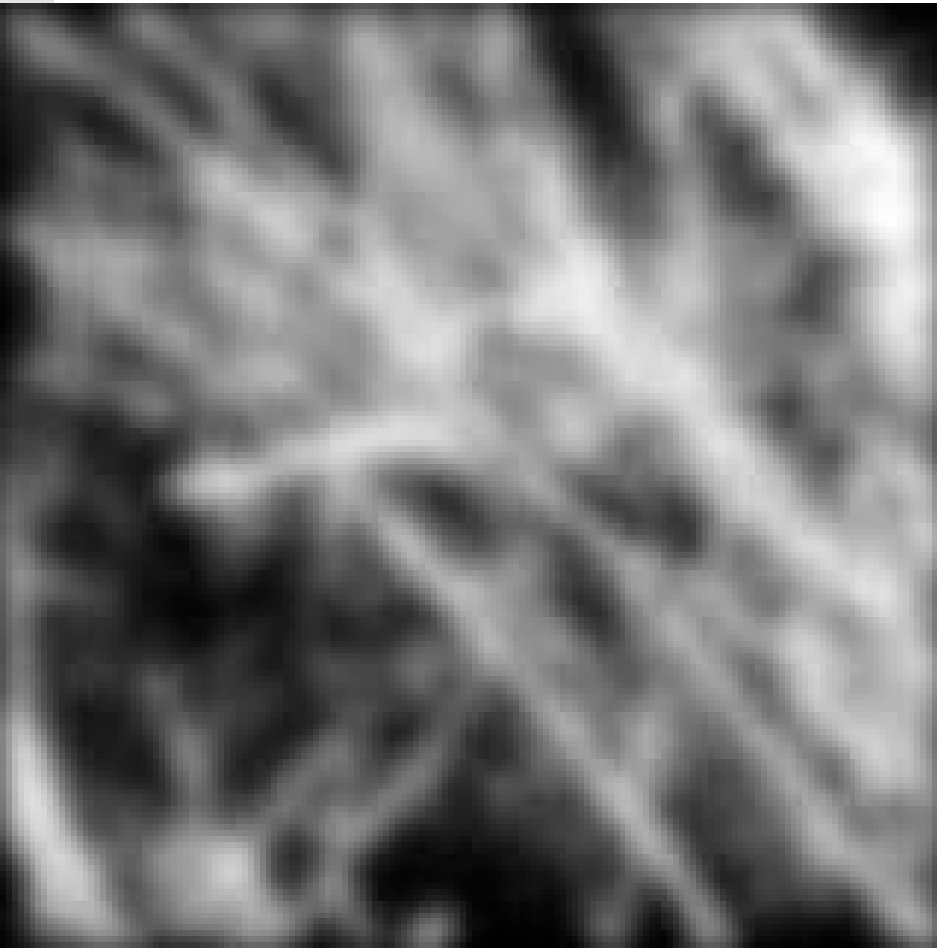
$$G_{\sigma} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$$



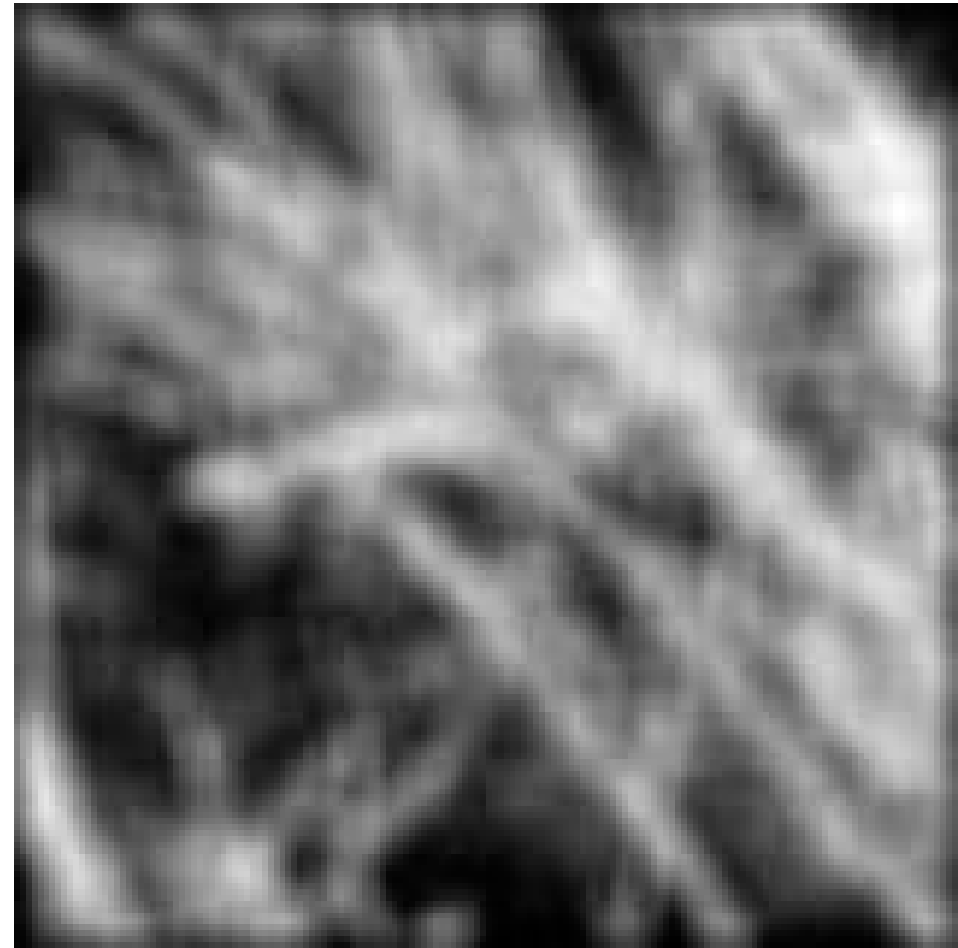


Razlika med obema filtroma?

Gaussov filter



Box filter



- **Nadaljevanje**
 - **Upragovanje**
 - **Binarno procesiranje slik**
 - **Procesiranje sivinskih slik**
 - **Merjenje razdalj**
 - **Iskanje napak**
 - **Iskanje objektov**
 - **Strojno učenje**
 - **Globoko učenje**



Optični vlakenski senzorji za merjenje mehanskih veličin

Denis Donlagić,
UM-FERI, Inštitut za Avtomatiko

Zakaj meriti mehanske veličine s pomočjo optičnih vlaken?

► Popolna dielektrična zgradba

-senzorje je mogoče izdelati in tudi povezati izključno z uporabo dielektričnih materialov (kremenčevega stekla) – senzor je zmeraj galvanjsko ločen od naprave za obdelavo podatkov;

-povezava sensorja in elektronske enote je **varna** s stališča električnih lastnosti: EX okolja, imunost na geo-električne dogodke, energetika (npr. meritve v conah visokih napetosti), imunosti na težave vezane na ozemljitvene potenciale, medicina (naprave v stiku s pacientom).

► Električna pasivnost in EM imunost

OVŠ so neobčutljivi na EM motnje in lahko delujejo v okoljih, ki so močno izpostavljena **EM sevanju**. Senzor je lahko na **veliki razdalji** od procesne enote (mesta, na katerem poteka branje vrednosti).

► Če so ustrezno grajeni lahko preživijo v ekstremnih okoljih:

Visoke temperature, kemijsko agresivna okolja (npr. morska voda, kisline), radiacija, ...

► Majhna masa in dimenzije (standardno vlakno ima premer 125 μm)

- miniaturni senzori

- majhna masa in dimenzije povezovalnih vlaken (1 km standardnega vlakna tehta le 70 g).

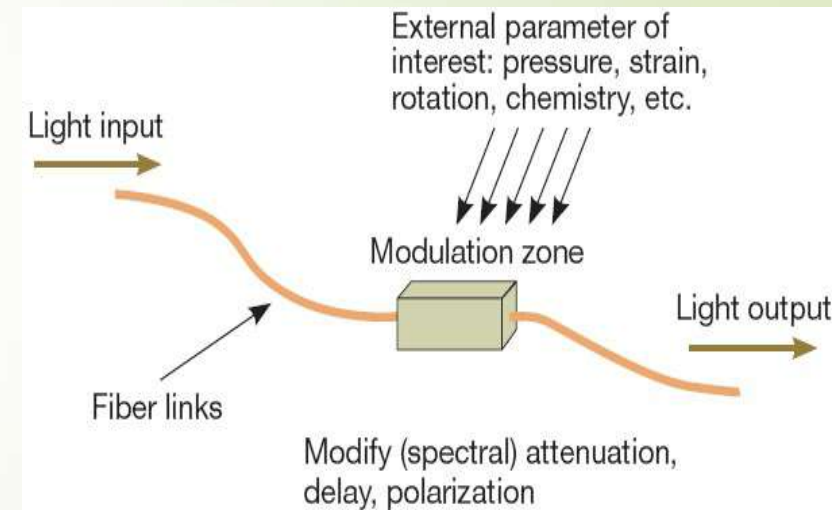
► Cilindrična geometrija

► Možne so posebne konfiguracije, ki niso na voljo v električnih izvedbah (npr. v nadaljevanju)

Meritve s pomočjo svetlobe

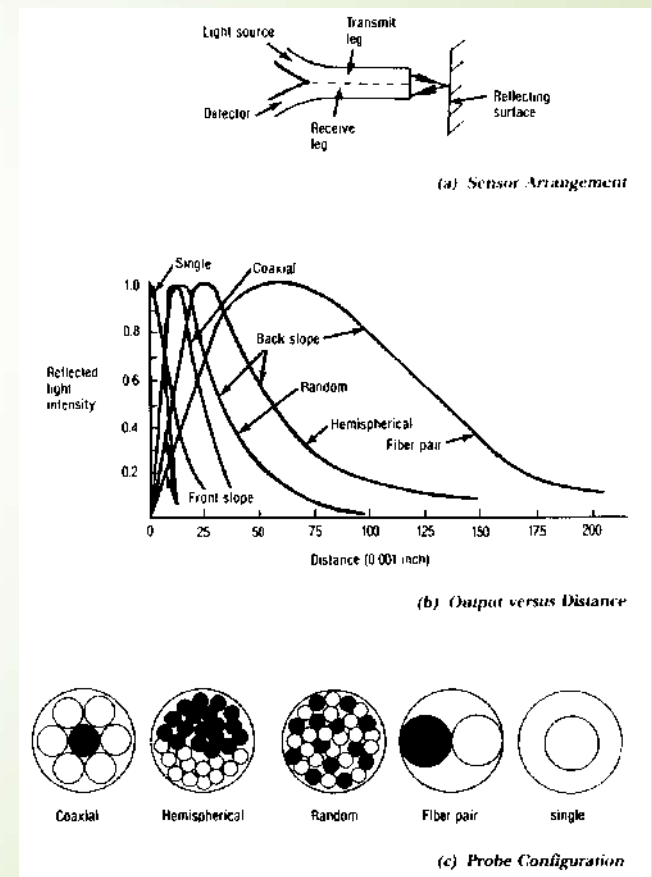
Optični senzorji delujejo tako, da merjena veličina vpliva (večinoma) na enega od parametrov optičnega polja:

- gostoto svetlobnega toka
- **optično pot ali fazo optičnega valovanja**
- **frekvenco valovanja (valovno dolžino)**
- Stanje polarizacije optičnega polja

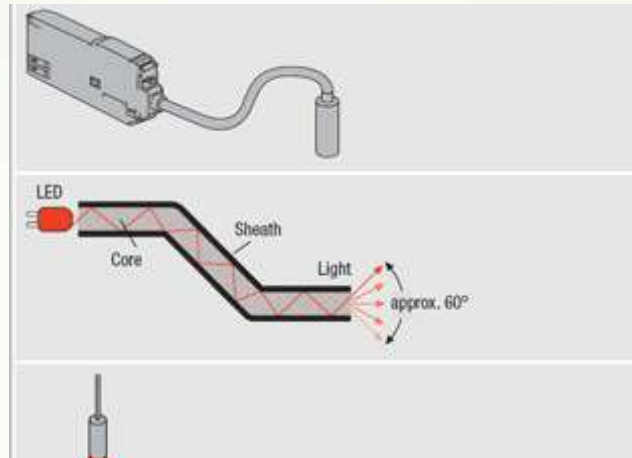


Senzorji razdalje na osnovi modulacije svetlobnega toka:

- Omogočajo preprosto meritev razdalje
- Vlakno je postavljeno pred reflektivno tarčo (ali pa se med dvema valnoma nahaja reža).
- Delež svetlobe, ki se sklopi nazaj v vlakno, je odvisen od razdalje med vrhom vlakna ter tarčo (ali med vema valknoma)
- Možne so različne konstrukcije merilnika
- Neostvna obdelava signalov, nizka cena
- Omejitve: Omejna točnost in ločljivost



Primer: Omron



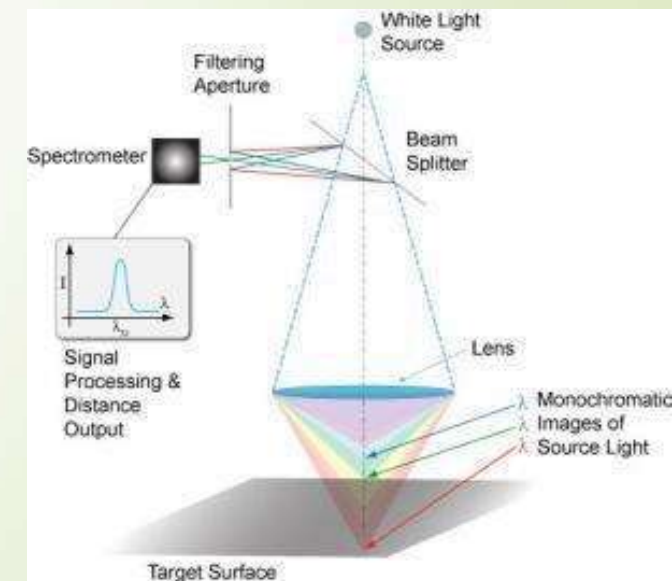
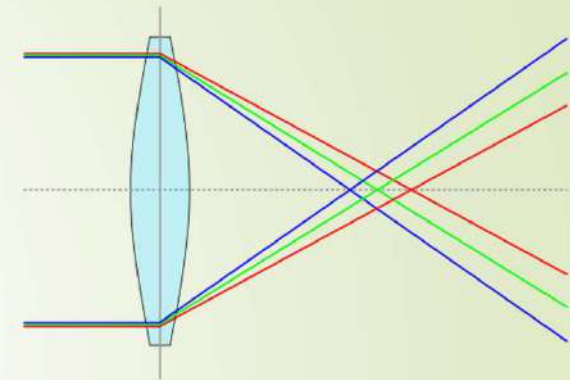
- Merilni doseg: do 3000 mm
- Meritve v odbojnem ali transmisijskem načinu
- Velik izbor konfiguracij
- Velikost tarče je lahko zelo majhna



 15 1.5 dia. IP67	Bend-resistant, R4	 140 40	ST : 60 SHS: 16	 210 60	ST : 90 SHS: 16
 10 1 dia. IP67	Flexible, R1	 450 150	ST : 260 SHS: 60	 670 220	ST : 370 SHS: 60
 35 3 dia. IP67	R1	 750 260	ST : 460 SHS: 100	 1,120 390	ST : 670 SHS: 100

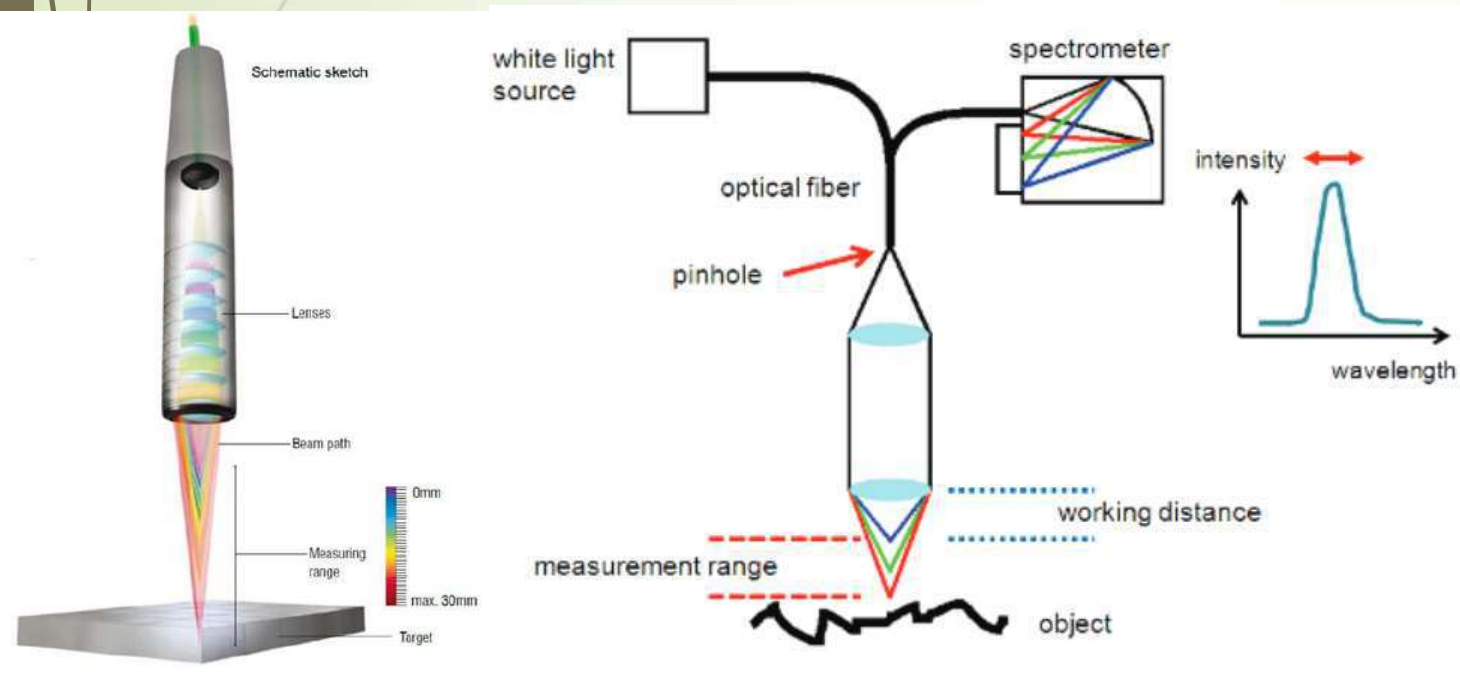
Vlakenski konfokalni merilnik razdalje

- ▶ Na koncu vlakna se nahaja leča ali sistem leč, ki izkazujejo zelo močno kromatsko disperzijo
- ▶ Leča fokusira svetlobo na opazovan objekta, svetloba se od objekta odbije in s pomočjo iste leče usmeri nazaj v vlakno.
- ▶ Ta proces je najmanj izguben, ko se nahaja merjen objekt v fokusu leče.
- ▶ Gorišče takšne leče je močno odvisno od valovne dolžine
- ▶ Kot vir uporabljamo širokospektralni vir (termični vir, LED)



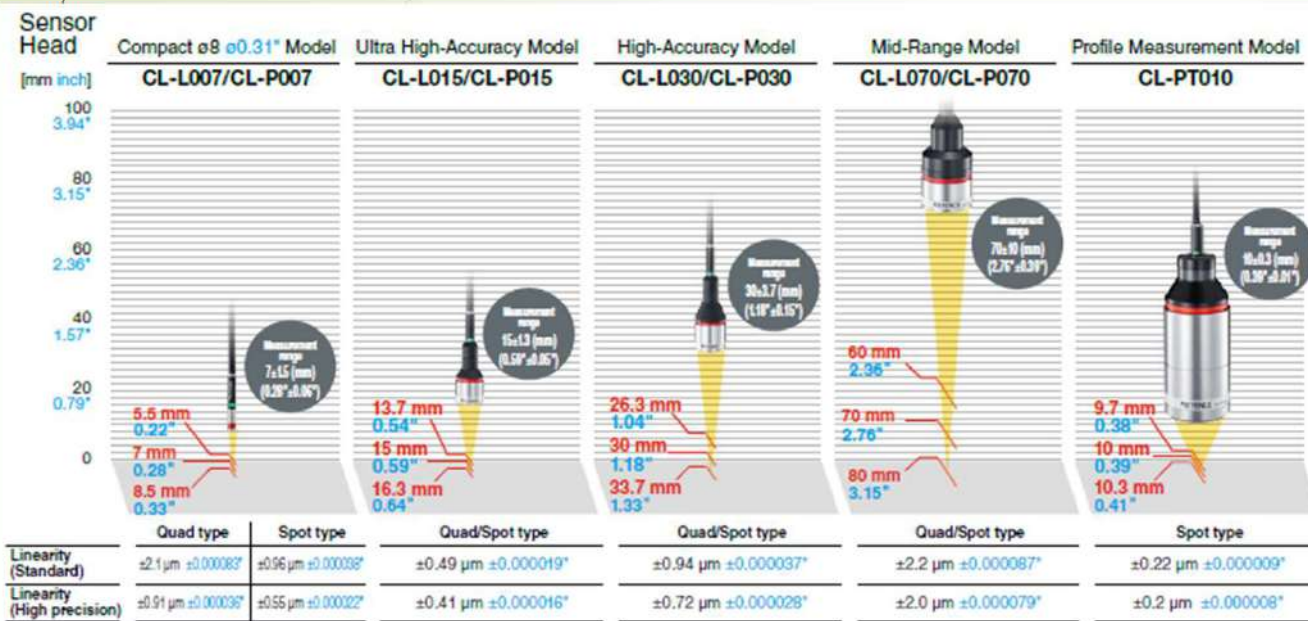
Kromatski konfokalni merilnik razdalje

- ▶ Kadar se nahaja opazovan objekt pod lečo, bo v fokusu samo ena valovna dolžina, ta se tudi učinkovito odbije in fokusira skozi zaslonko na vlakno.
- ▶ Spektralnim analizatorjem (ali merilnikom valovne dolžine) izmerimo valovno dolžino odbite svetlobe, ki je odvisna od razdalje med lečo in objektom.



Primer: Keyence, $\mu\epsilon$, Omron,...

Primer: Keyence



Model ¹⁾	Head	CL-L007	CL-L015	CL-L030	CL-L070
	Optical unit	CL-L007N	CL-L015N	CL-L030N	CL-L070N
Reference distance		7 mm 0.28"	15 mm 0.59"	30 mm 1.18"	70 mm 2.76"
Reference measurement range	Measurement range	±1.5 mm ±0.06"	±1.3 mm ±0.05"	±3.7 mm ±0.15"	±10 mm ±0.39"
	Linearity ²⁾	±2.1 μm ±0.000083"	±0.49 μm ±0.000019"	±0.94 μm ±0.000037"	±2.2 μm ±0.000087"
High precision measurement range	Measurement range	±0.5 mm ±0.02"	±0.5 mm ±0.02"	±1.0 mm ±0.04"	±3.0 mm ±0.12"
	Linearity ²⁾	±0.91 μm ±0.000036"	±0.41 μm ±0.000016"	±0.72 μm ±0.000028"	±2.0 μm ±0.000079"
Resolution ³⁾		0.25 μm 0.000010"	0.25 μm 0.000010"	0.25 μm 0.000010"	0.25 μm 0.000010"
Spot diameter		ø750 μm ø0.0295"	ø300 μm ø0.0118"	ø500 μm ø0.0197"	ø600 μm ø0.0236"

Primer: $\mu\epsilon$

- Miniature sensors ø4mm with axial or radial (90°) measuring direction
- Submicrometer resolution
- Distance measurement
- Extremely small spot size

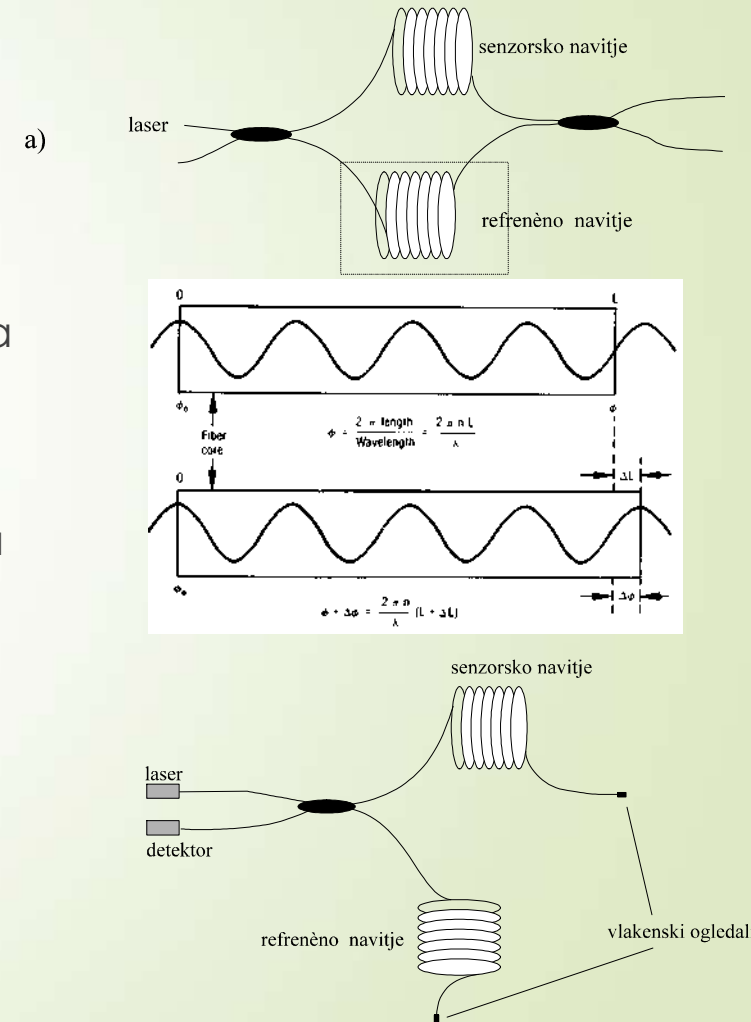


MR = measuring range
SMR = start of measuring range
Dimensions in mm, not to scale

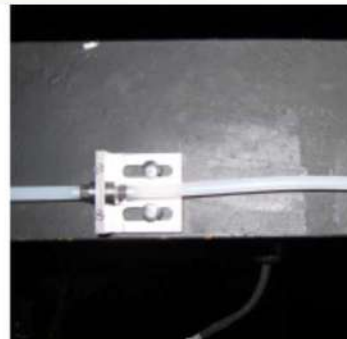
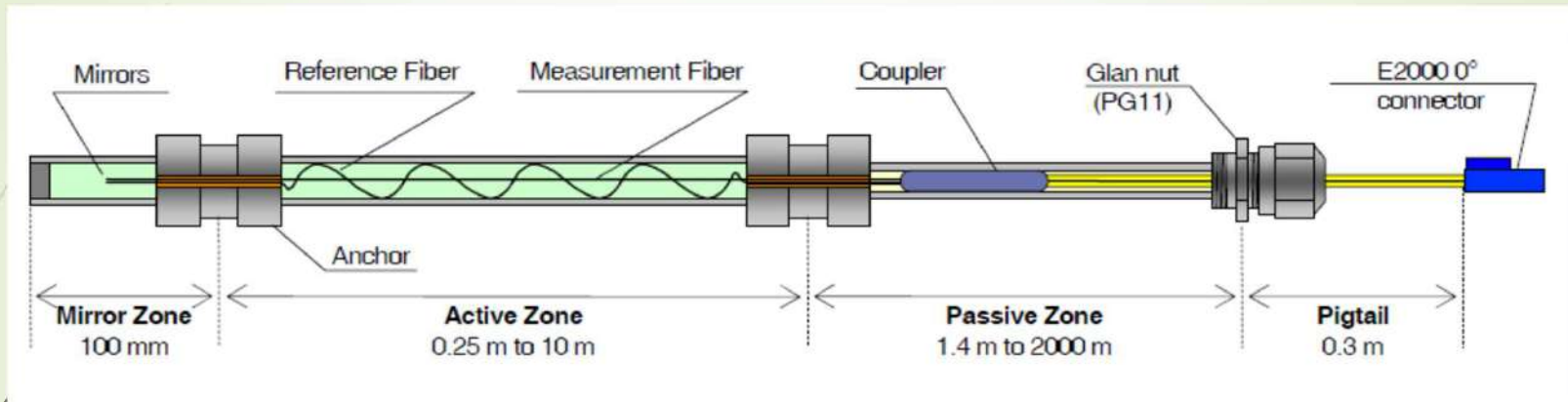
Model	IFS2402-0,4	IFS2402-1,5	IFS2402-4
Measuring range	0.4 mm	1.5 mm	3.5 mm
Start of measuring range	1.5 mm	0.9 mm	1.9 mm
Resolution	static ¹⁾	16 nm	60 nm
	dynamic ²⁾	48 nm	192 nm
Linearity ³⁾	Displacement and distance	< ±1.2 μm	< ±3 μm
Light spot diameter	10 μm	20 μm	20 μm

Merilniki razdalje: interferometri

- Z interferometrom merimo spremembo optične poti.
- Interferometrija temelji na principu superpozicije (seštevanja) valovanj
- V najbolj preprostem primeru sestavlja interferometer koherentni vir, žarkovna delilnika, in fotodetektor(ja)
- Žarkovni delilnik razdeli valovanje tako, da razdeljena vala potujeta po ločenih poteh
- **Optični poti obeh razdeljenih valov sta lahko različni in se lahko spreminjata pod vplivom merjene veličine**
- Običajno je ena izmed poti stalna (referenčna), druga pa je izpostavljena merjeni veličini (merilna).
- Vala nato ponovno združimo in pripeljemo na detektor
- Ko vala združimo, se električne poljske jakosti obeh valov seštejejo. Seštevek je odvisen od fazne razlike med valoma oziroma od razlike optične poti.



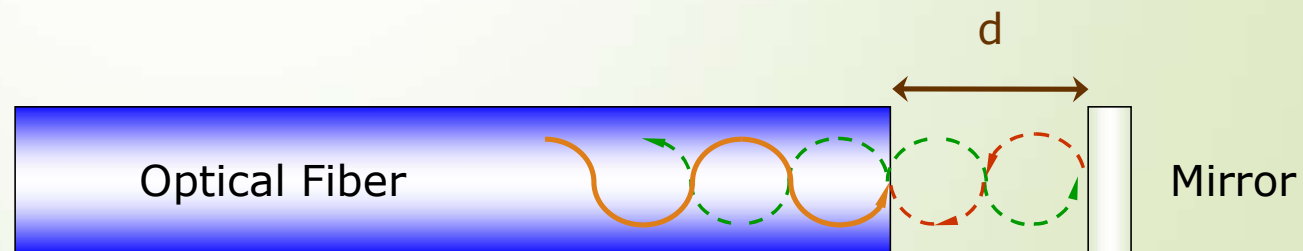
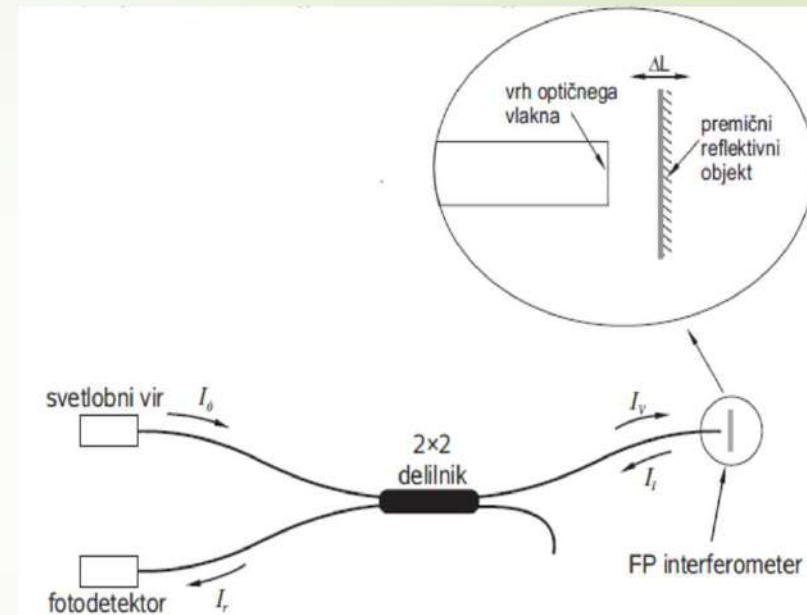
Primer uporabe Michelsonovega interferometra: SOFO senzor



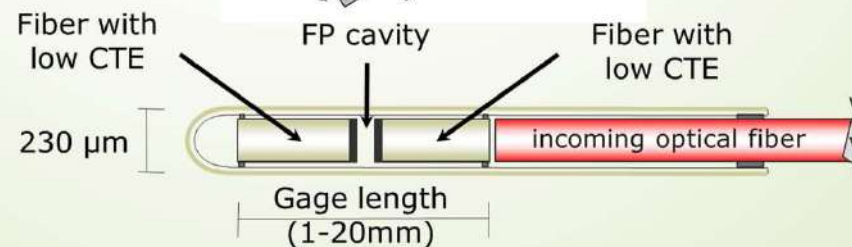
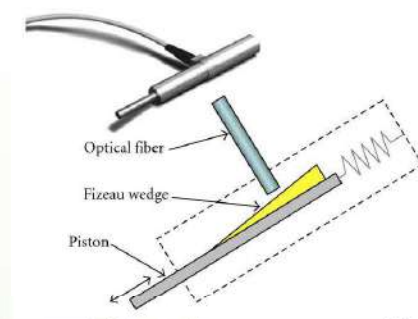
- Senzor za merjenje raztezkov v gradbenih konstrukcijah
- Aktivna dolžina med 0.25 in 10 m

Fabry-Perotov interferometer

- Relativno preprosta konfiguracija
- Vsaj eno izmed polprepustnih zrcal/površin je pogosto pravokotno odrezan konec optičnega vlakna
- Na vrh vlakna je možno, vendar pogosto nepraktično nanašati kvalitetne optične plasti, s katerimi bi povečali odbojnost.
- Tako se seštejeta vala, ki sta se odbila od tarče in konca vlakna. **Sprememba razdalje med koncem vlakna in tarčo je torej tista, ki jo merimo.**
- Vlakenski FP interferometri pogosto temeljijo na naravnem odboju na prehodu steklo-zrak, ki znaša okrog 3.6%.
- Finesa praktičnih vlakenskih FP interferometrov je zato običajno zelo nizka.



Fabry-Perotovi interferometri, primeri: Attocube, FISO Technologies,...



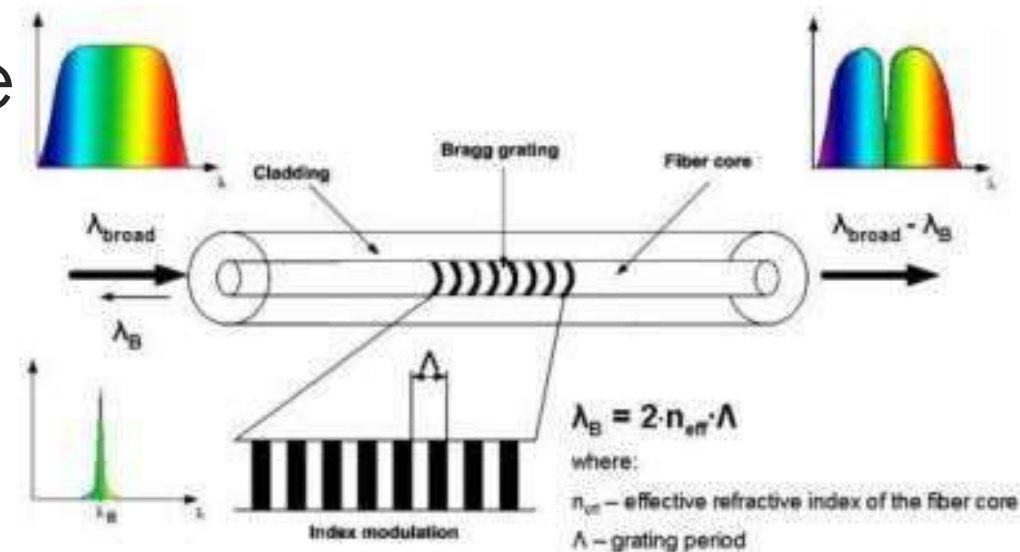
- ▶ Nanometerska ločljivost (dosegljiva je tudi sub nanometerska ločljivost)
- ▶ Možne so različne konfiguracije
- ▶ Meritve razdalj ali meritve raztezkov
- ▶ Zlasti primerni za meritve majhnih rež.

Braggove rešetke

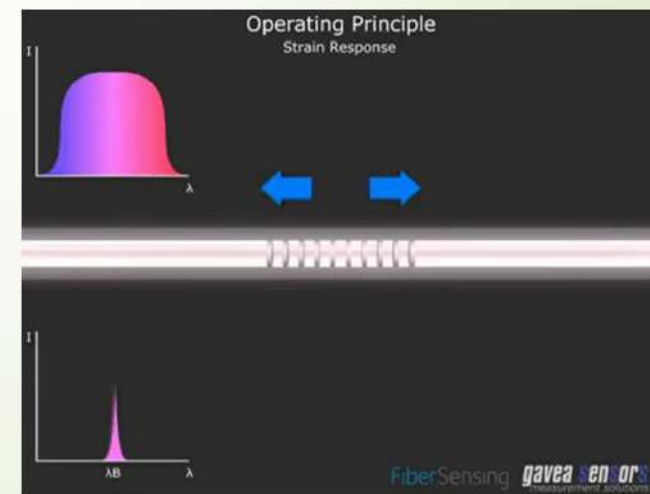
- Z Braggovo rešetko merimo raztezke. Slednji so osnova oz. gradnjo senzorjev mehanskih veličin, kot so sile, navori, deformacije, upogibi, premiki, tlaki, itd.
- Vlakensko Braggovo rešetko sestavlja niz polprepustnih zrcal, ki se nahajajo na enakih medsebojnih razdaljah Λ .
- Braggova struktura je odbojna za valovanje z valovno dolžino, ki ustreza Braggovemu pogoju (valovna dolžina mora biti celoštevilski večkratnik dvakratnika razdalje med zrcali):

$$m\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$$

- Za ostale valovne dolžine je Braggova struktura prepustna
- Braggova rešetka je tudi optični filter, dobiva valovna dolžina, pa je sorazmerna z raztezko rešetke

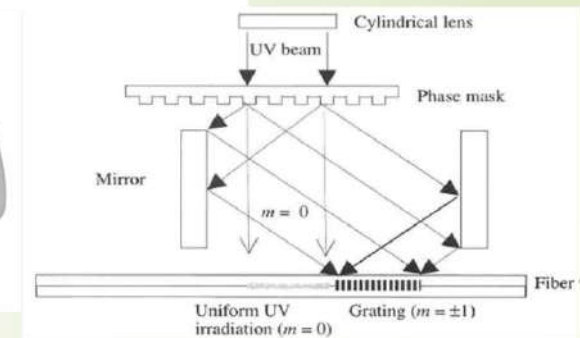
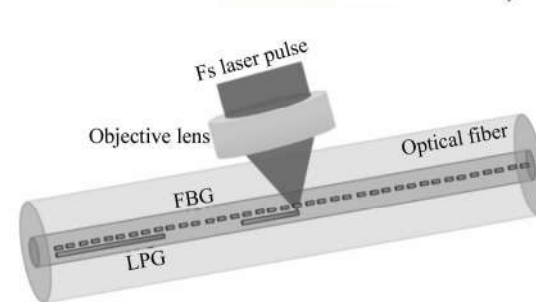
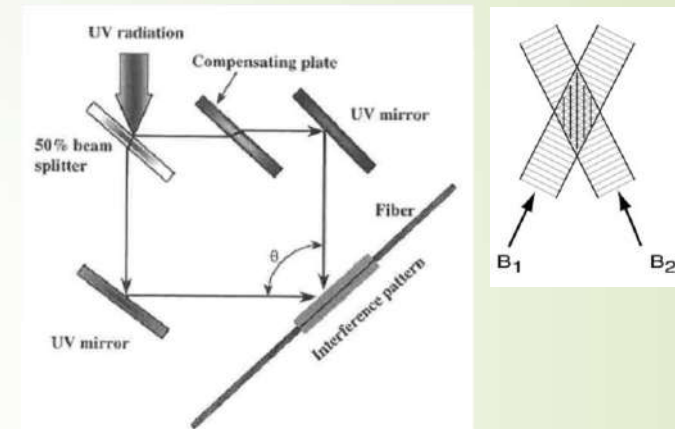


© Pawel Gasior's Web Site



Izdelava Braggovih rešetk

- ▶ Rešetka se "vpiše" neposredno v telekomunikacijsko ali podobno vlakno
- ▶ Obstajata dva načina:
 - ▶ osvetlitve z UV svetlobo (periodičen vzorec) z uporabo UV laserja in interferometra ali fazne maske
 - ▶ Neposredno s femtosekundnim laserjem (zrcalo za zrcalom)
- ▶ Investicija v tehnologijo za vpis rešetk je sorazmerno enostavno dostopna



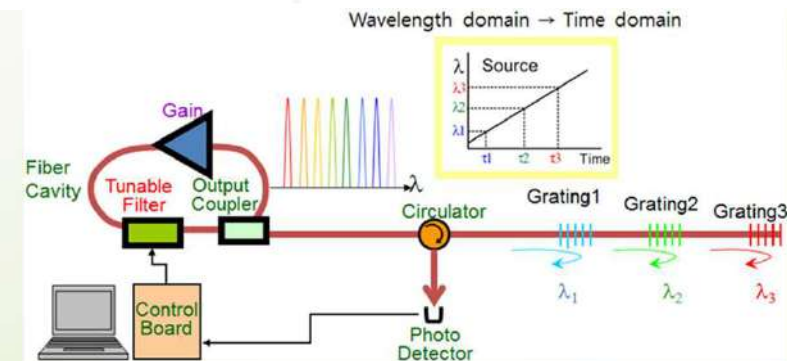
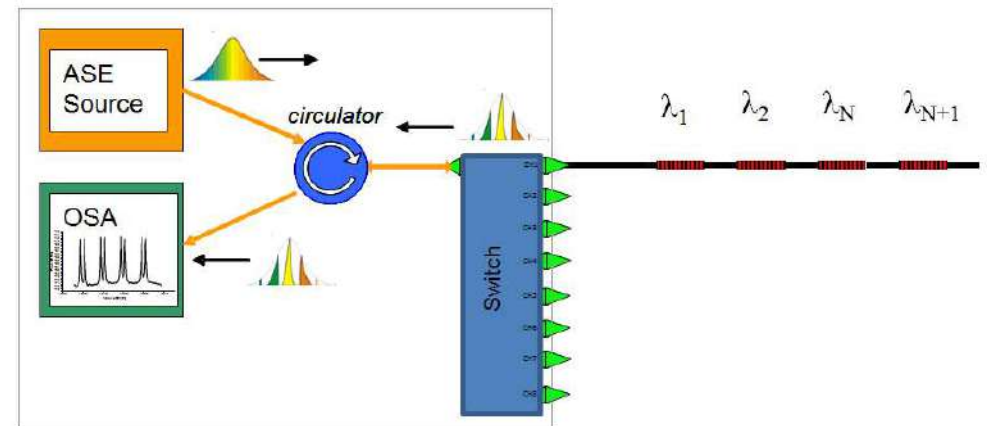
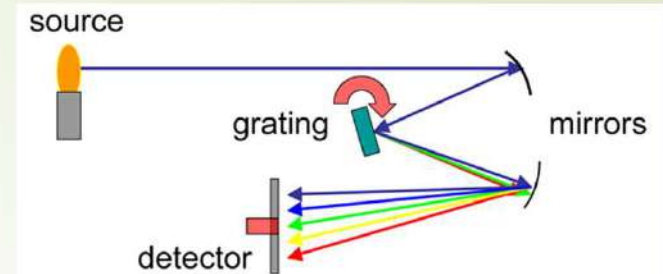
Izdelava Braggovih rešetk in pakiranje

- Rešetke imajo značilno dolžino med 5 in 15 mm
- Spekter dobro izdelanih rešetk je zelo ozek, tipično 0.2-0.4 nm.
- Občutljivost rešetke na raztezek je odvisna od valovne dolžine in **znaša tipično 1.1 pm/με**
- Tipična sprememba valovne dolžine bo tako nekaj več kot **1 nm pri 1000 με**, kar zahtev **spektralni analizator z zelo visoko ločljivostjo**
- Rešetka je občutljiva tudi na temperature, caa 10 pm/C (podobno kakor pri merilnih lističih, je potrebno zagotoviti temperaturno kompenzacijo).
- Rešetke so na voljo v prefabricirani obliki (desno, Micron Optics)
- Sicer jih lepimo direktno na merjenec



Branje Braggovih rešetk

- ▶ Zahteva visoko-ločljivo in stabilno spektralno analizo
 - ▶ Spektralni analizatorji z uklonsko rešetko
 - ▶ Laserji z nastavljivo valovno dolžino (polprevodniški, vlakenski)
- ▶ Razvoj laserjev z nastavljivo valovno dolžino je hiter in prispeva k zniževanju cen.
- ▶ Cene sistemov se še vedno gibljejo med 5000 in 25000 €.

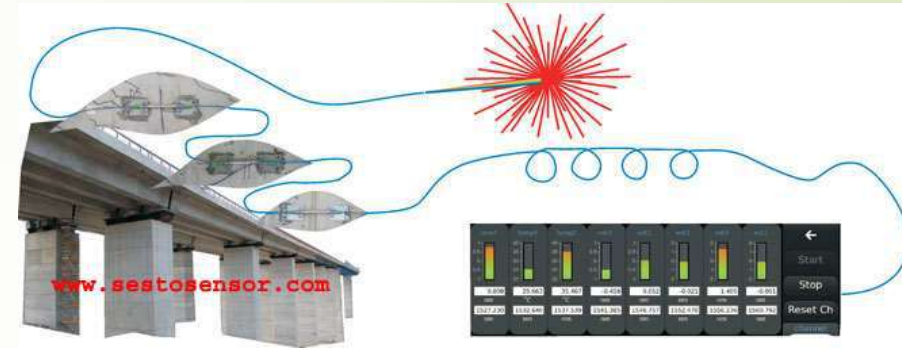
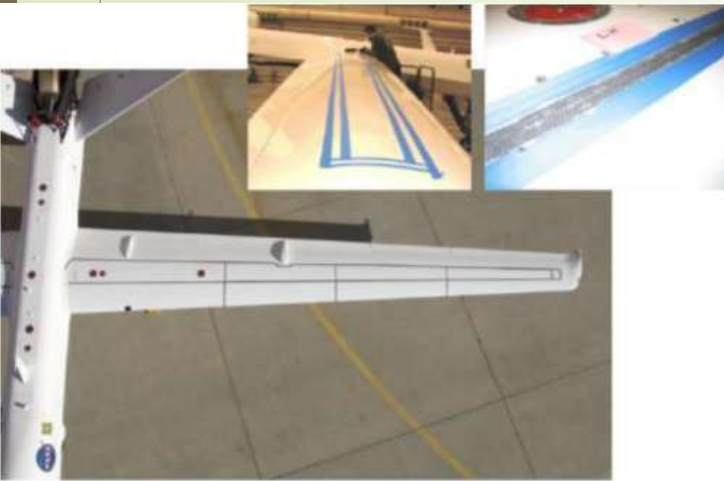


Multipleksiranje Braggovih rešetk

- Vz dolž enega vlakna je mogoče namestiti serijo rešetk z različnimi ali celo enakimi karakterističnimi valovnimi dolžinami.
- Naslavljanje posameznih senzorjev lahko poteka na različne načine, npr.:
 - Časovno (sistem za branje generira kratek pulz, posamezni senzorji del energije pulza odbijejo, kjer jih na detektorju časovno razločimo)
 - Spektralno (sistem za branje tvori svetlobo s širokim spektrom, posamezni senzorji odbijejo ozek del spektra - posamezni deli spektra pripadajo posameznim senzorjem)
 - Kombinacij obeh
- Braggove rešetke imajo zelo majhne transmissijske izgube, zato jih je mogoče nizati v omrežje s 100 in več rešetkami.



Aplikacije Braggovih rešetk



newLight FS61

NEW

d FBG



Displacement sensors that use two Fiber Bragg Gratings (FBG) for temperature compensated linear position measurements.

newLight FS62

ϵ FBG



Fiber Bragg Grating (FBG) based sensors for stable and accurate strain measurements.

newLight FS63

$^{\circ}C$ FBG



Fiber Bragg Grating (FBG) based temperature sensors. Accurate and clean temperature measurements for thermal mapping or temperature compensation.

newLight FS64

θ FBG



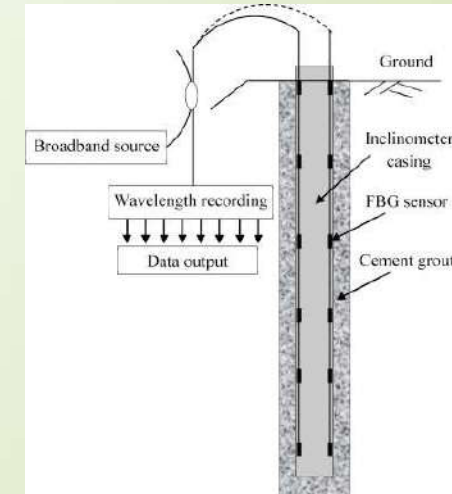
Sensor to measure small inclination variations. It uses two Fiber Bragg Gratings (FBG) in a push-pull configuration for effective temperature compensation.

newLight FS65

g FBG



Fiber Bragg Grating (FBG) based accelerometer for vibration measurements under low frequencies.





Braggove rešetke: povzetek

Prednosti Braggovih rešetk:

- Zelo dobro razvita, zanesljiva in razširjena tehnologija
- Možnost merjenja raztezkov v širokem področju ($1 \mu\epsilon$ do $10000 \mu\epsilon$)
- Na voljo je mnogo proizvajalcev in različnih izvedb
- Možnost multipleksiranja (možna je kvazi-porazdeljena konfiguracija)
- Braggove rešetke so osnova za izdelavo vrste senzorjev; omogočajo fleksibilno konstruiranje namenskih/lastnih rešitev na področju merjenja mehanskih veličin.

Slabosti:

- Potreba po spektralnem analizatorju z visoko ločljivostjo – sorazmerno dragi sistemi (zahteva se ločljivost reda pm)
- Temperaturna občutljivost (potreba po kompenzaciji)

Sistemi za porazdeljeno merjenje raztezkov (Brillouinov sistem)

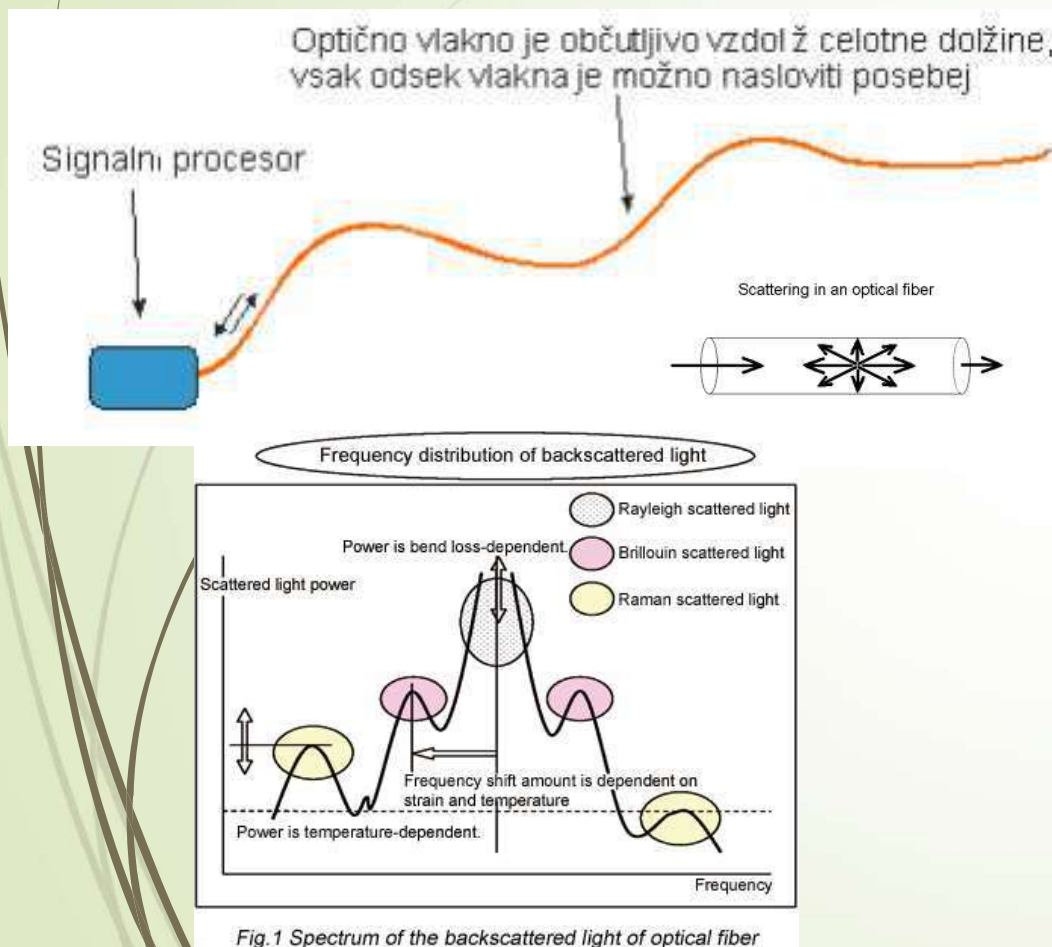
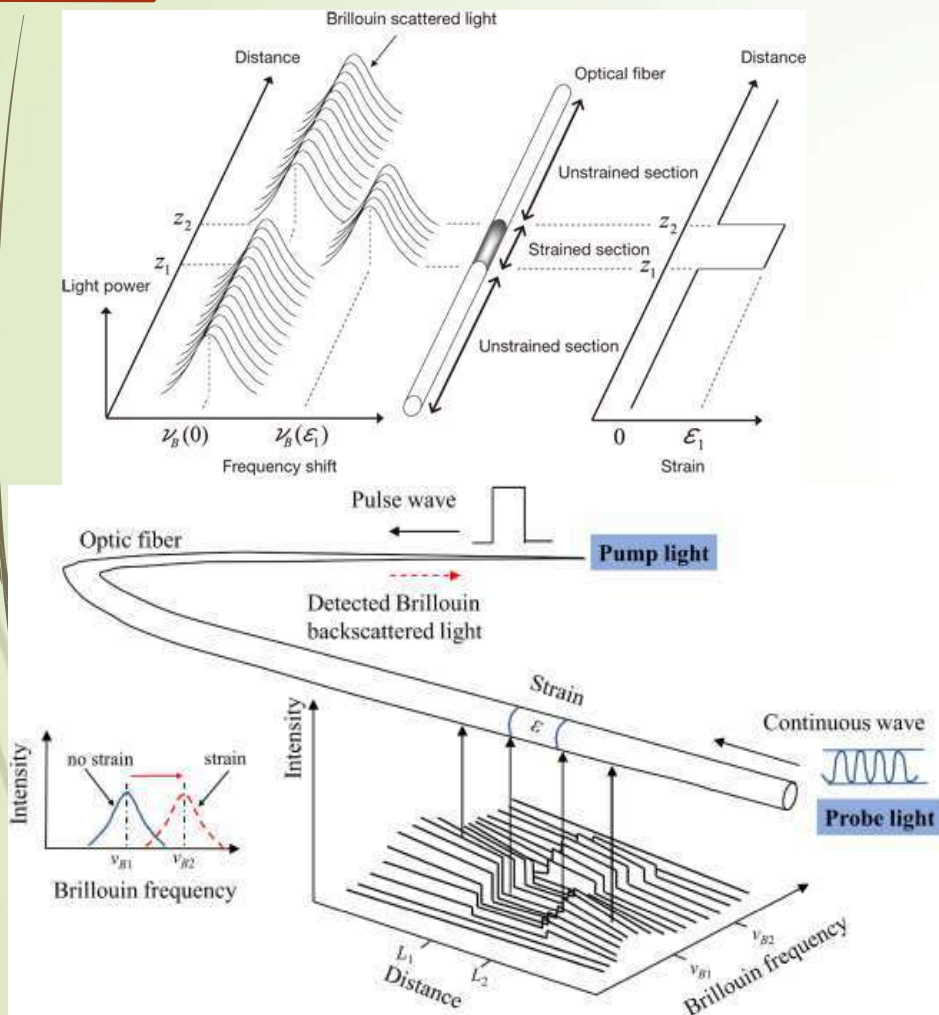


Fig.1 Spectrum of the backscattered light of optical fiber

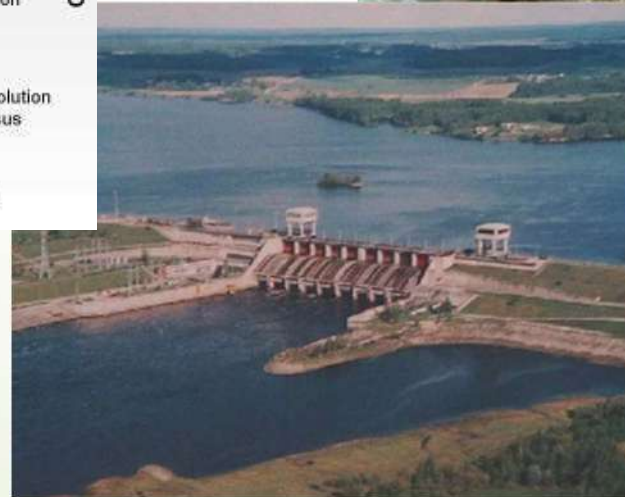
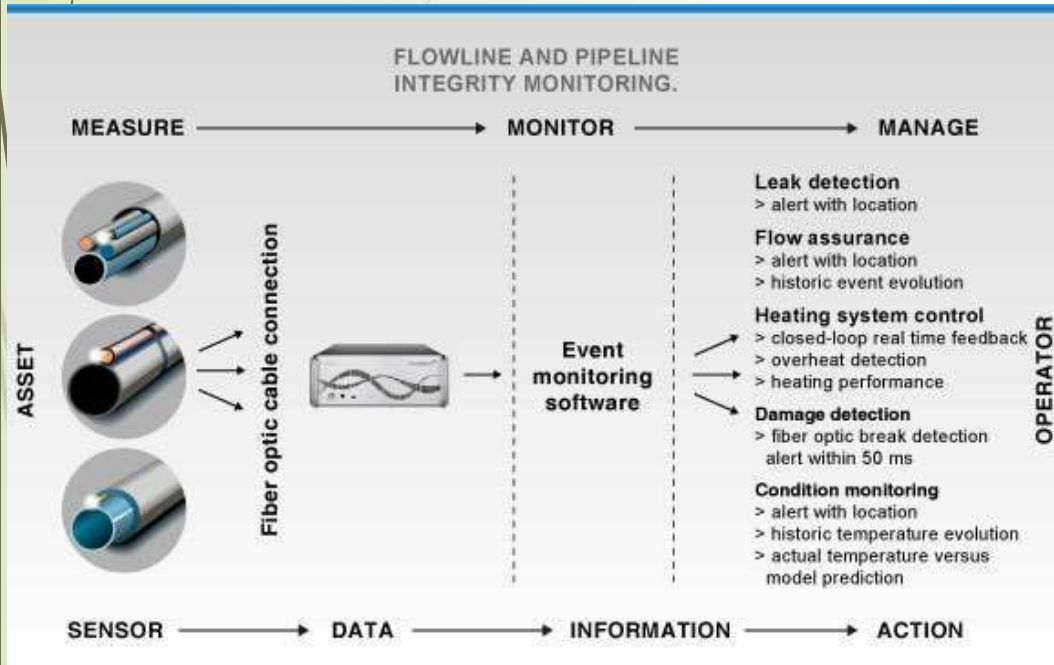
- Celotno dolžino vlakna je možno uporabiti kot senzor raztezka
- Raztezek (in temperature) je možno opredeliti za katerikoli segment vlakna
- Delovanje:
- Kadar vpade na snov optičen val velik amplitude, povzroči nastanek zgoščine, ki se širi po vlaknu z zvočno hitrostjo.
- Nastanek zgoščine je posledica elektro-strikcijskega elektro-strikcijskega pojava
- Zgoščina ima drugačen lomni količnik kot okoliška snov, zato zgoščina deluje kot šibko-odbojno zrcalo, ki odbija/sipa del vpadnega valovanja.
- V valovanju, ki se širi v smeri nazaj je zato prisotna svetloba, ki ima drugačno frekvenco/valovno dolžino od prvotne frekvence/valovne dolžine laserja
- **Zamik frekvence optičnega valovanja, ki se širi v smeri nazaj je zato sorazmeren z lokalno hitrostjo zvoka v vlaknu!**

Sistemi za porazdeljeno merjenje raztezkov



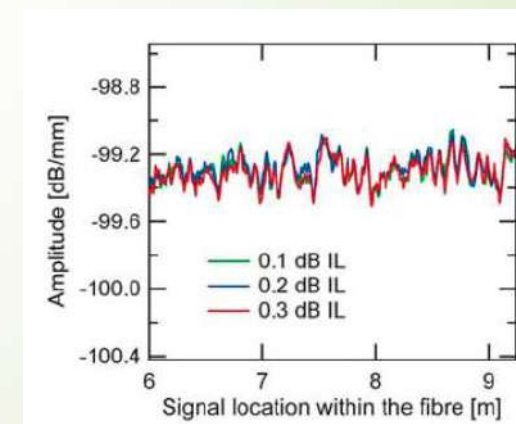
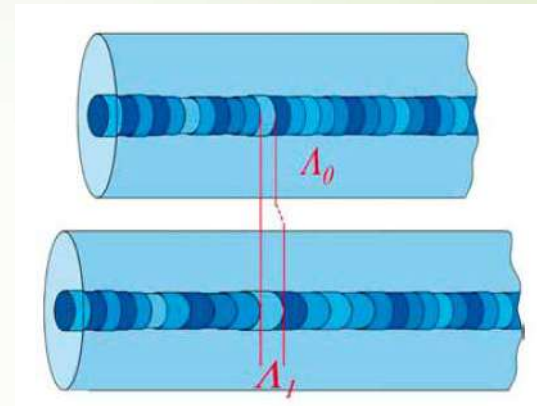
- Ker se nastala zgoščina širi z zvočno hitrostjo, je frekvenca odbitega valovanja zamaknjena zaradi Dopplerjevega pojava. Premik je majhen a dobor merljiv.
- Frekvenčni premik je odvisen od parametrov, ki vplivajo na hitrost zvoka v steklu in sicer od:
 - temperature in
 - mehanske napetosti
- Z merjenjem Brillouinovega frekvenčnega premika lahko zato izvajamo meritev temperature in raztezkov.
- Sprememba frekvenca Brillouinovega sipanja zaradi mehanske napetosti je majhna in znaša tipično 500 MHz/% v silicijevem vlaknu
- Frekvenčni premik merimo običajno po interferenčnih metodah
- Domet čez 30 km in ločljivost >1 m (v ekstremnih primerih tudi 10 cm)

Primer: nadzor naftovodov, plinovodov, gradbnih konstrukcij (Omnisens, DiTest)



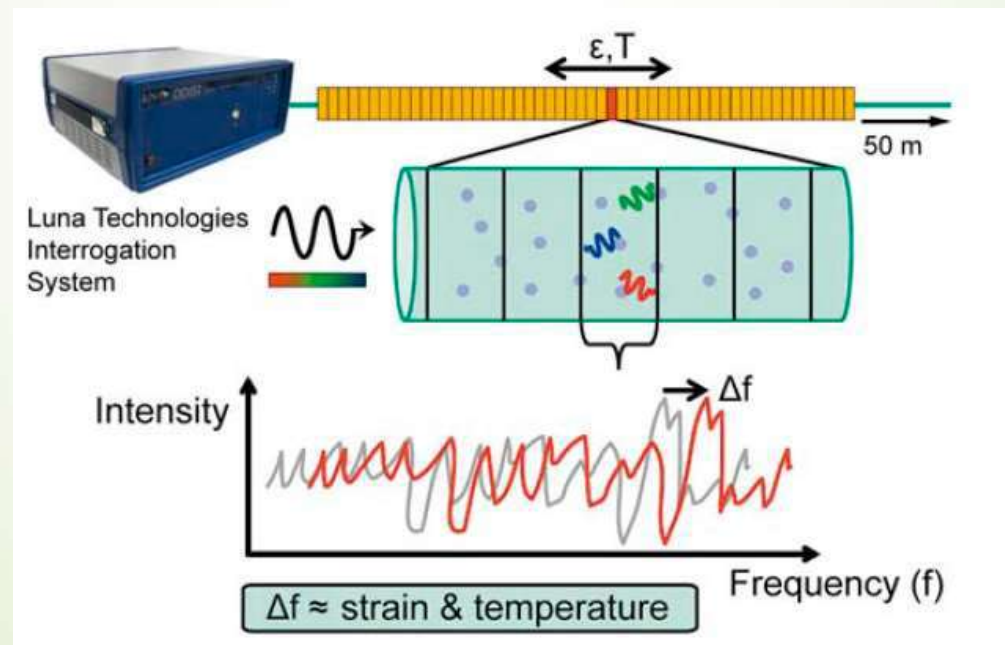
Optical frequency domain reflectometer Rayleigh scattering systems

- ▶ Rayleighjevo sipanje se malenkostno spreminja vzdolž vlakna zaradi naključnih fluktuacij v lomnem količniku vlakna
- ▶ Ta nihanja je možno opazovati s pomočjo OFDR.
- ▶ Slika na desni kaže tak primer nihanja v sipanju, ki je stabilno s časom in spremembo izgub v sistemu



Optical frequency domain reflectometer Rayleigh scattering systems

- ▶ Prostorska ločljivost OFDR sistema je lahko zelo visoka (10 μm)
- ▶ Z opazovanjem, beleženjem in avto-korelacijo povratno sipanih vzorcev je možno določiti spremembe v raztezkih vlakna in temperaturi





Optični vlakenski senzorji

- ▶ Tehnologija, ki postaja stroškovno učinkovita in prihaja v industrijsko uporabo
- ▶ Omogoča vrsto posebnih lastnosti, ki niso na voljo s klasičnimi električnimi senzorji (EM in geo-električna imunost, povezljivost na velike razdalje, možnost multipleksiranja, zelo majhne dimenzije, obratovanje po nenavadnimi ali ekstremnimi pogoji)
- ▶ Problem, ki ostaja je optimiranje razmerja med zmogljivostjo in ceno, vendar je tukaj pristen pomemben napredek, tudi po zaslugi razvoj drugih tehnologij (zlasti telekomunikacij, laserjev in uvajanje opto-elektronski sistemov v široko rabo – pametni telefoni, razsvetljava, ipd)
- ▶ Tehnologija ponuja mnoge priložnost, tako v inovativnem reševanju merilnih problemov, kakor tudi v izvedbi novih senzorjev

Keramični senzorji tlaka: od materialov do senzorja

**Darko Belavič, Kostja Makarovič, Mitja Jerlah,
Matej Šadl, Andraž Bradeško, Barbara Malič**

Jožef Stefan Institute, SI-1000 Ljubljana

CO NAMASTE, SI-1000 Ljubljana

KEKO Oprema, SI-8360 Žužemberk

Vsebina

- Uvod v keramične senzorje tlaka (D. Belavič)
- Materiali in tehnologija (K. Makarovič)
- Primeri keramičnih senzorjev tlaka (D. Belavič)
- Diskusija

Uvod (1/2)

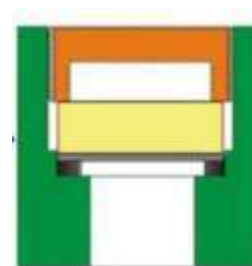
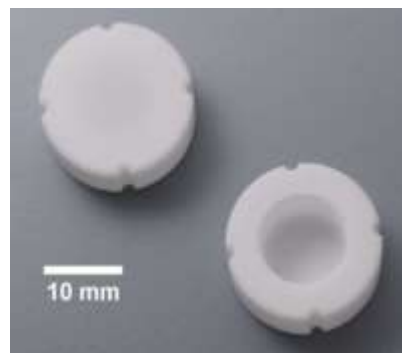
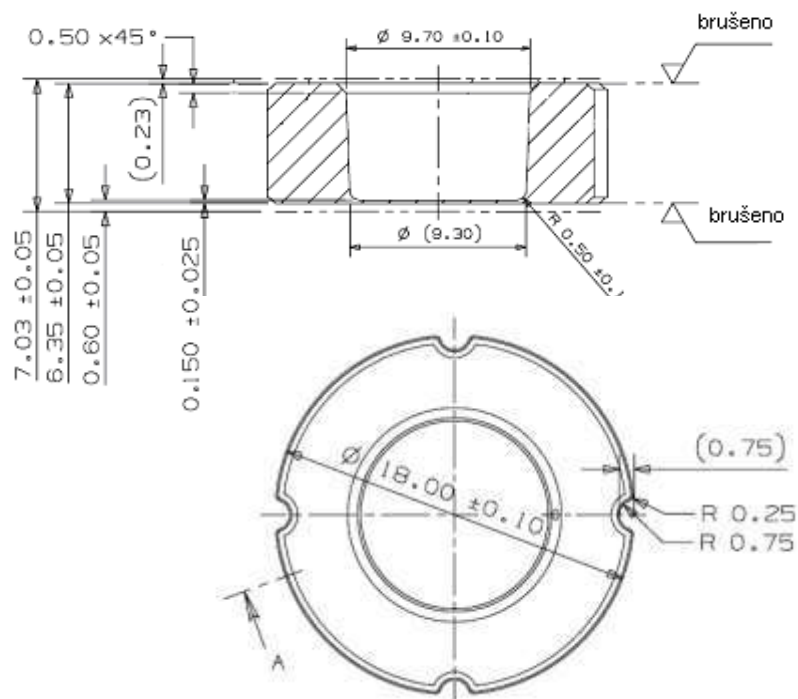
- ◆ Senzorji tlaka so lahko izdelani iz različnih materialov in tehnologij. Večinoma je to silicij in polprevodniške tehnologije.
- ◆ Keramični senzorji tlaka so izdelani iz keramičnih materialov in imajo zaradi tega v nekaterih aplikacijah prednost pred ostalimi.
- ◆ Tlak deformira (upogne) krožno vpeto membrano na kateri so funkcionalni elementi.
- ◆ Funkcionalni elementi so izdelani z debeloplastno tehnologijo
- ◆ Uporabni so v širšem temperaturnem območju, pri višjih tlakih in v agresivnih medijih.
- ◆ Novejše keramične tehnologije (LTCC) omogočajo izdelavo 3D struktur pri nižjih temperaturah in omogočajo miniaturizacijo in integracijo.

Uvod (2/2)

- ◆ Monolitna polprevodniška tehnologija ima prednosti zaradi miniaturizacije, visoke občutljivosti, veliko-serijske proizvodnje in cenenosti senzorjev pri veliko-serijski proizvodnji. Slabost teh senzorjev pa je večja temperaturna odvisnost parametrov sensorja in nelinearnost karakteristik.
- ◆ Keramični senzori tlaka imajo manjšo tlačno občutljivost v primerjavi s polprevodniškimi, vendar tudi manj temperaturno odvisni, dosežejo boljšo linearnost, so dolgoročno stabilni in primerni za proizvodnjo manjših in srednje-velikih serij.
- ◆ Njihova največja prednost pa je, da se jih lahko izdelava na različnih podlagah (substratih), ki imajo boljše mehanske lastnosti in večjo odpornost na agresivne medije.
- ◆ Materiali za podlage so lahko aluminij-oksidsna keramika (alumina), cirkon-oksidsna keramika, različne kovine z izolacijsko plastjo, in keramika z nizko temperaturo žganja (ang. Low Temperature Co-fired Ceramics – LTCC). Najbolj razširjeni so podlage iz alumine (96% Al_2O_3).

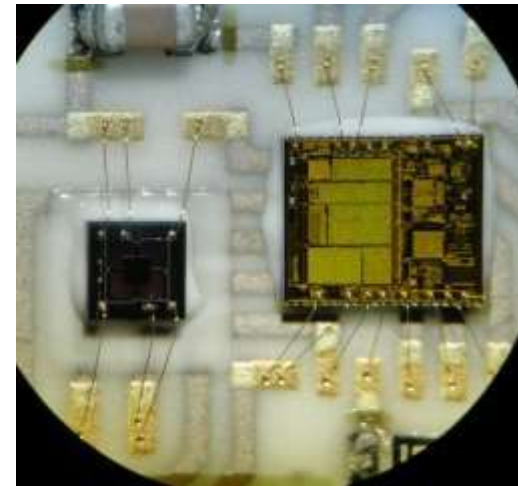
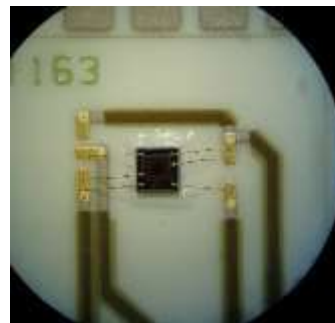
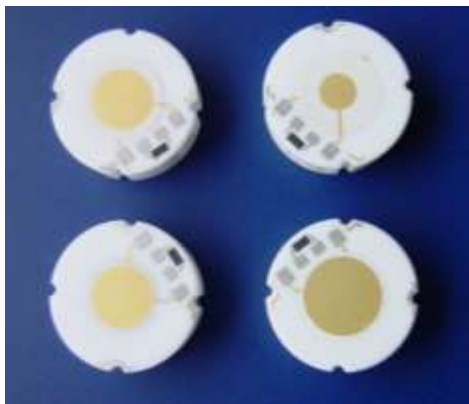
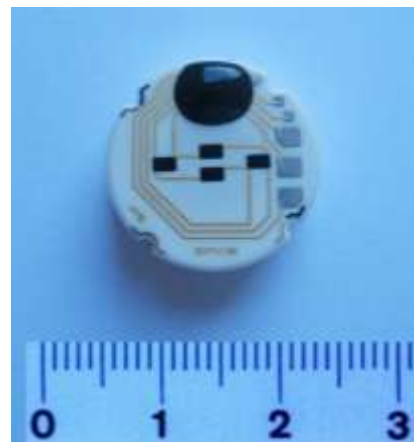
‘Konvencionalni’ keramični senzorji tlaka

s spleta



- ◆ ‘Konvencionalni’ keramični senzorji tlaka uporabljajo keramično telo, na katerem so z debeloplastno tehnologijo izdelani funkcionalni elementi.
- ◆ Merilni/prebojni tlak [bar]: 2/8, 5/20, 10/35, 20/60, 50/140, 100/300, 200/400, 400/650
- ◆ Izhodni signal pri maksimalnem tlaku: $1,5 \div 4,0$ mV/V

'Konvencionalni' keramični senzorji tlaka

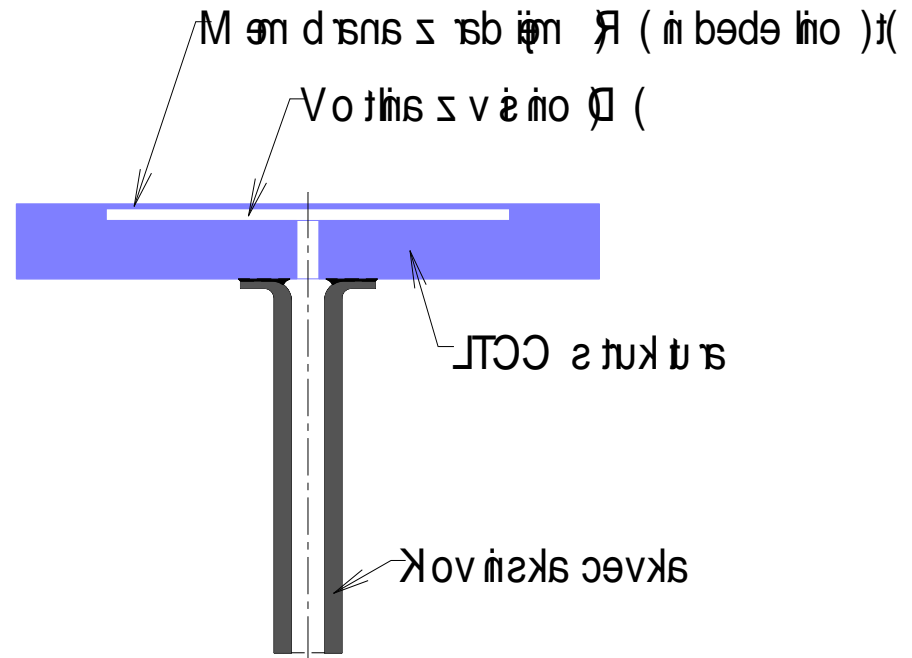


Slike:

- ◆ Spodnja stran keramičnega senzorja tlaka
- ◆ Piezouporovni keramični senzor tlaka
- ◆ Piezouporovni keramični senzor tlaka z 'elektroniko'
- ◆ Resonančni piezoelektrični keramični senzorji tlaka
- ◆ Keramična podlaga za silicijev senzor tlaka

Konstrukcija keramičnih senzorjev tlaka

- ◆ Običajno so keramični senzorji tlaka narejeni na keramični kapsuli, ki jo sestavljajo okrogla membrana pritrjena na obroč in podlago.
- ◆ Merjeni tlak upogne membrano na kateri so debeloplastni elementi, ki zaznajo mehansko deformacijo in jo pretvorijo v električni signal.
- ◆ Dimenzije in materialne lastnosti membrane določajo upogibek (y) membrane.



$$y(r) = \frac{3P(1-\nu^2)(R^2 - r^2)^2}{16Et^3}$$

Primerjava karakteristik različnih materialov za izdelavo keramičnih senzorjev tlaka

Material: Alumina, Y-TZP (tetragonal ZrO_2), LTCC (Du Pont 951), Jeklo (1.4016) → DOS

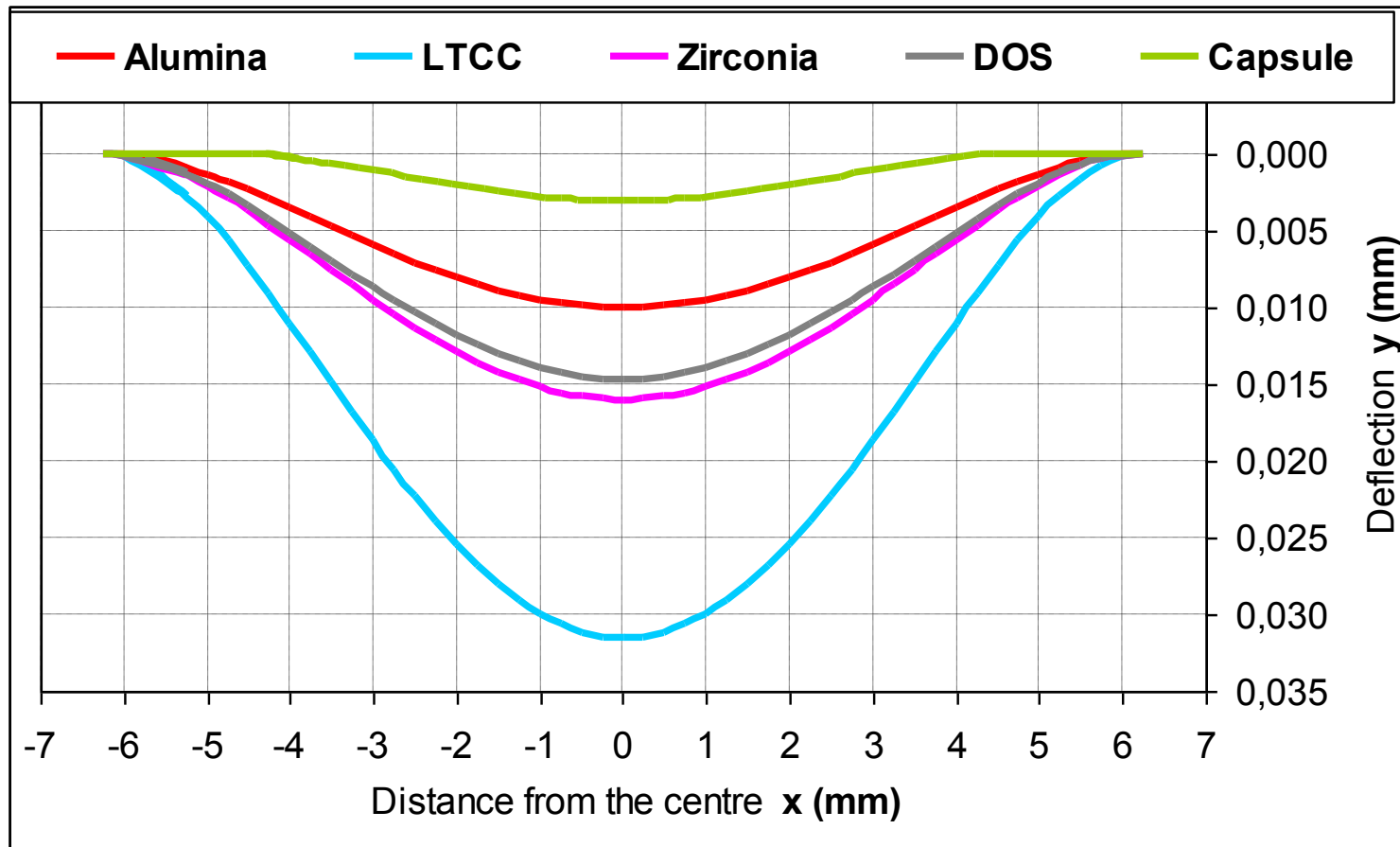
Vir: Darko Belavič et al, "Benchmarking Different Substrates for Thick-film Sensors of Mechanical Quantities", EMPC2009

	Al₂O₃ (96%)	LTCC DP951	Y-TZP	Steel
Young's modulus E (GPa)	340	110	200	220
Density (g/cm³)	3.6	3.1	6	7.7
Thermal expansion coefficient (×10⁻⁶/K)	7	5.8	9.6	10
Thermal conductivity (W/mK)	20÷24	3	2.2÷2.7	25
Flexural Strength [MPa]	460	320	700÷1100	—

Simulacija upogibkov membran keramičnih senzorjev tlaka

- ◆ Tlak 1 bar
- ◆ Debelina membrane 200 μm ; Premer membrane 12 mm (9.3 mm - kapsula)

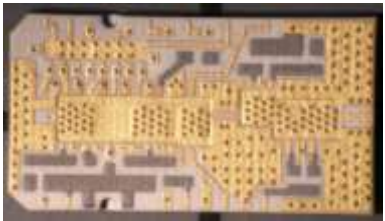
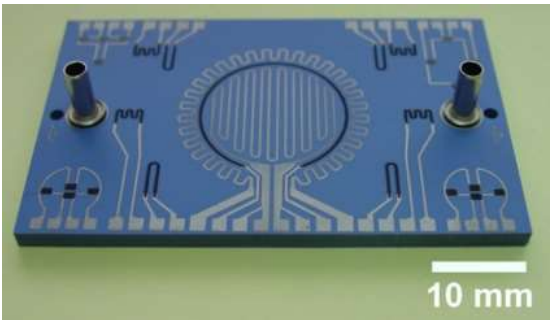
Vir: Darko Belavič et al, "Benchmarking Different Substrates for Thick-film Sensors of Mechanical Quantities", EMPC2009



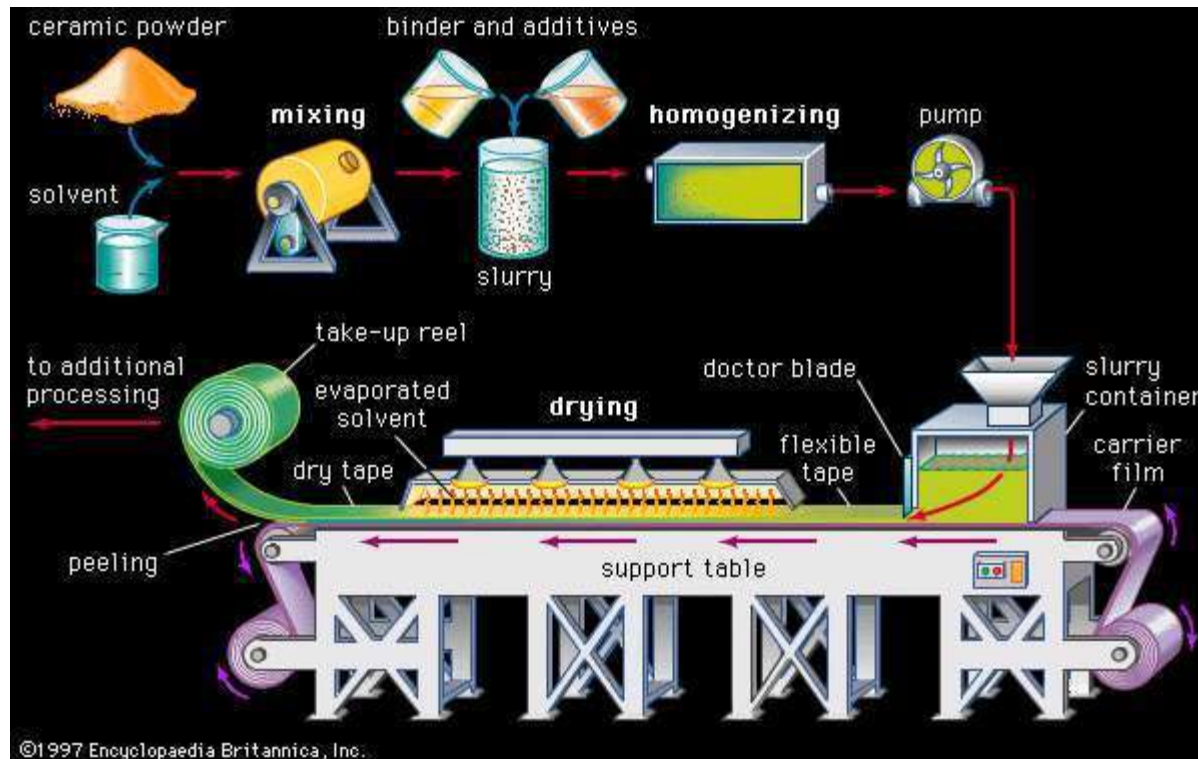
LTCC material in tehnologija

Kostja Makarovič

Keramika iz vsakdana in tehnike



Pogosti načini oblikovanja keramike v strukture



Večplastna keramika

- ◆ Dielektriki, varistorji, piezoelektriki, feriti

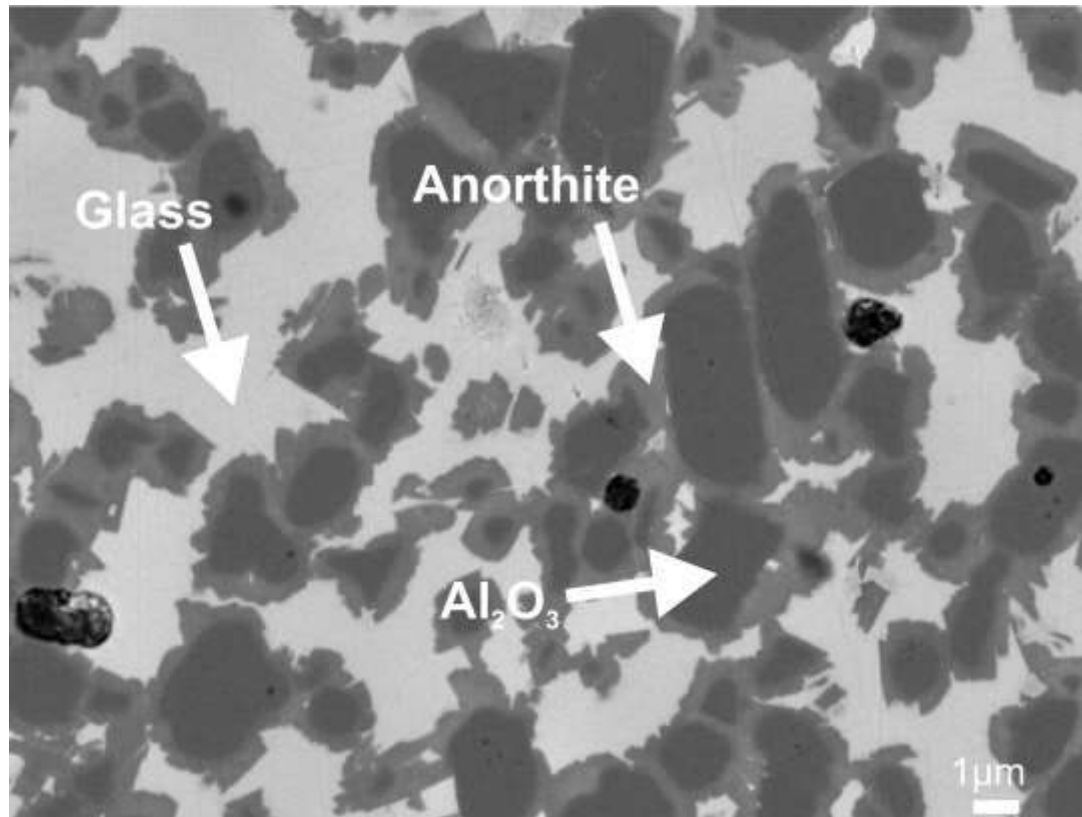
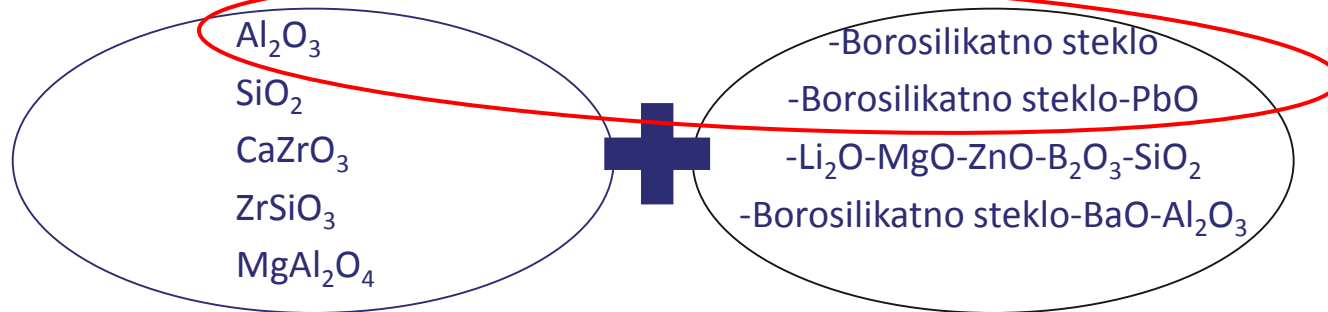
Za izdelavo tlačnih senzorjev in ostalih 3D struktur se najpogosteje uporablja:

- Plasti iz Al_2O_3 keramike (temperatura žganja 1600 °C)
- Plasti iz „Keramike z nizko temperaturo žganja“ (Low temperature cofired ceramics - LTCC) (Temperatura žganja 850 °C)

Keramika z nizko temperaturo žganja- LTCC

Keramično polnilo

Kristalizirajoče steklo



W. Kinzey Jones et al., *Chemical, structural, and Mechanical properties of the LTCC Tapes*, IMAPS proceedings, 23 [4] 469 – 473 (2000)

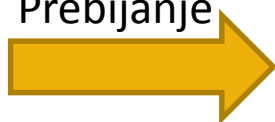
Masuo Hosokawa et al., *Nanoparticle technology handbook*, page 227, Elsevier, 2007

Y. Iamanaka, *Multilayered LTCC Technology*, page 15, Springer, 2001

Od plasti do izdelka



Prebijanje



Stroj za prebijanje



Tiskanje



Sitotisk



Zlaganje



Laminacija



Stacking machine

Rezanje



Isostatic press

21 MPa

60 °C

10 minutes

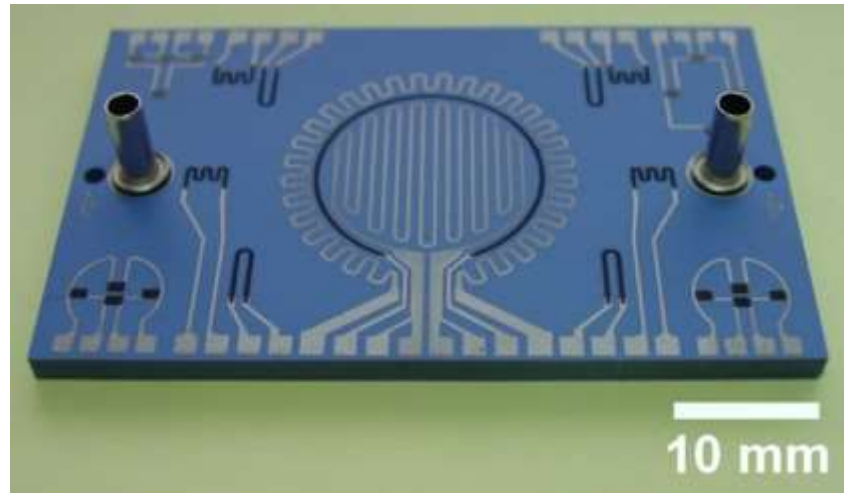


Stroj za rezanje

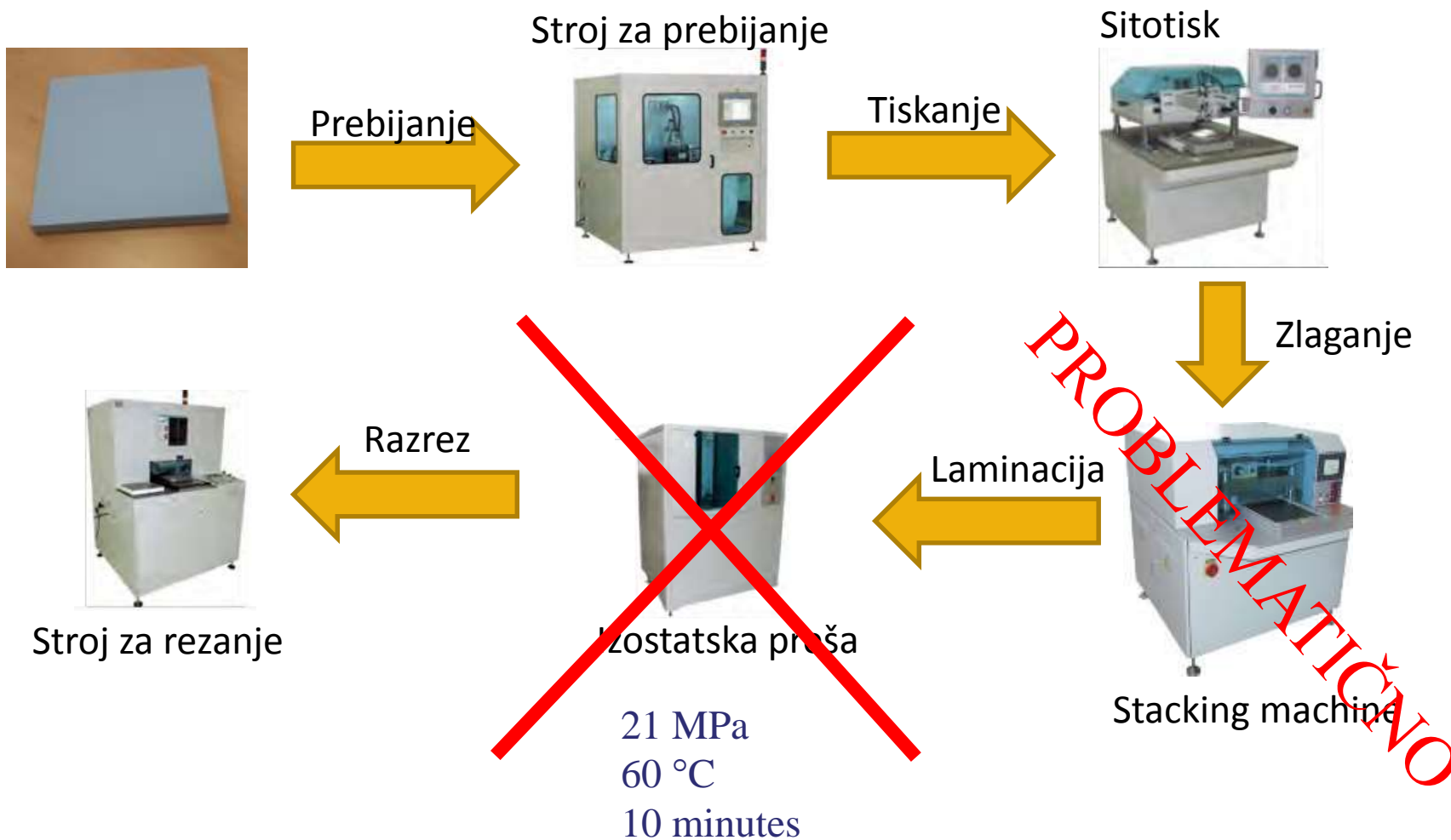
Stoje na sliki proizvaja KEKO Oprema d.o.o. Žužemberk



Problemi in specifike



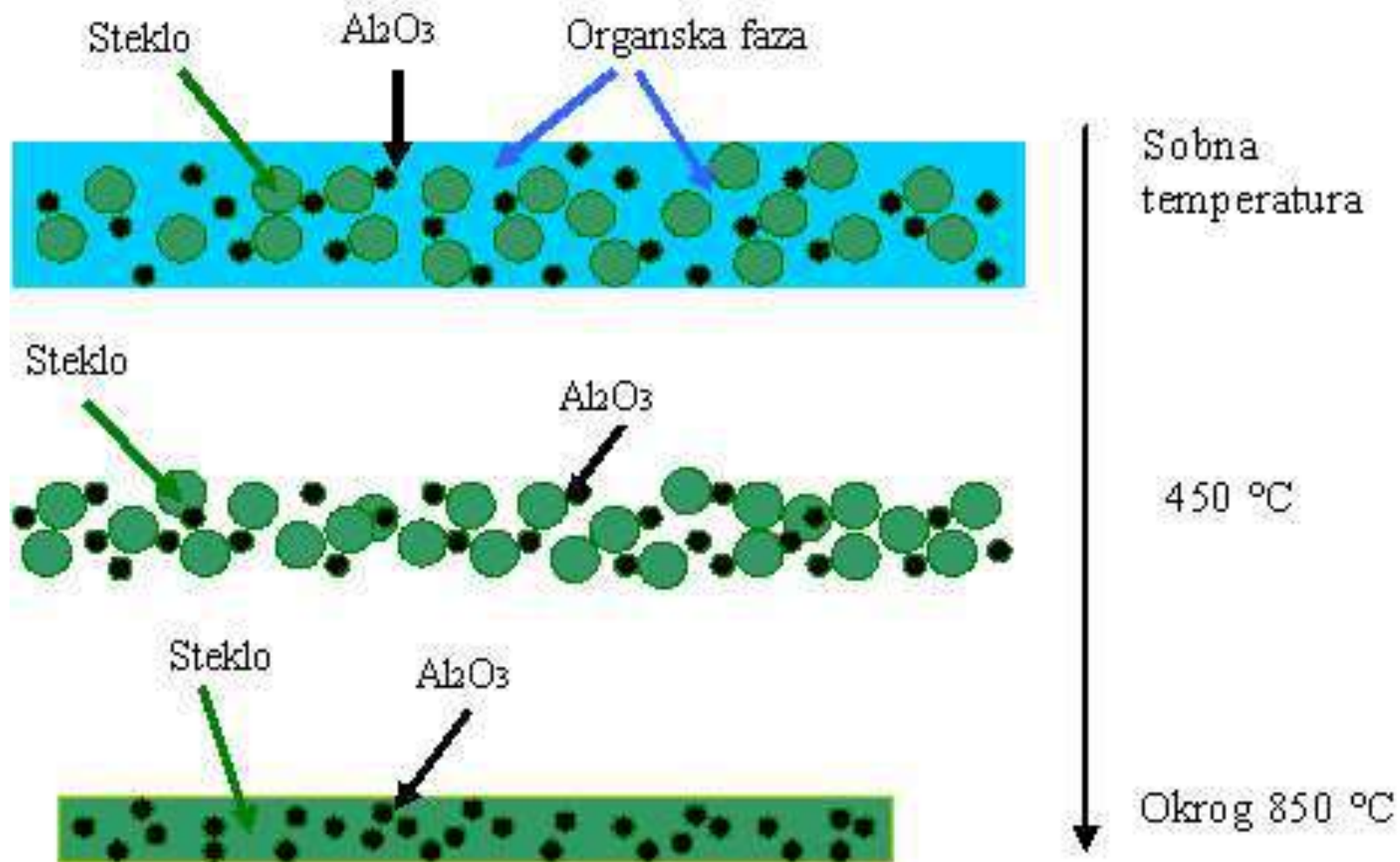
Od plasti do izdelka



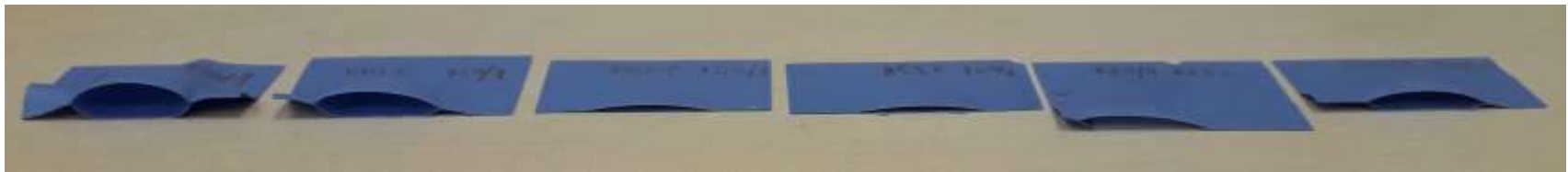
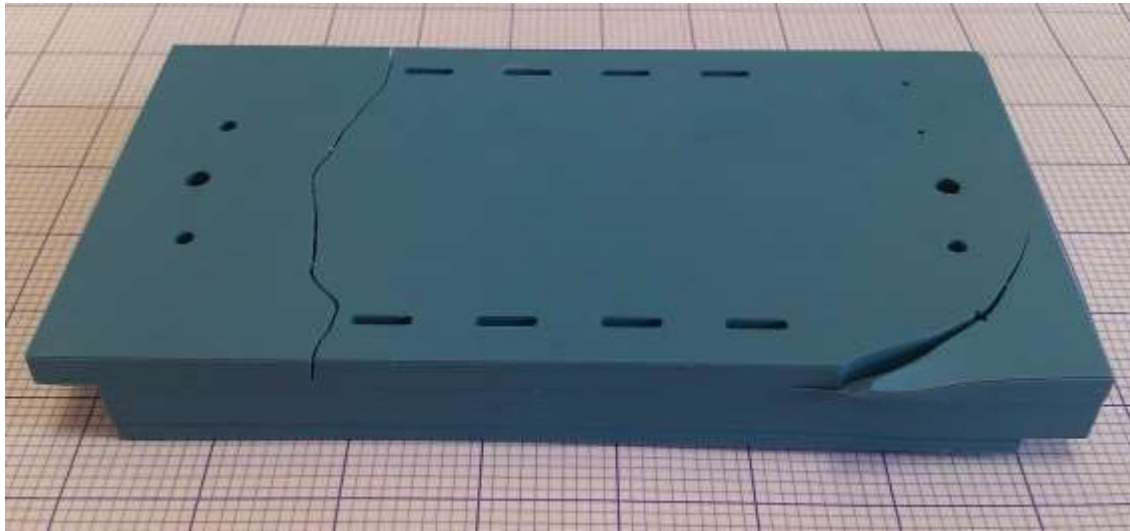
Stoje na sliki proizvaja KEKO Oprema d.o.o. Žužemberk



Izgon veziva ter sintranje



Sintranje, sočasno žganje s prevodnimi linijami, debele strukture, pokopane votline



LTCC senzorji tlaka

Darko Belavič

Senzorji tlaka

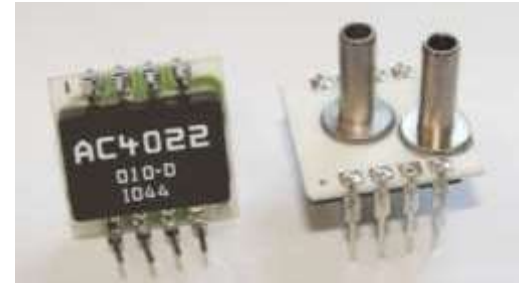
Silicijevi senzorji tlaka (vir: splet /Acuity Incorporated/)



Silicijev 'čip'
(milimetrski
dimenzija)

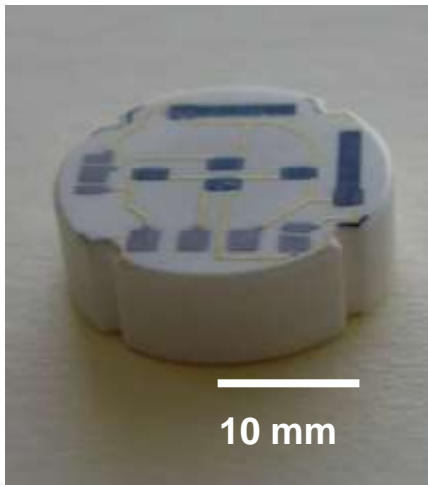


Silicijev 'čip' + ohišje
(dimenzija 10×10 mm)

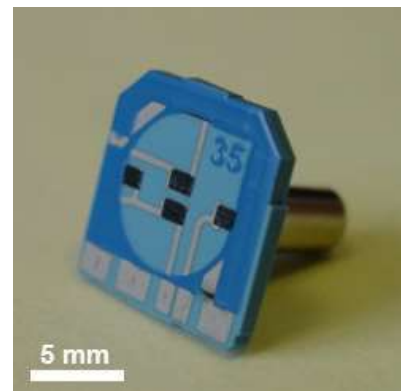


Kalibriran in kompenziran senz.
(dimenzija 15,2×15,2 mm)

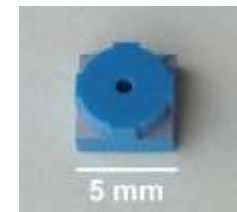
Konv. keramični senzor tlaka (premer 18 mm)



LTCC senzor tlaka (dimenzija 10×10 mm) Razvit v letu 2012



Mini senzor tlaka (dimenzija 5×5 mm) Razvit v letu 2018

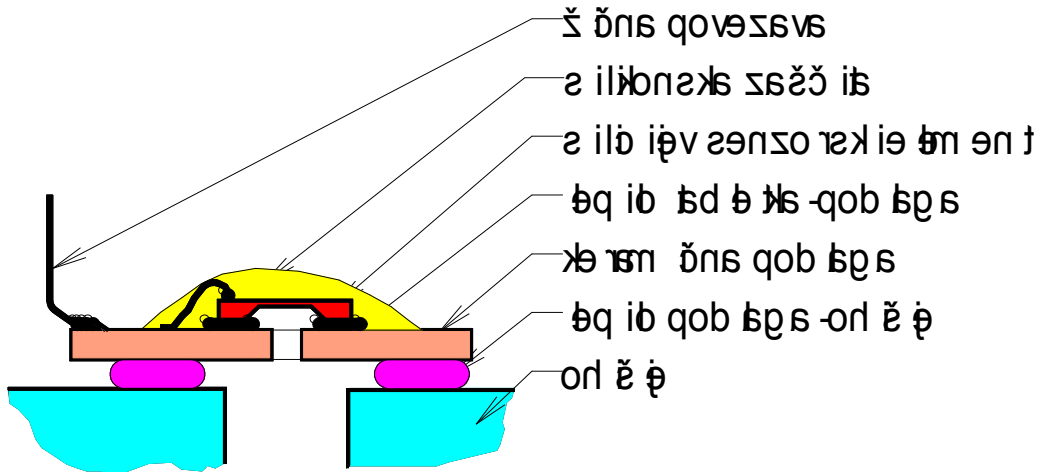


LTCC keramični senzorji tlaka

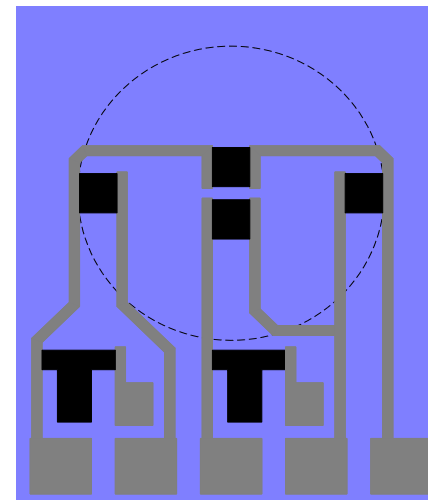
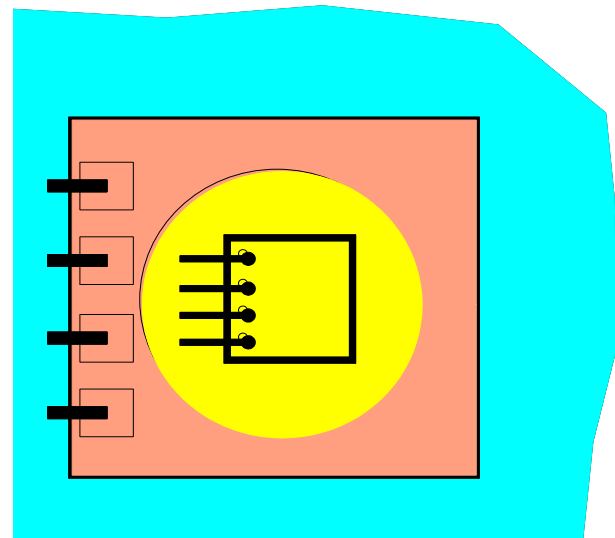
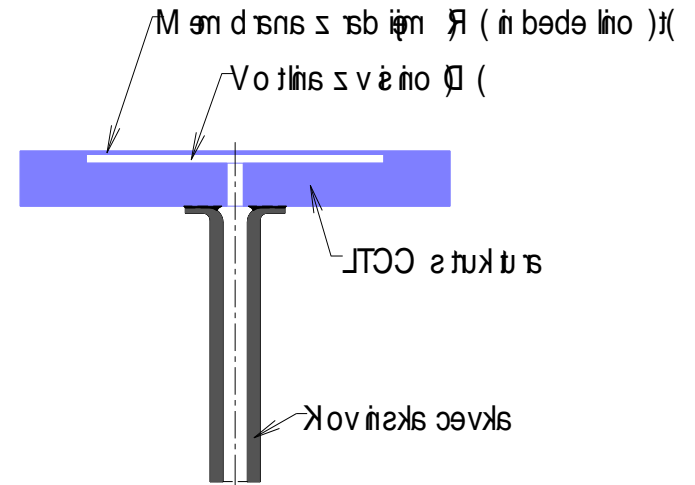
- ◆ Konvencionalni keramični senzorji tlaka ne morejo konkurirati po občutljivosti, miniaturnosti in ceni polprevodniškim senzorjem, so pa zaradi svoje robustnosti primerni za uporabo v zahtevnejših pogojih.
- ◆ Uporaba LTCC tehnologije spreminja to razmerje, saj omogoča trikrat večjo senzorsko občutljivosti, miniaturizacijo in lažjo integracijo.
- ◆ LTCC senzorji tlaka se lahko uporabljajo od relativno nizkih tlačnih področij (0-5 mbar) do relativno visokih (0-50 bar).
- ◆ LTCC tehnologija omogoča več možnosti in bolj fleksibilno dizajniranje.
- ◆ Miniaturizacija pomeni manjšo porabo materiala
- ◆ LTCC tehnologija omogoča lažjo industrializacijo oz. množično proizvodnjo.
- ◆ LTCC tehnologija je energetsko manj potratna.
- ◆ LTCC material je v osnovi dražji od aluminij-oksidge keramike.
- ◆ LTCC tehnologija še ni uveljavljena za izdelavo senzorjev tlaka
- ◆ Zahteva 'razumevanje' materialov in obvladovanje tehnologije

Primerjava silicijevih in keramičnih senzorjev tlaka

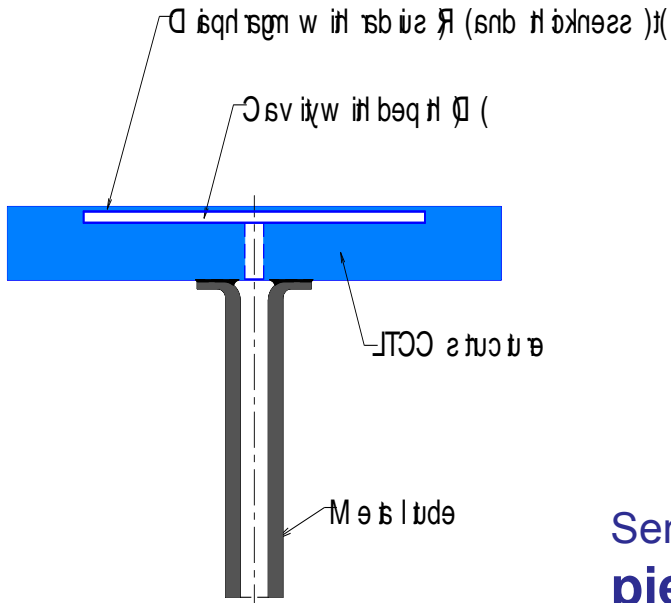
Silicijevi senzorji tlaka



Keramični senzorji tlaka



LTCC Keramični senzorji tlaka



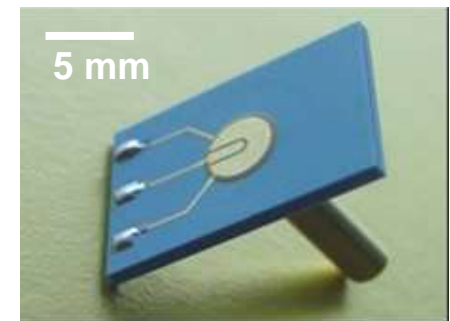
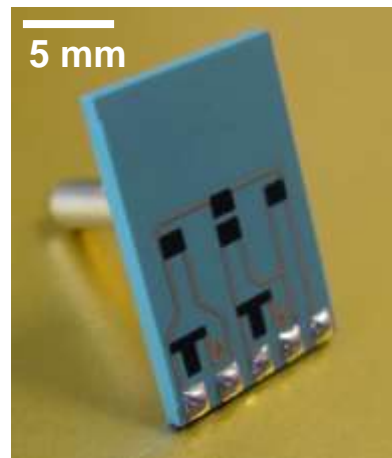
Presek LTCC Keramični senzorji tlaka



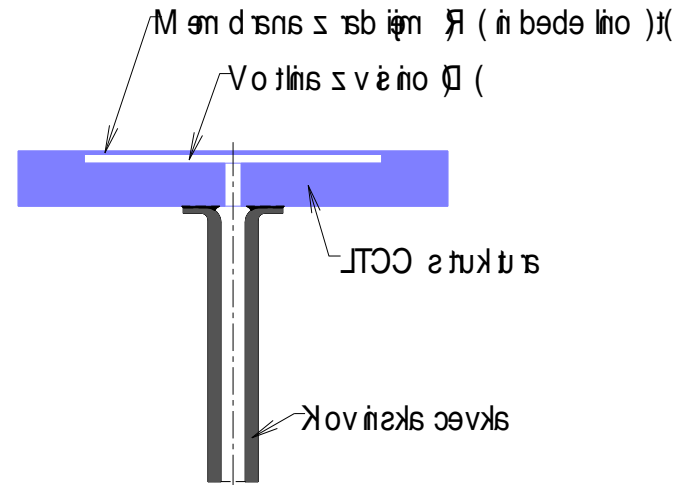
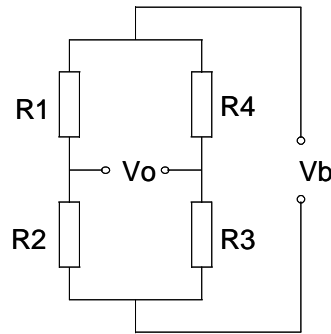
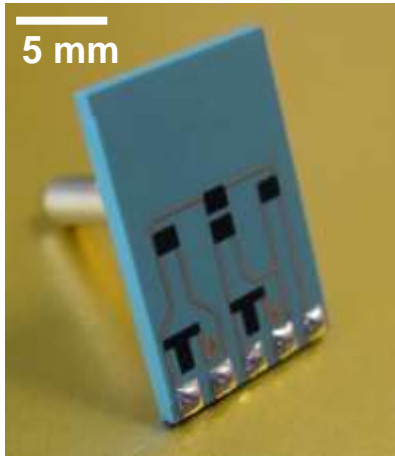
Senzorji tlaka delujejo na treh različnih senzorskih principih: **piezouporovnem, kapacitivnem in resonančnem**

Tlačna področja:

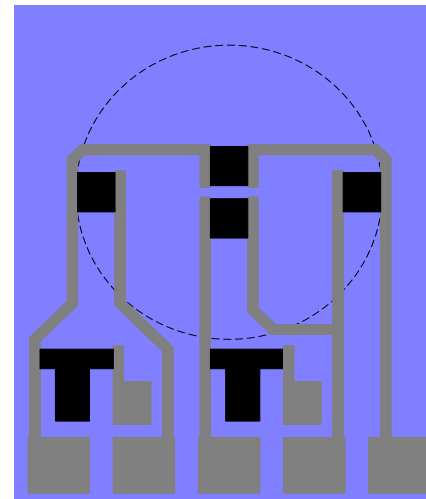
od
0÷50 mbar
do
0÷50 bar



LTCC Keramični piezoporovni senzor tlaka



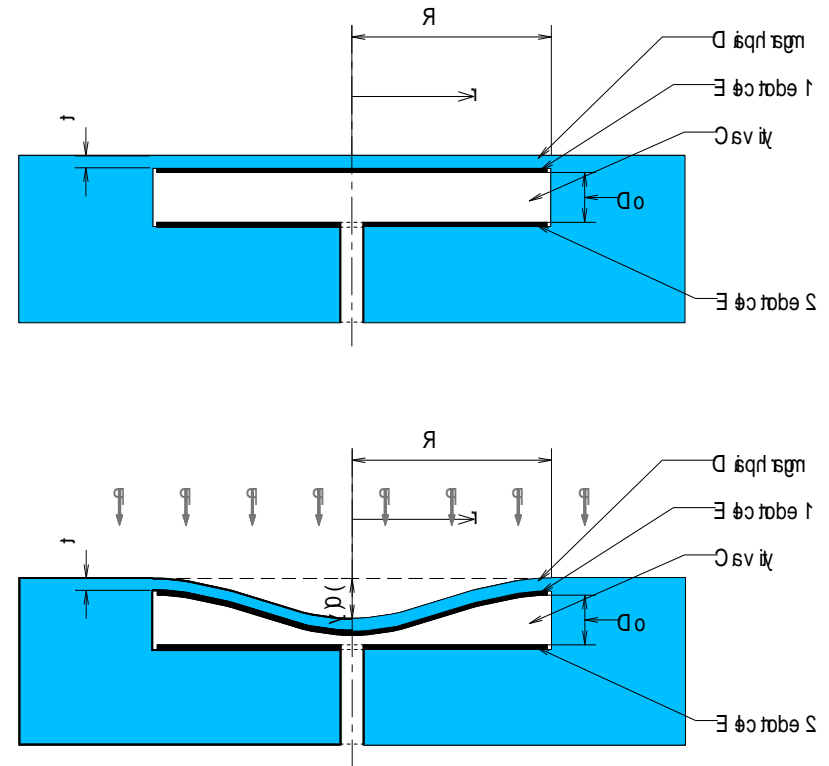
- ◆ Piezoporovni efekt debeloplastnih uporov
- ◆ $GF = 5 - 20$
- ◆ Občutljivost: $20-90 \mu\text{V}/\text{V}/\text{kPa}$
- ◆ TKV: $240 \times 10^{-6}/\text{K}$
- ◆ TKS: $450 \times 10^{-6}/\text{K}$



LTCC Keramični kapacitivni senzor tlaka



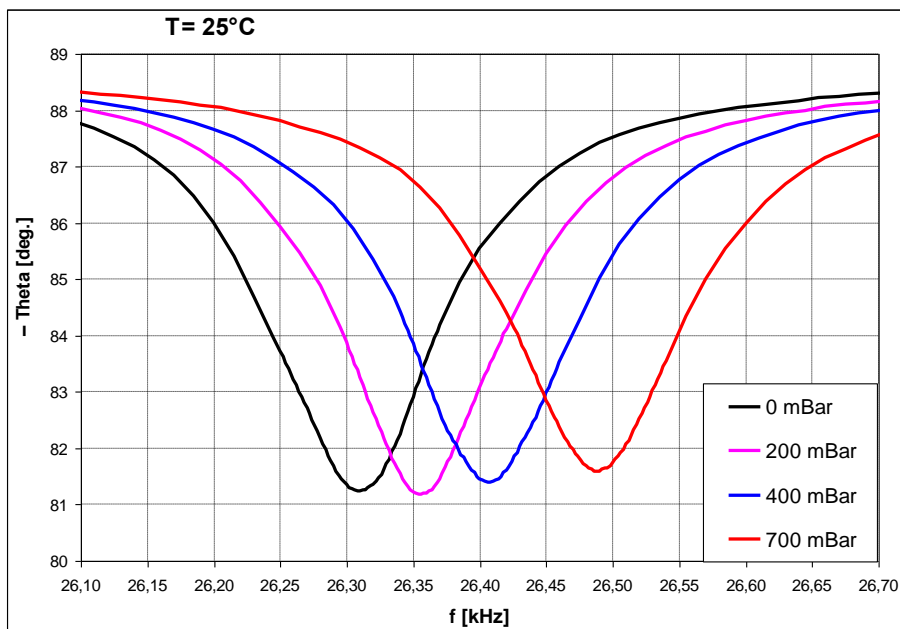
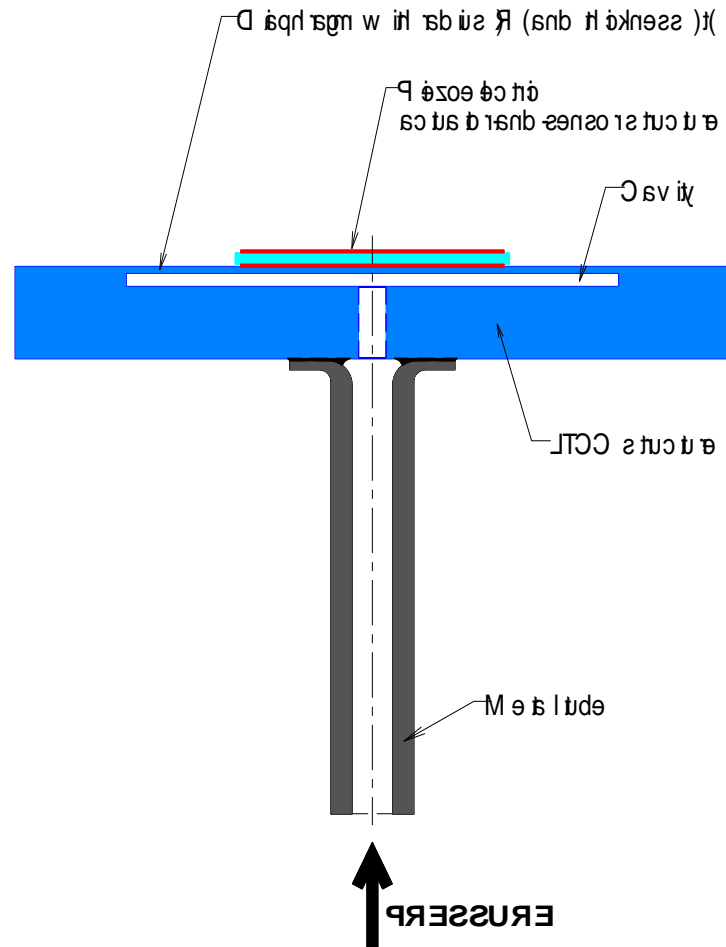
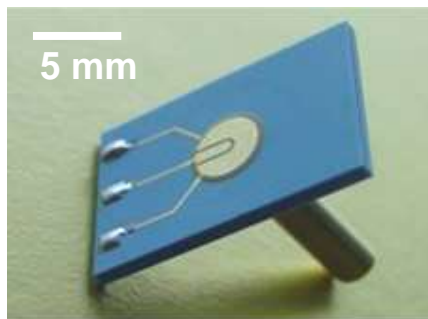
- ◆ Elektrode kondenzatorja so v notranjosti votline
- ◆ Kapacitivnost: 10 pF
- ◆ Občutljivost: 2–8 fF/kPa
- ◆ TKF: $(100 - 300) \times 10^{-6}/K$



$$C(P) = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \int_0^R \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr}{D_0 - y(r)}$$

LTCC Keramični resonančni piezoelektrični senzor tlaka

- ◆ Debeloplastni piezoelektrični el.
- ◆ Frekvenca: 26 kHz
- ◆ Občutljivost: 2,5 Hz/kPa
- ◆ TKF: $-130 \times 10^{-6}/K$
- ◆ TKS: $1500 \times 10^{-6}/K$

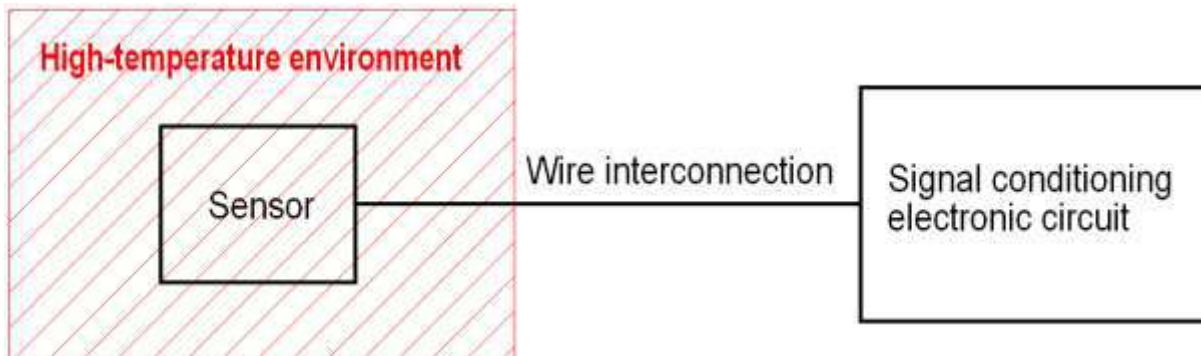


$$f_r = \frac{\lambda \cdot t}{r^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$$

LTCC keramični **piezouporovni** senzor tlaka za visoke temperature



- ◆ Tlačno področje: od 0 do 2 bar
- ◆ Mostična upornost: 7 k Ω
- ◆ Temperaturni koeficient upornosti: 40 ppm/ $^{\circ}\text{C}$
- ◆ Tlačna občutljivost: 2.1 mV/V/bar
- ◆ Temperaturni koeficient tlačne občutljivosti: -197 ppm/ $^{\circ}\text{C}$
- ◆ Dimenzije senzorja: 18,0 mm \times 15,0 mm \times 2,1 mm
- ◆ Delovna temperatura senzorja tlaka: do 400 $^{\circ}\text{C}$
- ◆ Delovna temperatura senzorja tlaka za enkratno uporabo: do 500 $^{\circ}\text{C}$



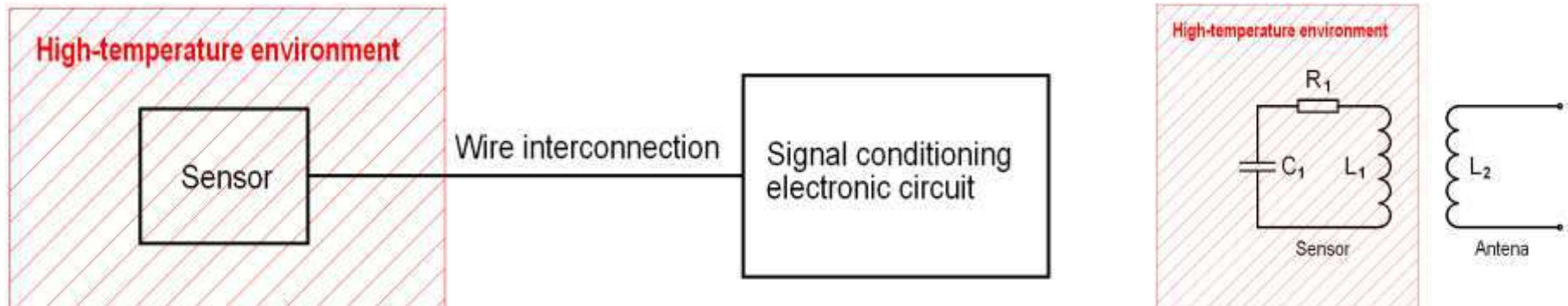
LTCC keramični **kapacitivni** senzor tlaka za visoke temperature

NOVO

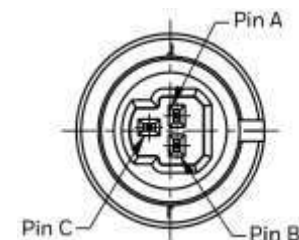
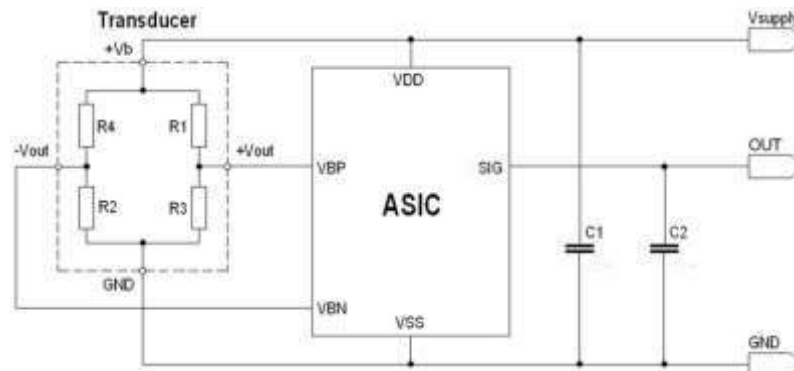
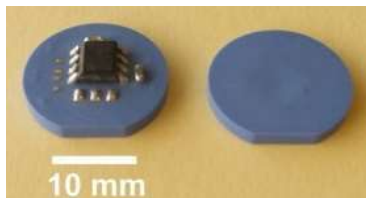


- ◆ Tlačno področje: od 0 do 2 bar
- ◆ Ničelna kapacitivnost: 7 k Ω
- ◆ Temperaturni koeficient kapacitivnosti: 40 ppm/ $^{\circ}\text{C}^*$
- ◆ Tlačna občutljivost: 500 fF/bar
- ◆ Temperaturni koeficient tlačne občutljivosti: 120 ppm/ $^{\circ}\text{C}^*$
- ◆ Dimenzije sensorja: 18,0 mm \times 15,0 mm \times 2,1 mm
- ◆ Delovna temperatura sensorja tlaka: 600 $^{\circ}\text{C}$ (predvideno)

* v temperaturnem območju od -25 do 125 $^{\circ}\text{C}$



Keramični **piezoporovni** senzor tlaka z elektrono v kovinskem ohišju

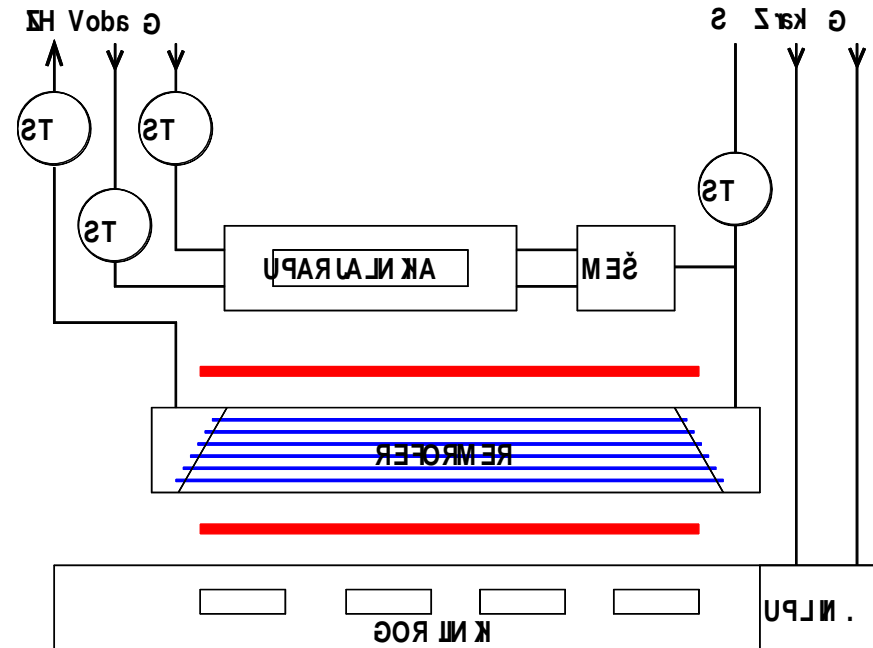
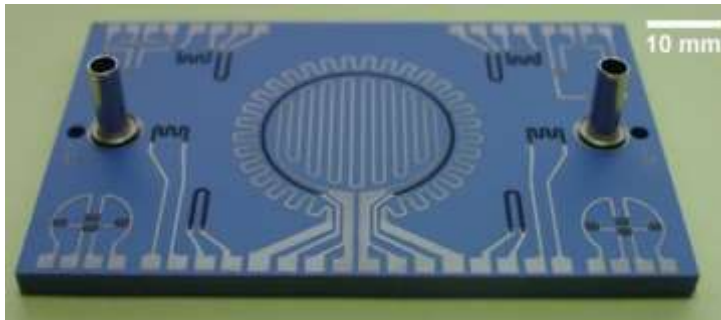
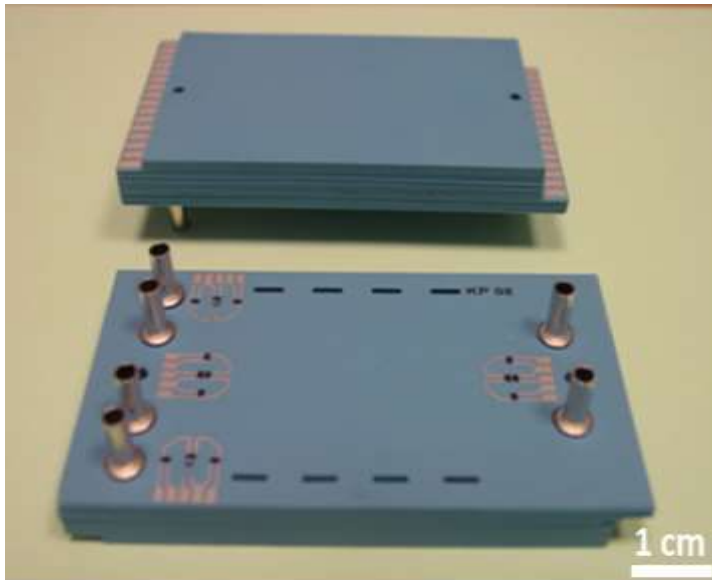


Pin A = GND
Pin B = Vsupply
Pin C = Vout

- ◆ Keramični (LTCC) senzor tlaka ima integrirano elektrono in je zaprt v kovinsko ohišje.
- ◆ Senzor je razvit za merjenje absolutnega tlaka do 7 bar v agresivnih medijih.
- ◆ Izhodni signal je kalibriran in temperaturno kompenziran

- ◆ Nazivni tlak: 7 bar abs
- ◆ Prebojni tlak: 20 bar
- ◆ Delovna temperatura: $-40 \div 135$ °C
- ◆ Napajalna napetost: 5 V
- ◆ Izhodna napetost: $0,5 \text{ V} \div 4,5 \text{ V}$

Primer keramičnih mikrosistemov z integriranimi senzorji tlaka



- ◆ Keramična (LTCC) struktura in arhitektura za kemični mikroreaktor, ki pretvarja metanol in vodo v vodik za gorivne celice.
- ◆ Keramična (LTCC) struktura za uparjalnik.
- ◆ Oba mikrosistema vključujeta poleg fluidnih komponent tudi senzorje tlaka in temperature

Zaključek

- ◆ Keramični senzorji tlaka so že dolgo na trgu in so običajno namenjeni za robustne aplikacije
- ◆ Keramična LTCC tehnologija spreminja to pozicijo
- ◆ Z večjo tlačno občutljivosti, miniaturizacijo in lažjo integracijo omogoča izdelavo kompleksnejših sistemov
- ◆ LTCC tehnologija omogoča kombinacijo fluidike in senzorike (multisenzorji) ter možnost, da pretvorniški elementi niso v stiku z medijem.

- ◆ Tovarne prihodnosti v povezavi z IIoT bodo potrebovale vedno več senzorjev – tudi senzorjev tlaka.
- ◆ Velikokrat so v procesni industriji zahtevni pogoji (temperatura, agresivni mediji)

Zahvala

Zahvaljujemo se sodelavcem na Odseku za elektronsko keramiko na Institutu “Jožef Stefan”, v Centeru odličnosti NAMASTE in v podjetju KEKO Oprema d.o.o.

Nekaj rezultatov je doseženih tudi s podporo Evropskega sklada za regionalni razvoj (Interreg projekt ASAM) in Evropskega programa KET4CleanProduction.



Nekaj rezultatov pa je nastalo že v obdobju 2007-2017. Takrat so različne projekte iz programa Keramični mikrosistemi podpirali Javna agencija za raziskovalno dejavnost, Ministrstvo za obrambo Republike Slovenije, Evropska vesoljska agencija in Evropski sklad za regionalni razvoj ter tudi podjetja HIPOT-RR, HYB, KEKON in KEKO Oprema.

Hvala lepa za pozornost

dr. Kostja Makarovič

kostja.makarovic@ijs.si

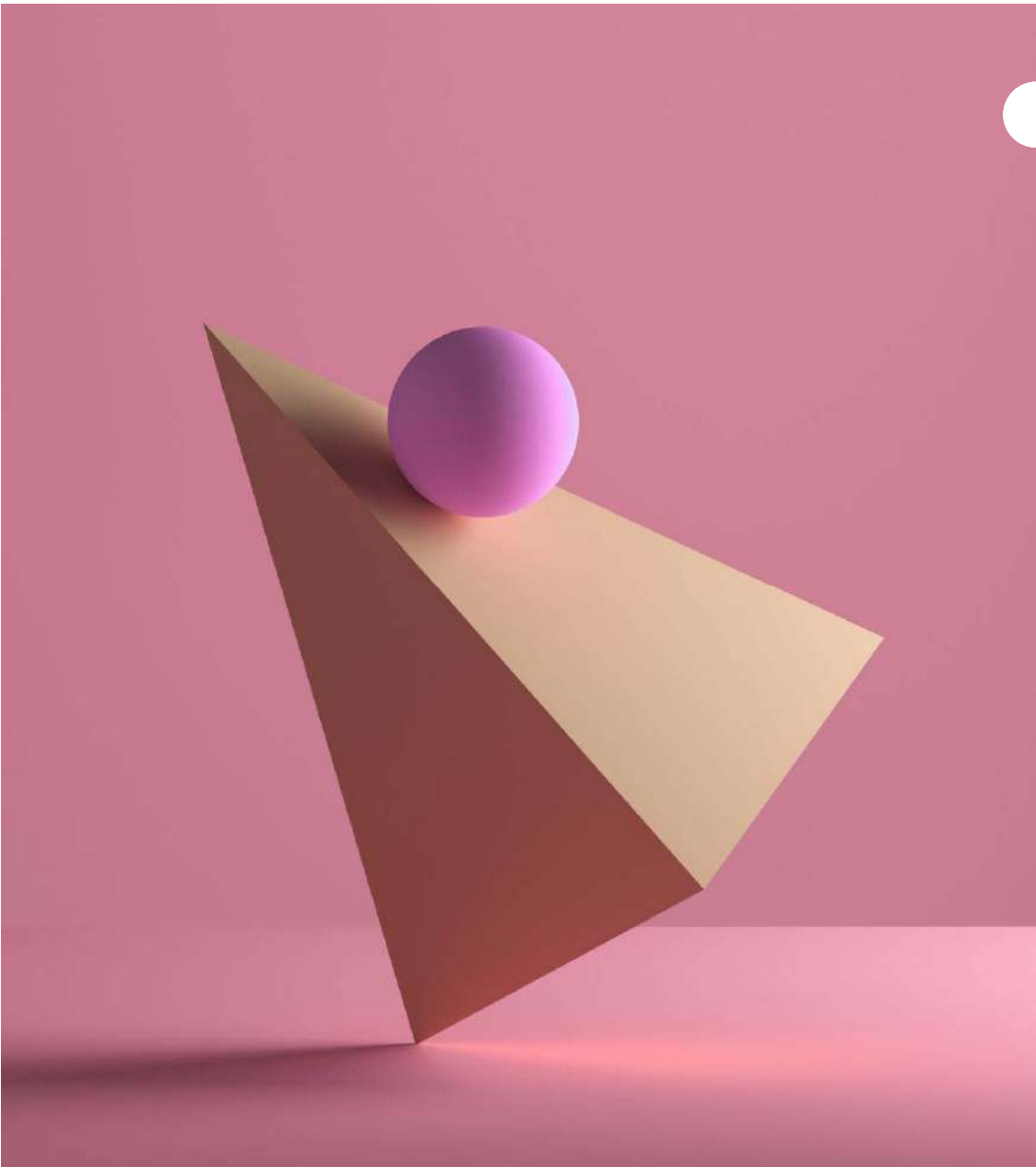
Darko Belavič

darko.belavic@ijs.si

Jožef Stefan Institute, SI-1000 Ljubljana

CO NAMASTE, SI-1000 Ljubljana

KEKO Oprema, SI-8360 Žužemberk



Iniciativa za senzorje

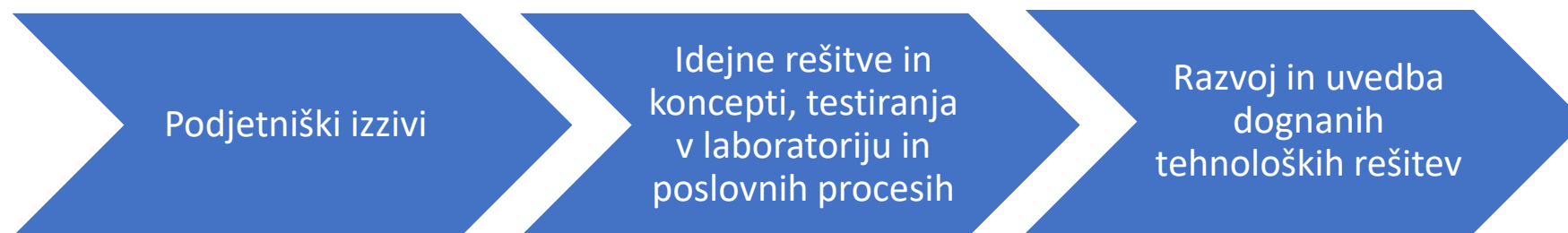
Andrej Kokol + Denis Đonlagić

Intrakon d.o.o.

14. 1. 2021

- + Delujoče strokovno-podjetniško RRI stičišče,
- + Namen: učinkovito in uspešno odgovarjati na odkrite izzive iz podjetniškega okolja ter prenos znanja,
- + Način dela: svetovanje glede temeljnih usmeritev in izbir na področju senzorskih tehnologij, idejna razdelava možnih rešitev, laboratorijska testiranja, testiranja v poslovnih procesih, izdelava in uvedba dognanih rešitev,
- + Podpora pri pripravi vlog za prijavo na razpise, ki so sofinancirani z EU sredstvi in management projektov,
- + V teku so štiri RRI projekti: dva s področja strojnega vida, dva s področja naprednih senzorjev.

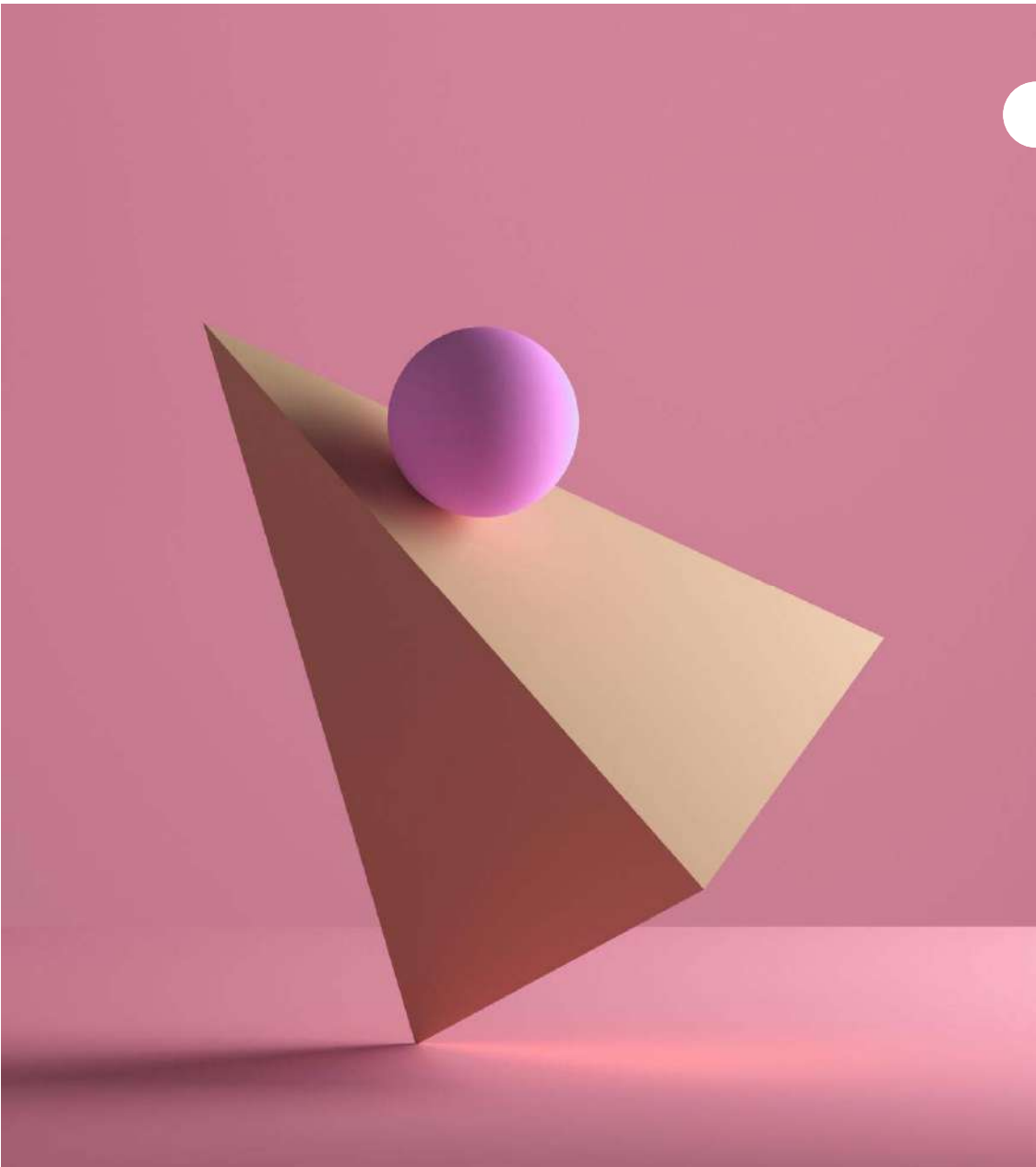
Iniciativa za senzorje



Spletna stran: <HTTPS://INTRAKON.CO>

E-pošta: kokolandrej2@gmail.com

Telefonska številka: +38631637605



Trenutne možnosti sofinanciranja RR in drugih projektov iz EU skladov

Andrej Kokol
Intrakon d.o.o.
14. 1. 2021

V Sloveniji

- + **Za mikro, mala in srednja podjetja:**
- + **Spodbujanje trajnostne poslovne strateške transformacije in razvoj novih poslovnih modelov v slovenskih podjetjih za lažje vključevanje v globalne verige vrednosti** –, višina sredstev na projekt do 124.250,00 EUR, stopnja sofinanciranja je 50 %, pogoji: najmanj 20 zaposlenih, zadnji rok 23. 4. 2021
- + **Digitalna transformacija** – razpis bi naj bil ponovno objavljen letos (po letih 2019 in 2020), s prejšnjimi je bilo mogoče pridobiti od 30.000 do 100.000 EUR sofinanciranja, stopnja sofinanciranja je 60 %, pogoji: najmanj 5 zaposlenih,
- + **e-poslovanje** – je namenjen internacionalizaciji poslovanja (spletne strani in trgovina, digitalni marketing, EDI, izobraževanja), višina sofinanciranja do 30.000 EUR, stopnja sofinanciranja je 70 %, zadnji rok za prijavo je 1. 10. 2021,
- + **mikrokrediti:** do 2x25.000 EUR za vlaganje v osnovna in/ali obratna sredstva, naslednji rok naj bi bil 25. 2. 2021 (trenutno je umaknjen), obrestna mera 0,375 x 6 mesečni EURIBOR + 0,8 % na leto.

V EU

Innovation fund – small-scale projects. Razpis je bil objavljen 1. decembra 2020, rok za prijavo je 10. 3. 2021.

<https://ec.europa.eu/inea/en/innovation-fund/call-for-proposals>

Trinity – namenjen novim tehnološkim rešitvam na področju robotike - razpis bo objavljen 14. februarju 2021 – rok za prijavo bo 1 junij 2021

<https://trinityrobotics.eu/>

Eureka-Eurostars – razpis je odprt, rok za prijavo je 4. 2. 2021 -

<https://www.eurekanetwork.org>

SAE – Smart Anything Everywhere

Call for proposals in the areas (Innovation Action):

- Customised Low Energy Computing powering Cyber-Physical Systems and IOT ([SMART4ALL](#))
- Cyber-Physical and Embedded Systems ([DigiFed](#), [DIH4CPS](#), [HUBCAP](#))
- Flexible and Wearable Electronics ([SmartEEs](#))
- Widening Digital Innovation Hubs ([BOWI](#))

Trenutno je odprtih 17 razpisov

Več o razpisih na: <https://smartanythingeverywhere.eu>