

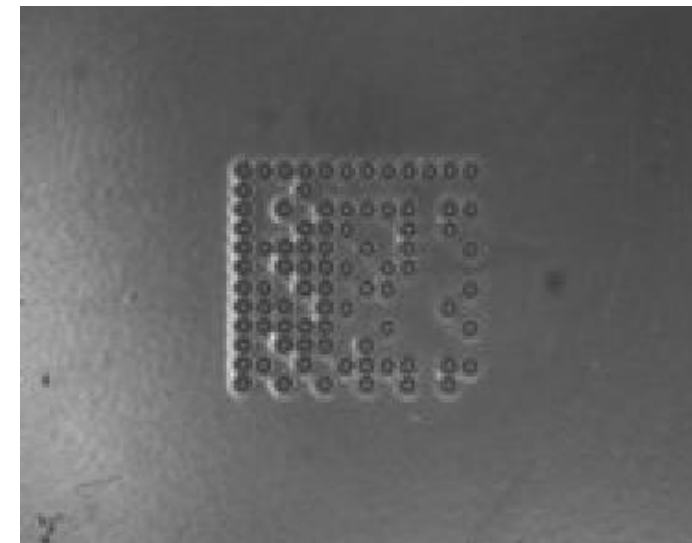
Kamerový systém a zpracování obrazu

Strojové vidění a zpracování obrazu (BI-SVZ)

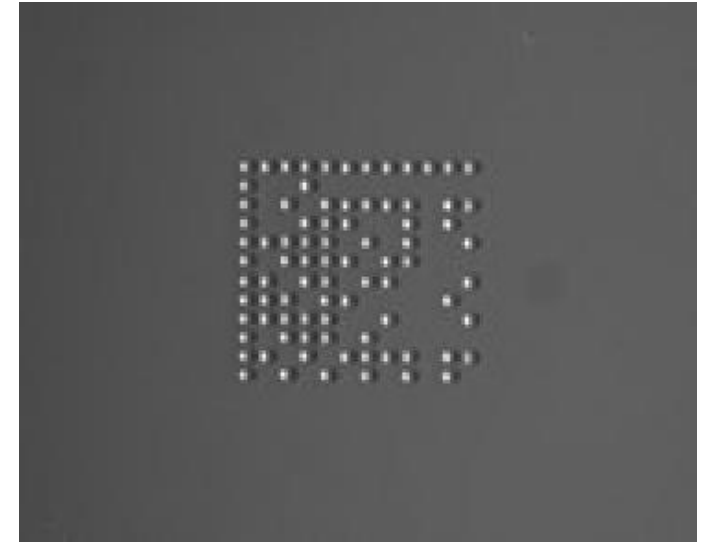
Motivace



Motivace

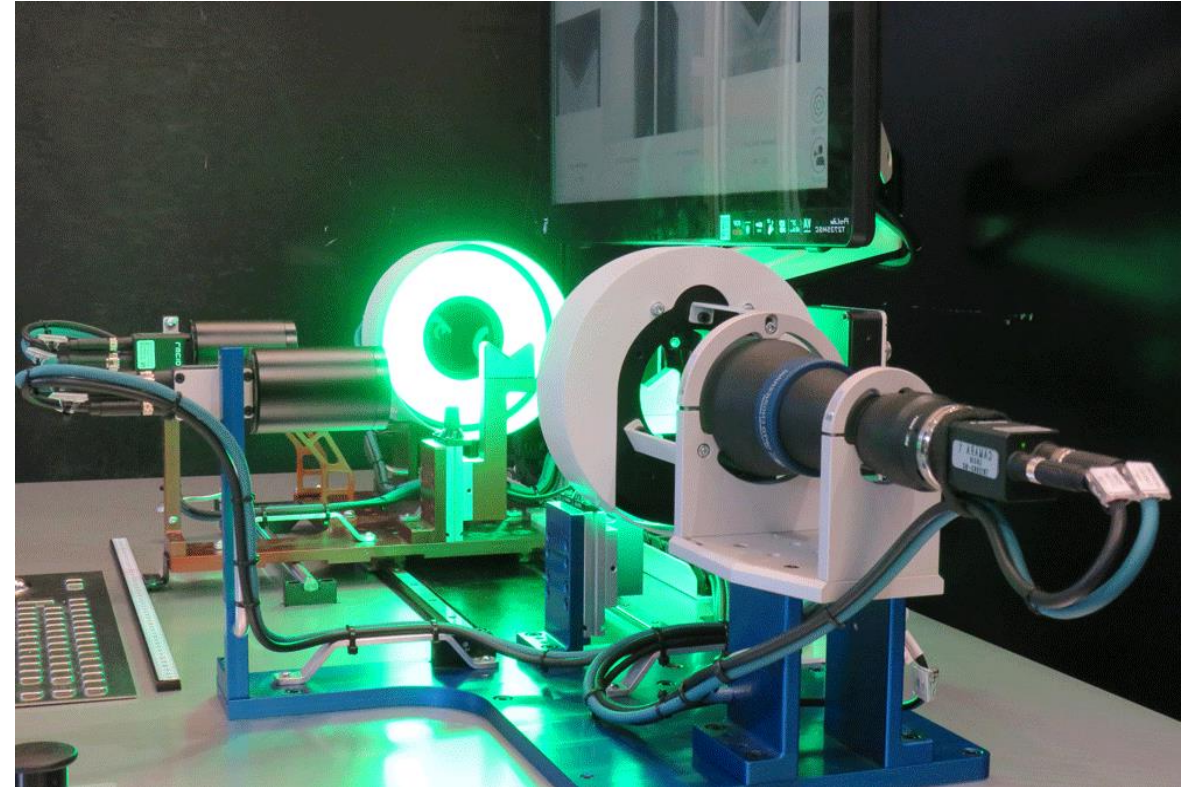


Motivace



Obsah přednášky

- Kamerový systém
- Osvětlení
 - Kritéria výběru
 - Druhy osvětlení pro strojové vidění
- Případová studie - měření dílů
 - Výběr kamery
 - Výběr objektivu



Kamerový systém (řetězec)

- **Kamerový systém (CCTV)**

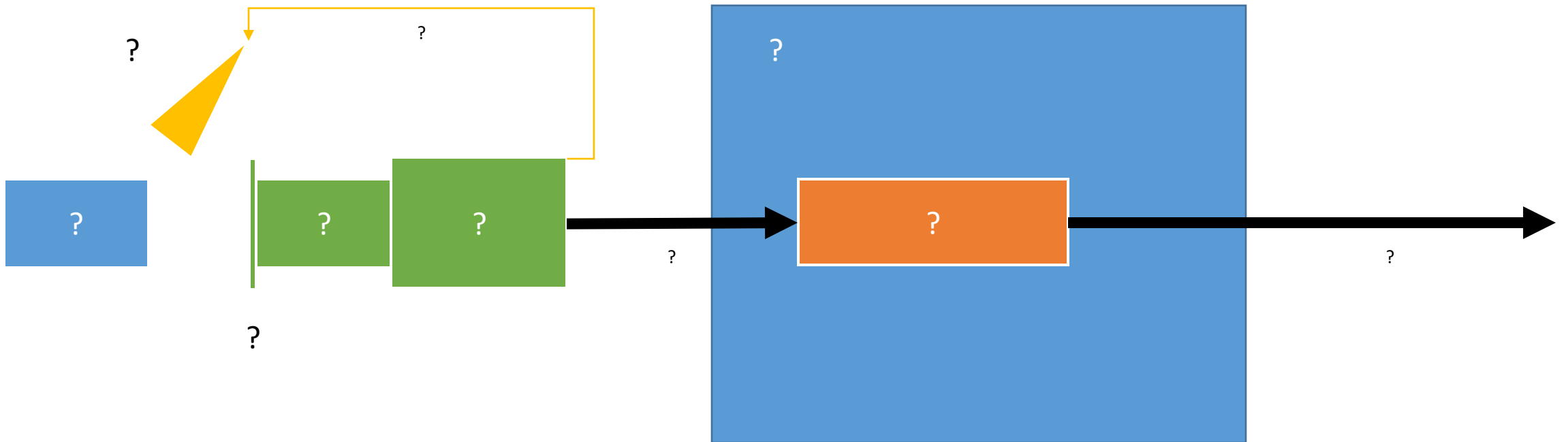
- Closed Circuit Television
- uzavřený televizní okruh

- Užití kamer ke sledování prostor, k zobrazování záběrů z kamer na monitorech a archivaci natočených záběrů.

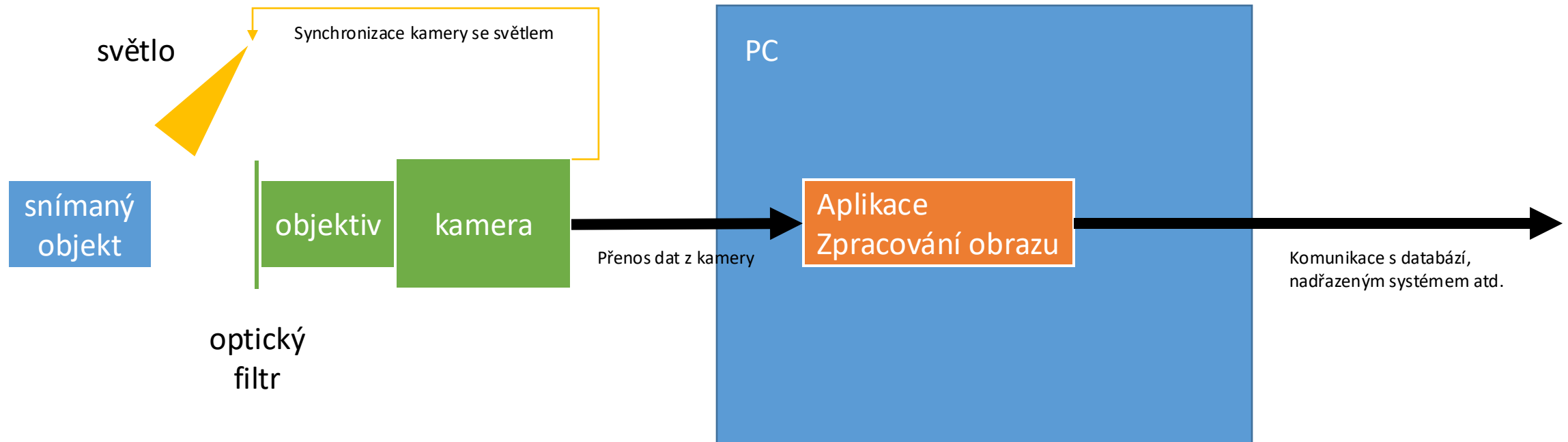
https://cs.wikipedia.org/wiki/Kamerový_systém



Kamerový systém – průmysl



Kamerový systém – průmysl



Osvětlení – cíle výběru

- Maximalizace kontrastu u oblastí zájmu
- Minimalizace kontrastu pozadí
- Robustnost, opakovatelnost výsledků měření (stále podmínky)
 - Odstranění nežádoucích faktorů
 - Okolní osvětlení



Osvětlení – cíle výběru

- Volba osvětlení vždy závisí na konkrétní úloze
- Výběr kamery a objektivu je "jednoduchý"
- Výběr osvětlení je "alchymie"

Osvětlení – jak vybrat

Tvar objektu

- Plochý / prostorový
- Rozdílné osvětlení blízkých a vzdálených částí

Barva objektu

- Stejná barva osvětlení zvýrazní
- Komplementární barva "kryje"
- UV, IR



Povrch objektu

- Matný
- Reflexní
- Průhledný
- Texturovaný

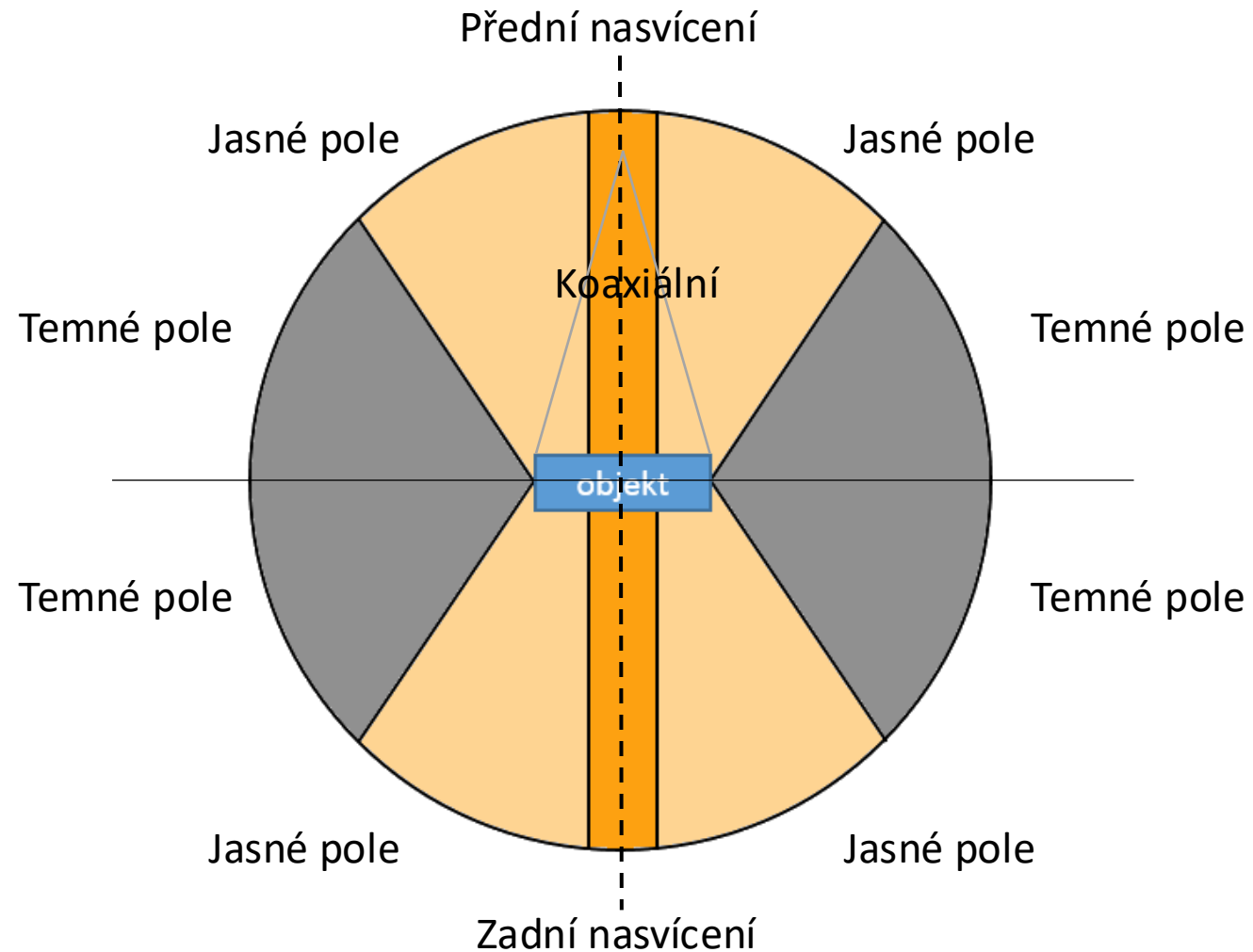
Velikost, umístění, pohyb objektu

- Velikost a vzdálenost od světla
- Integrace do stísněného prostoru
- Rychlost pohybu, zastavení

Osvětlení – parametry výběru

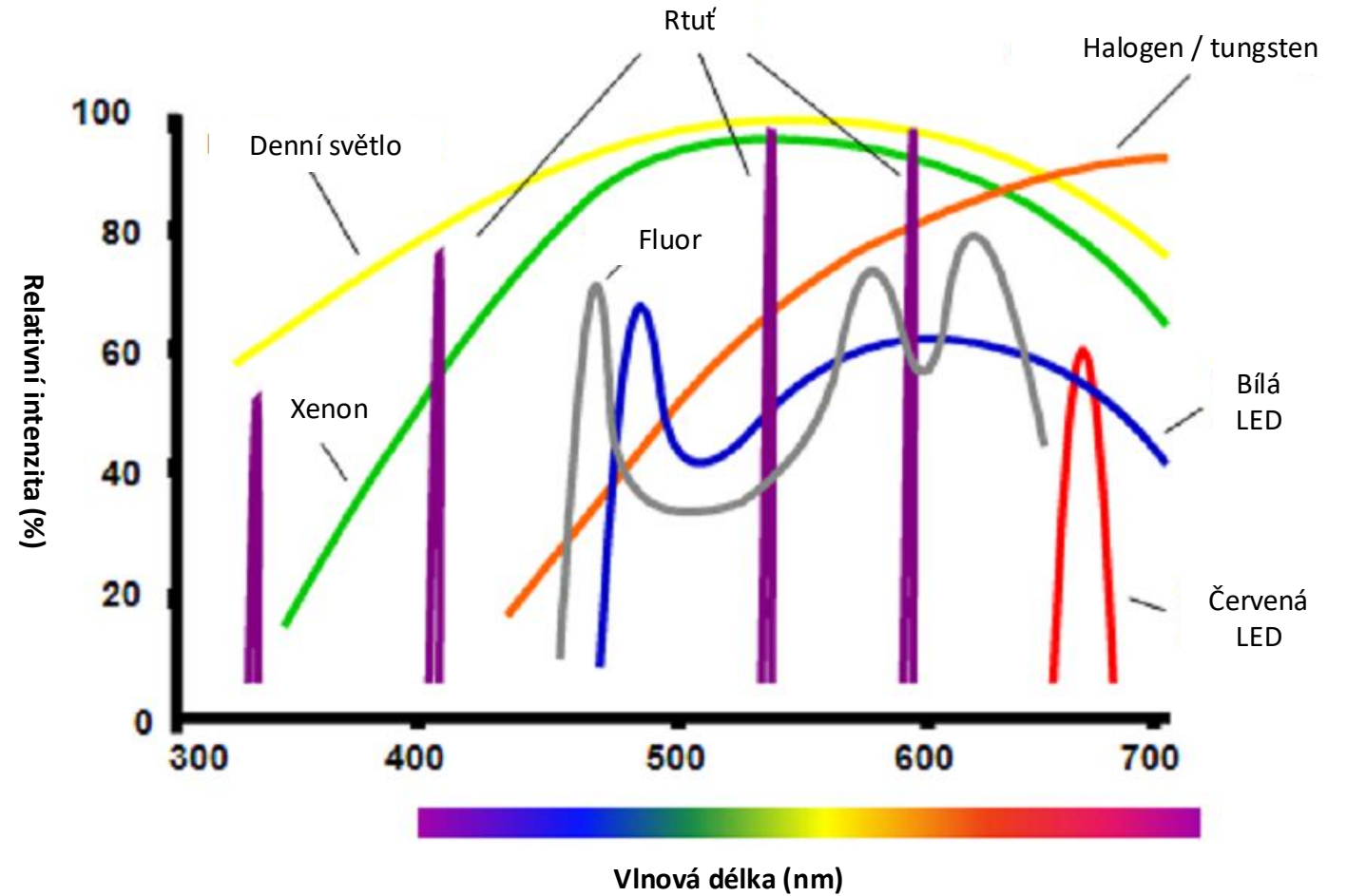
- Geometrie osvětlení
 - Jasně pole (Bright field)
 - Temné pole (Dark field)
 - Koaxiální (Coaxial)
 - Zadní (Back)
 - Bodové (Spot)
- Zdroj osvětlení
 - LED
 - Halogen
 - Fluor
- Vlnová délka

Osvětlení – geometrie



Osvětlení – zdroj světla

- Barevnost objektu
- Spektrální citlivost kamery
- Životnost a stálost
- Emise tepla



Osvětlení – zdroj světla

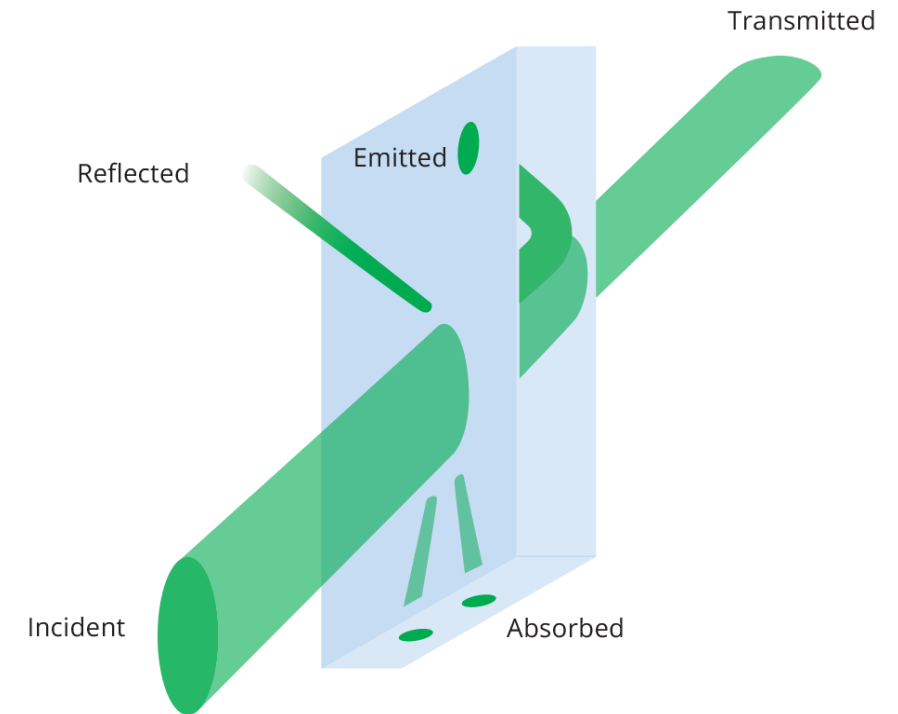
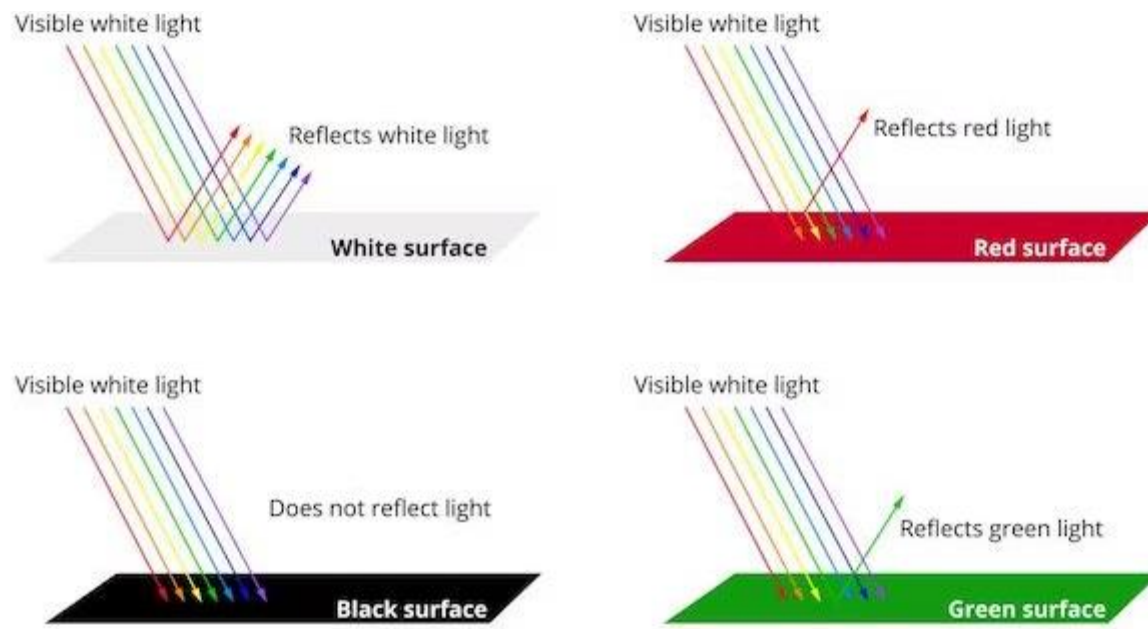
- Nejčastěji využívaný zdroj jsou LED světla
- LED **nejsou** přirozeným zdrojem bílého světla
- Způsoby vytvoření bílého LED světla
 - **Kombinace RGB LED** (červená, zelená, modrá) → výsledkem je bílé světlo
 - **Modrá nebo UV LED + žlutý fosforový povlak** → směs modré a žluté dává bílé světlo
 - Tento způsob je **nejběžnější** – nabízí **vyšší účinnost** a **lepší podání barev**
 - **Barevnou teplotu** lze měnit úpravou **vlnové délky LED**, složením a tloušťkou fosforu

Osvětlení – vlnová délka

- Polychromatické
 - Přirozené pro člověka
 - Vhodné pro barevné kamery
 - Přítomnost barevných vad optiky (aberrace)
 - Dražší objektivy pro korekci barevných vad optiky
- Monochromatické
 - Úzké pásmo vlnových délek
 - Zvýšení kontrastu
 - Eliminace barevné vady optiky

Osvětlení – vlnová délka

- Světlo může být materiálem:
 - **odraženo** a/nebo
 - **propouštěno** a/nebo
 - **pohlceno (absorbováno)**



Osvětlení – vlnová délka

- **Lom světla a vliv vlnové délky**

- Při přechodu mezi **různými médii** se světlo **láme** → mění směr (refrakce)
- **Kratší vlnové délky** (uv, modrá) se **více lámou a rozptylují**
- **Delší vlnové délky** (červená) se **méně odchylují** a šíří rovněji

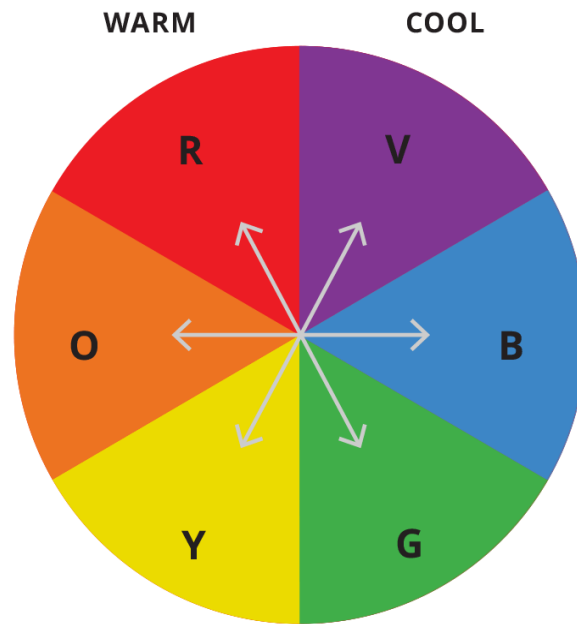
- **Praktické dopady ve strojovém vidění**

- **Modré světlo** → zvýrazňuje **povrchové vady** (škrábance, jemné textury)
- **Červené světlo** → lépe vykresluje **obrysy průhledných materiálů**
- **Volba vhodné vlnové délky** pomáhá zdůraznit požadované rysy a omezit šum

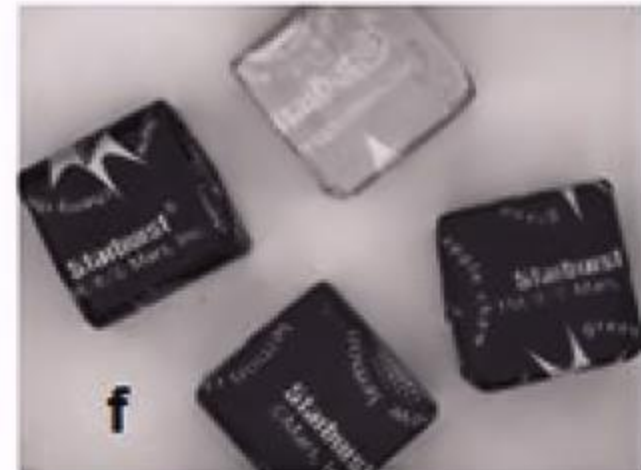
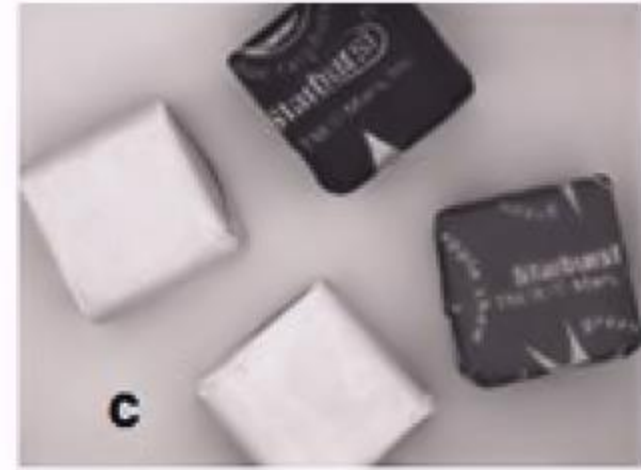
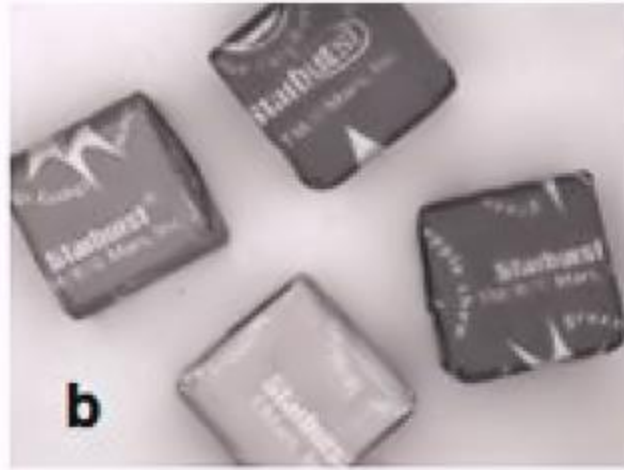
Osvětlení – vlnová délka

- **Vztah mezi vlnovou délkou a barvou objektu**

- Barva světla (vlnová délka) ovlivňuje, **jak se objekt jeví na snímáči**
- **Světlo stejné barvy jako objekt** → zvýrazní ho (je jasnější)
- **Světlo komplementární barvy** → potlačí ho (je tmavší)



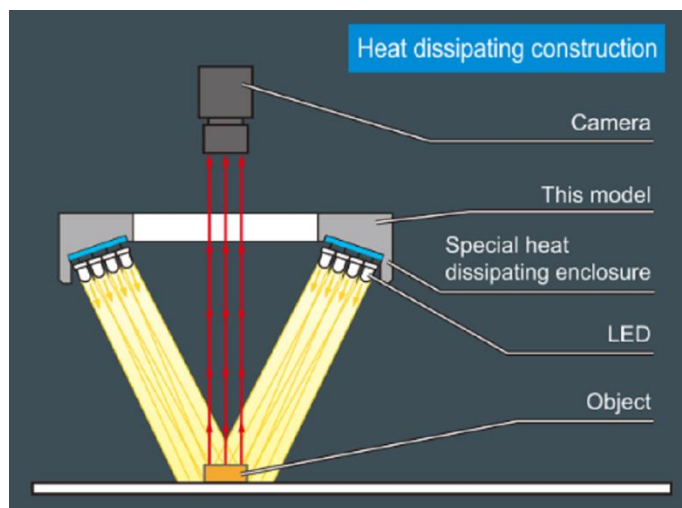
Osvětlení – jaká barva byla použita?



Osvětlení – směrové nebo difúzní

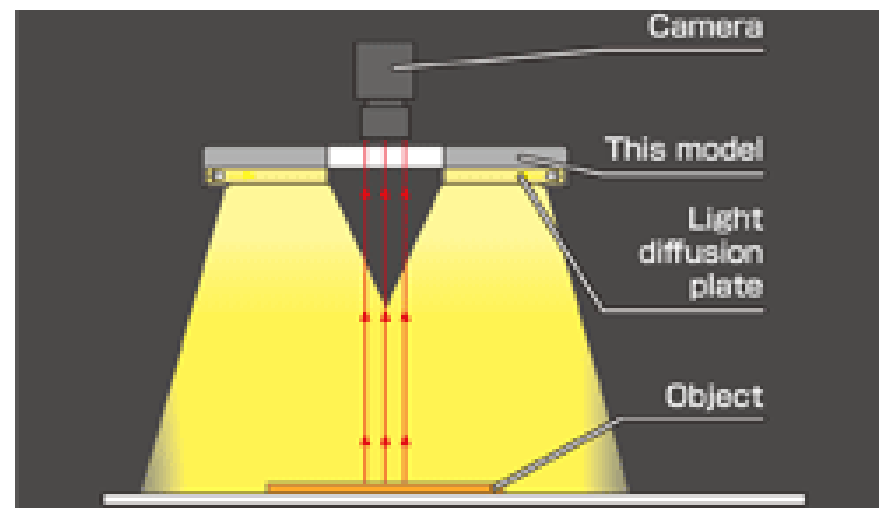
- Směrové

- Intenzivní přímé nasvícení
- Materiál s matným povrchem
- Zvýraznění prostorového uspořádání

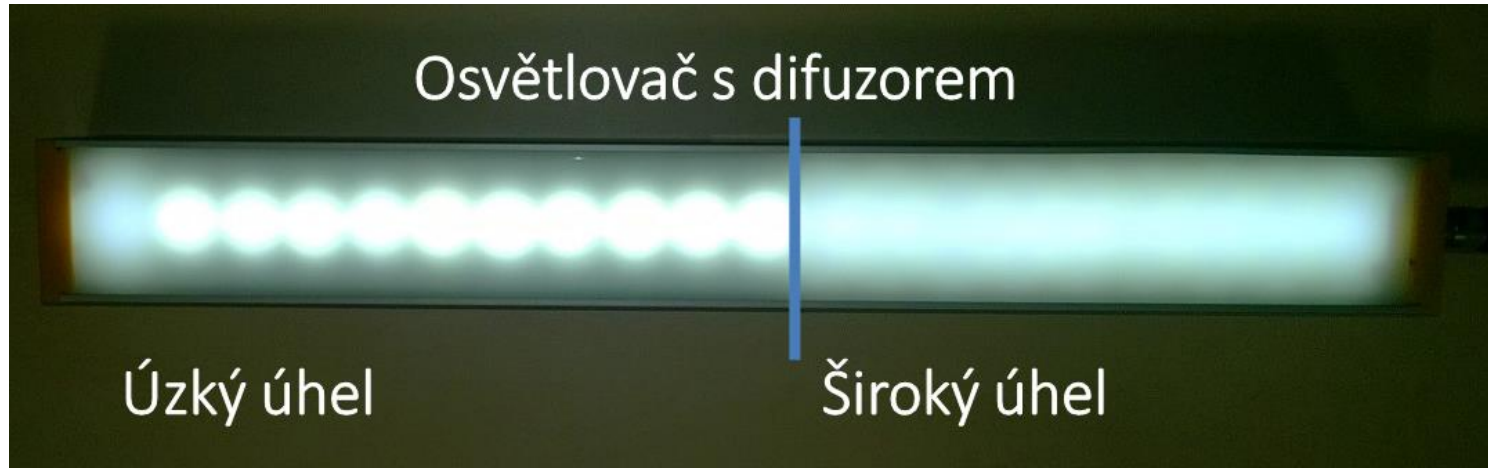


- Difúzní

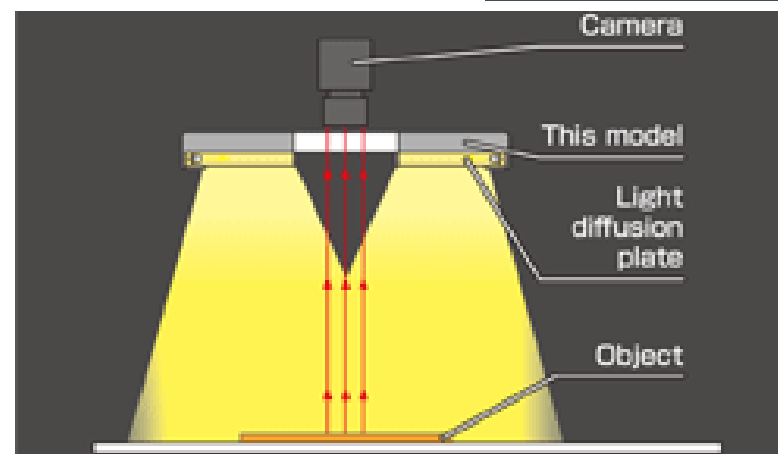
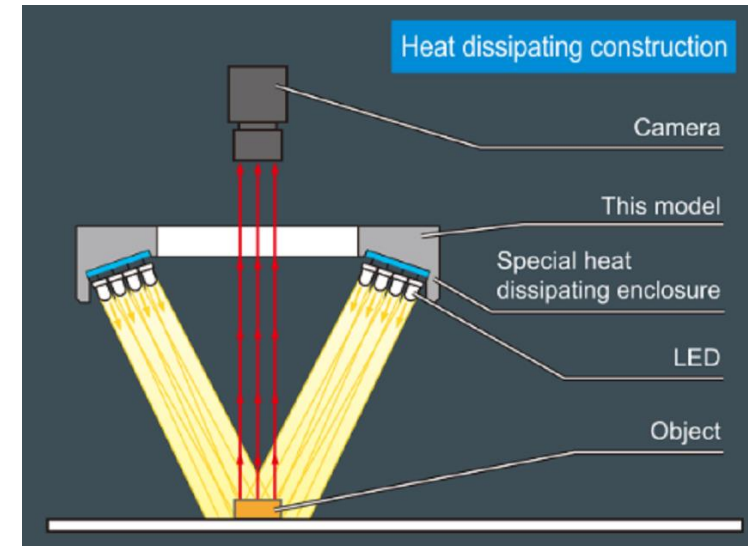
- Homogenní nepřímé nasvícení
- Materiál s lesklým i matným povrchem
- Skrytí prostorových prvků



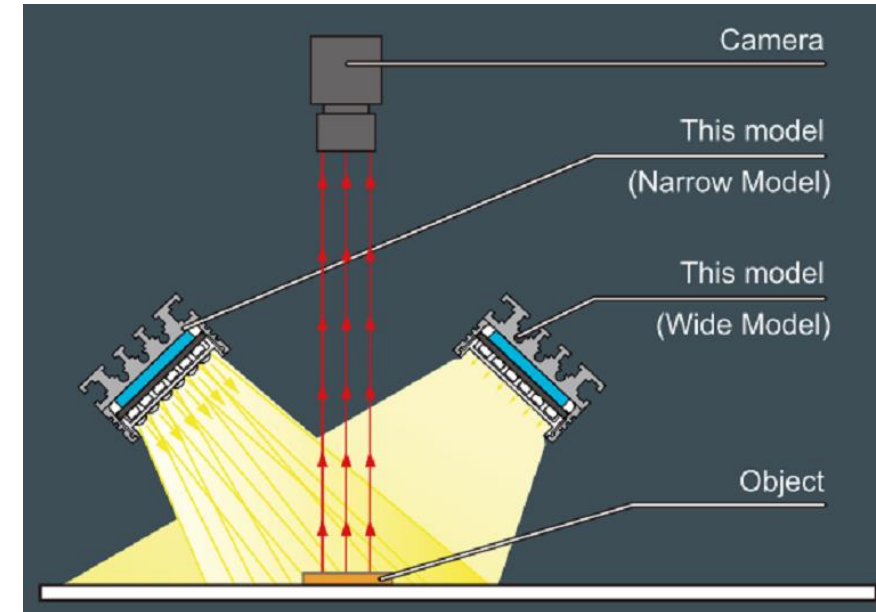
Osvětlení – vyzařovací úhel



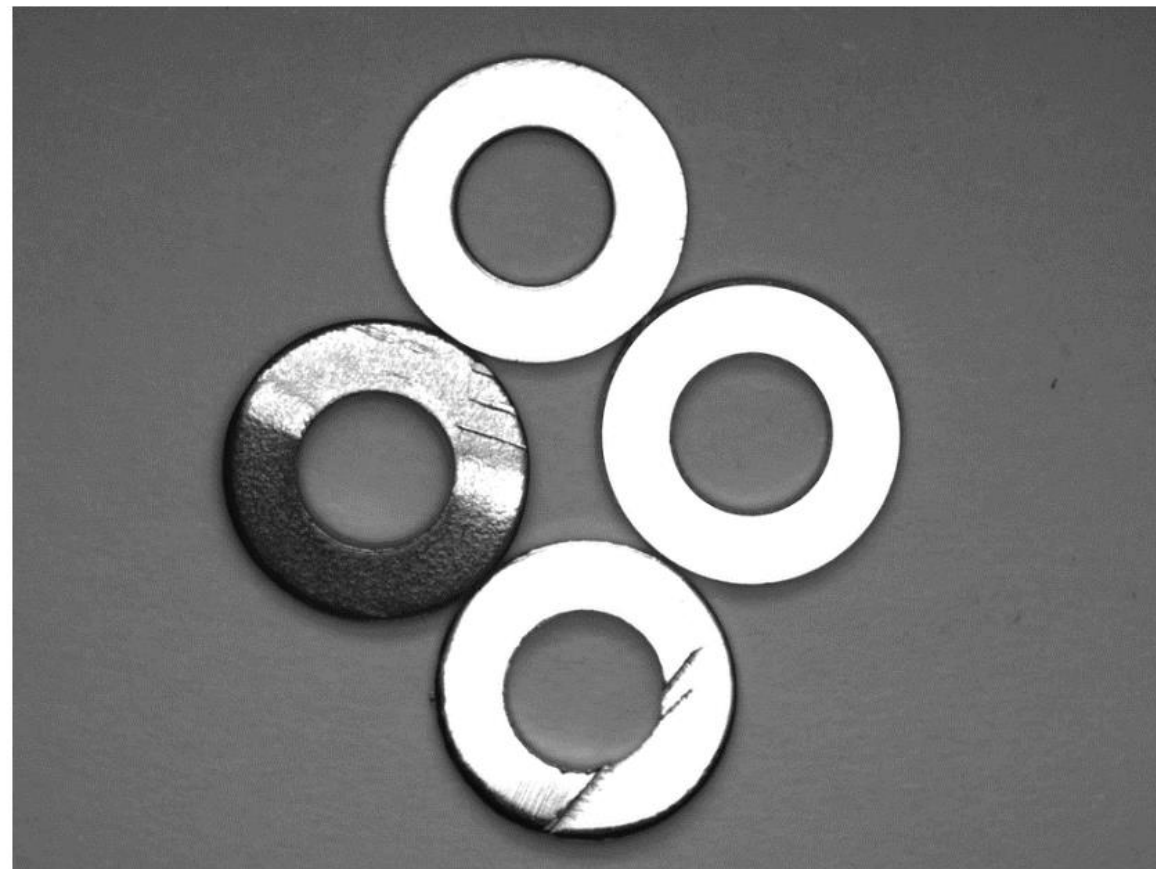
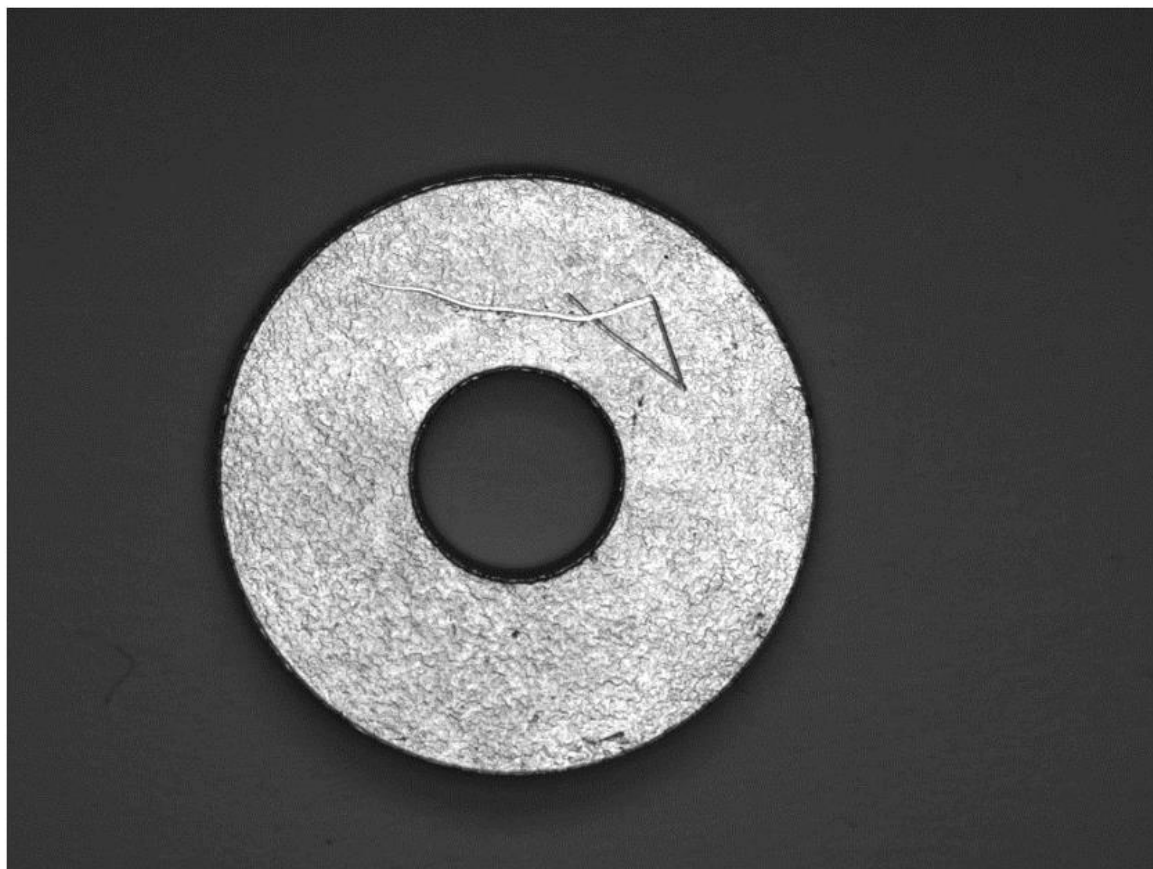
Osvětlení – přímé (ring)



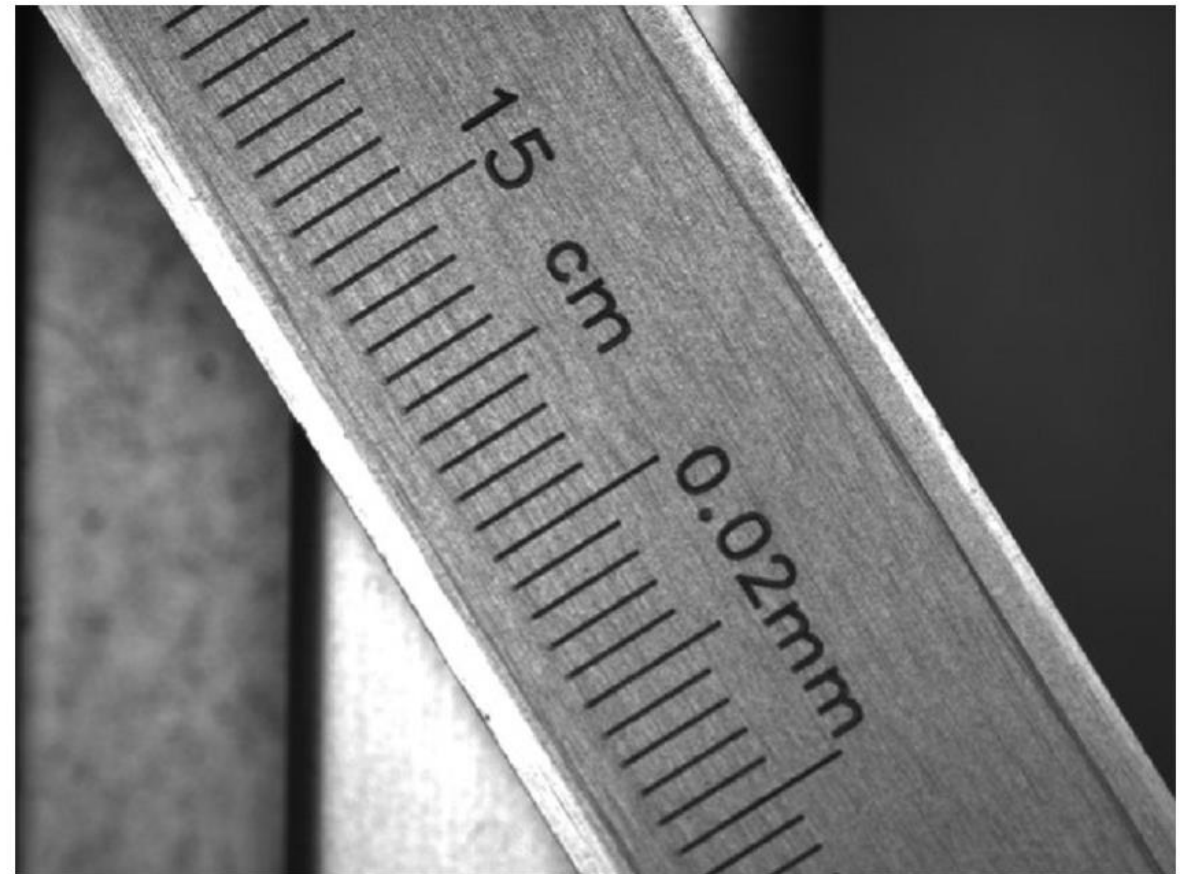
Osvětlení – přímé (bar, flat)



Osvětlení – defekty povrchů



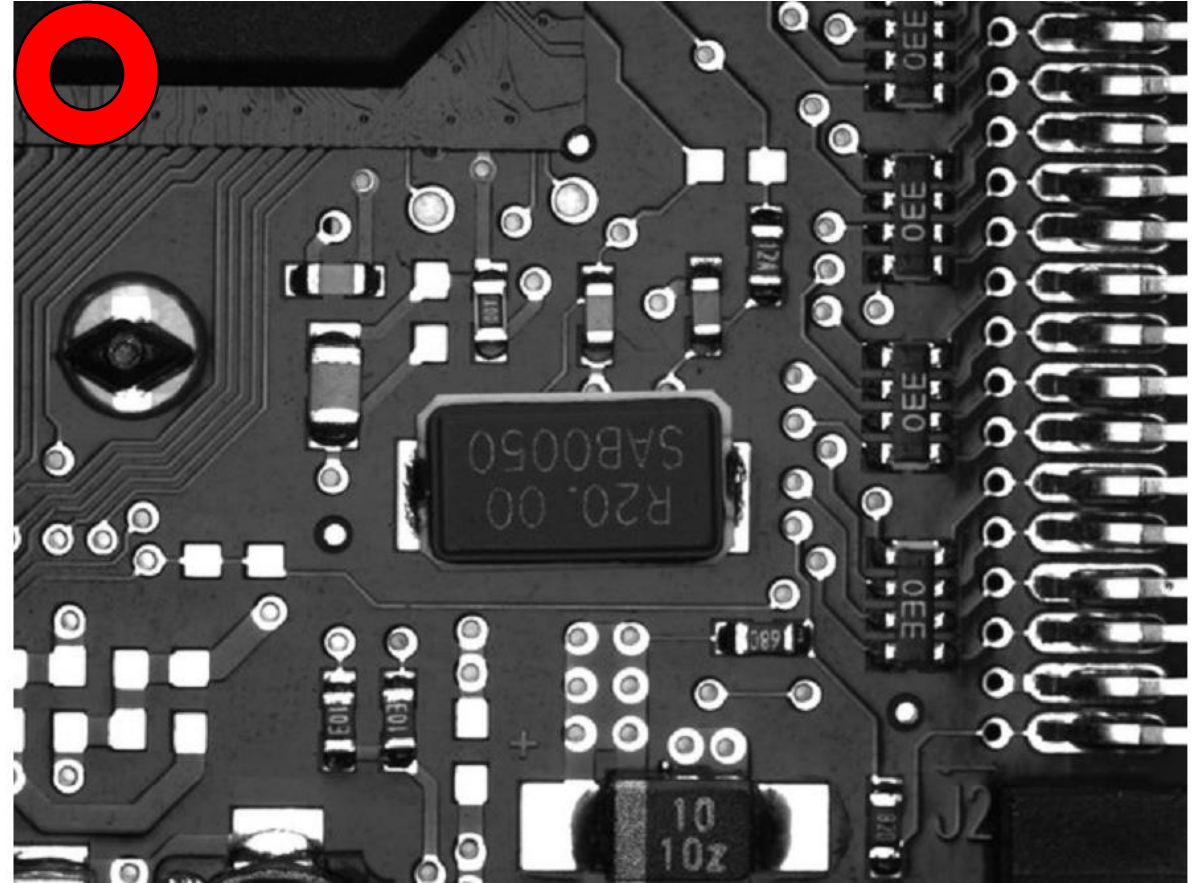
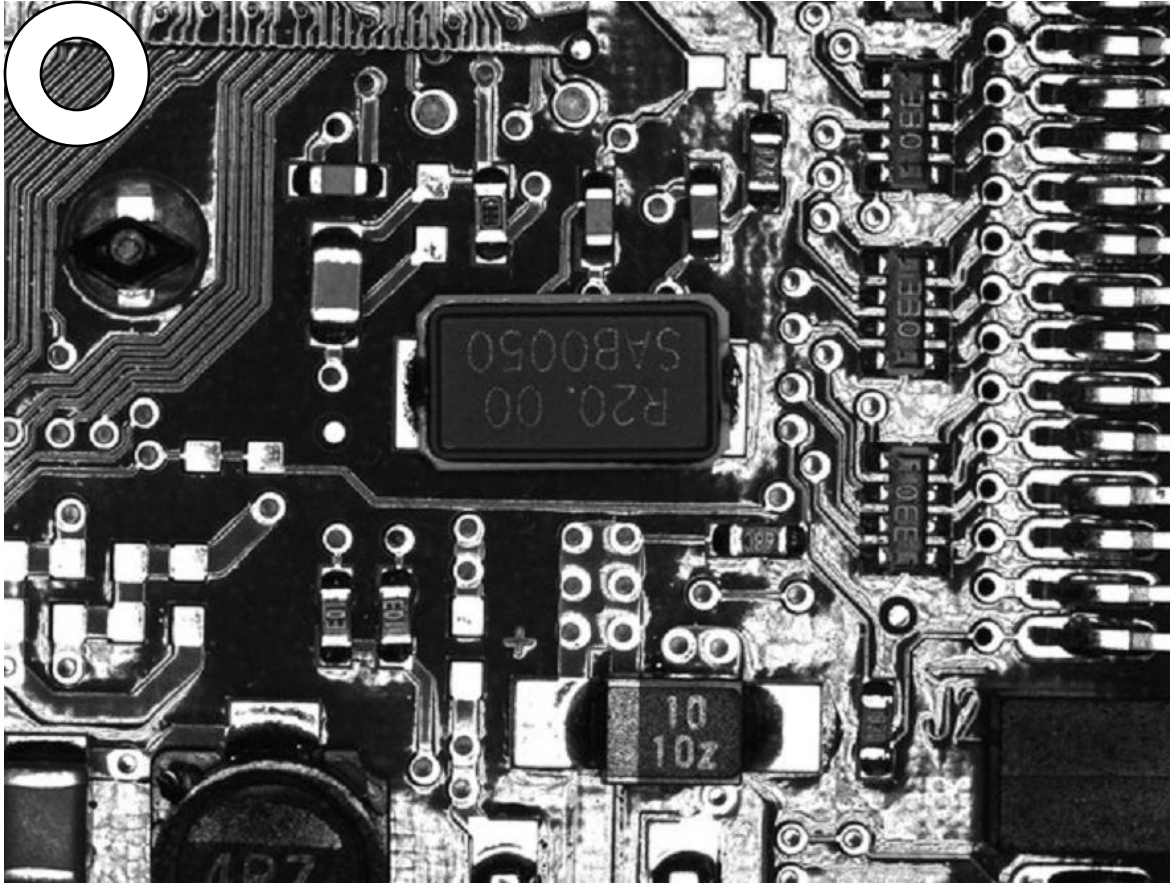
Osvětlení – inspekce potisků



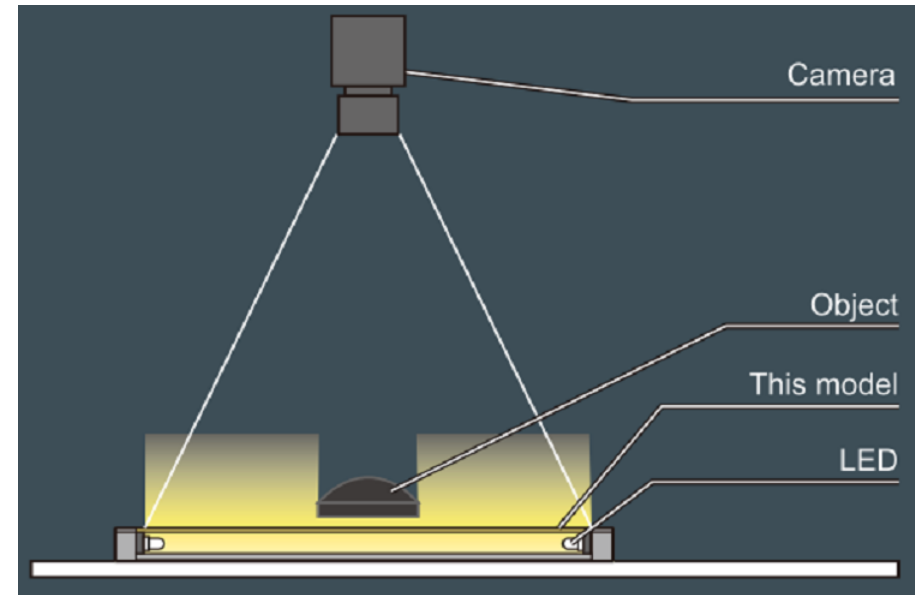
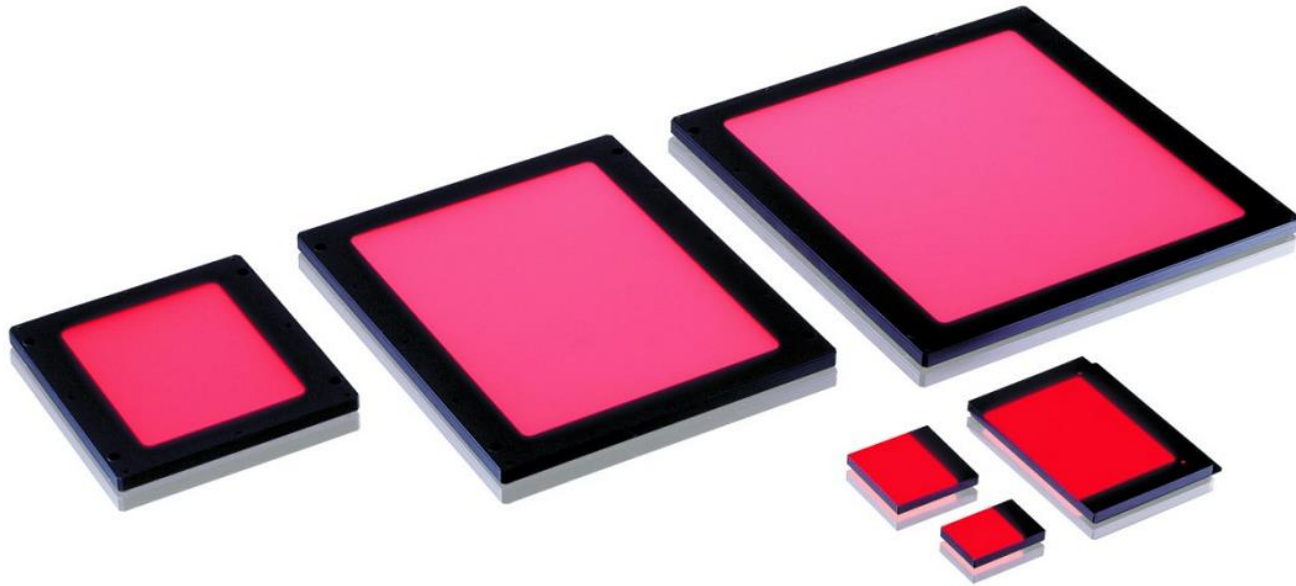
Osvětlení – inspekce pinů



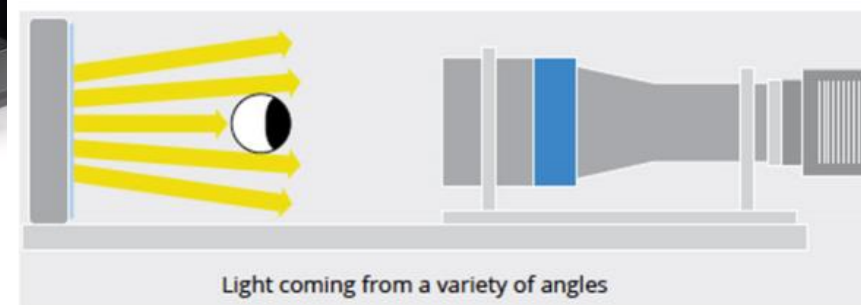
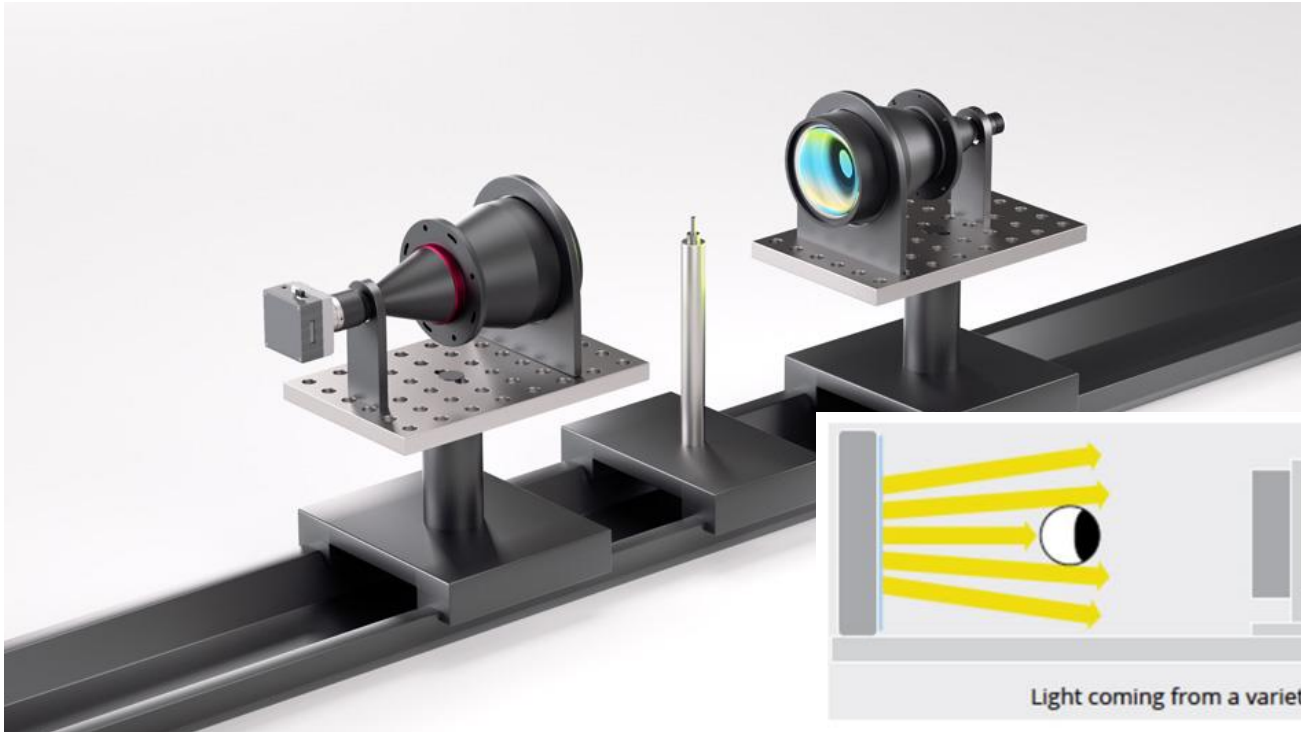
Osvětlení – inspekce plošných spojů



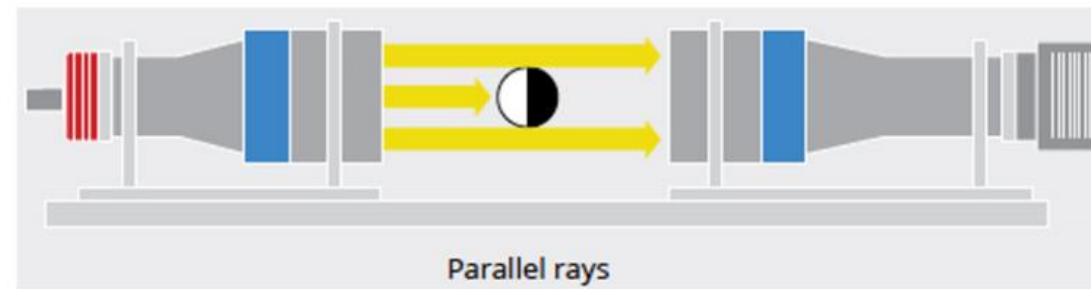
Osvětlení – zadní (back)



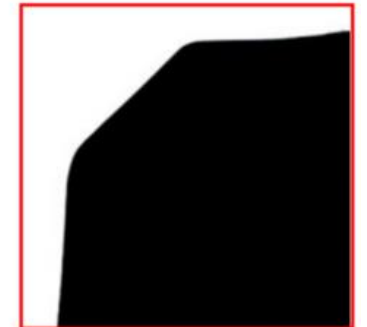
Osvětlení – zadní (telecentrické)



Light coming from a variety of angles



Parallel rays



Osvětlení - odělení od pozadí

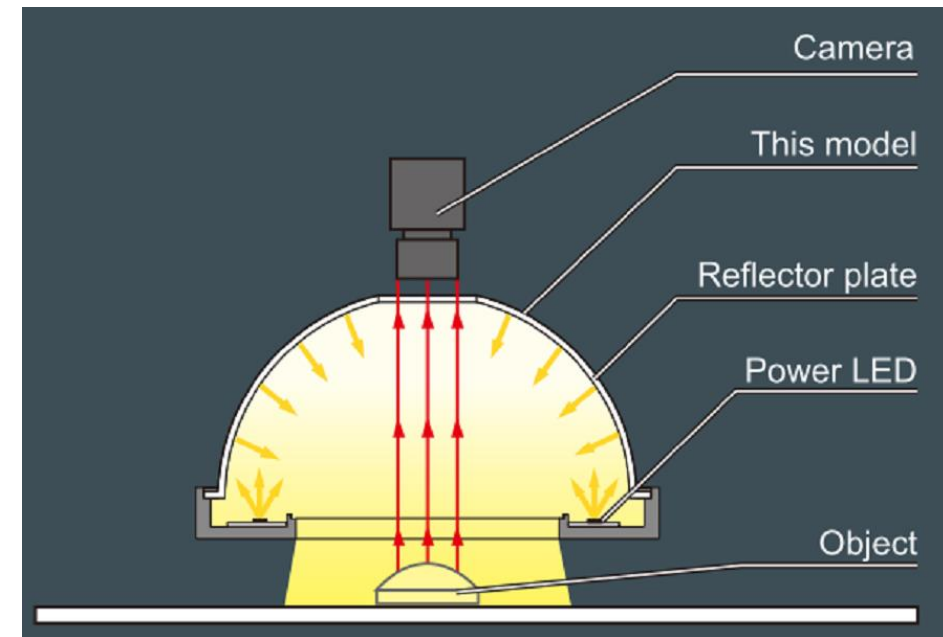


Zadní telecentrické

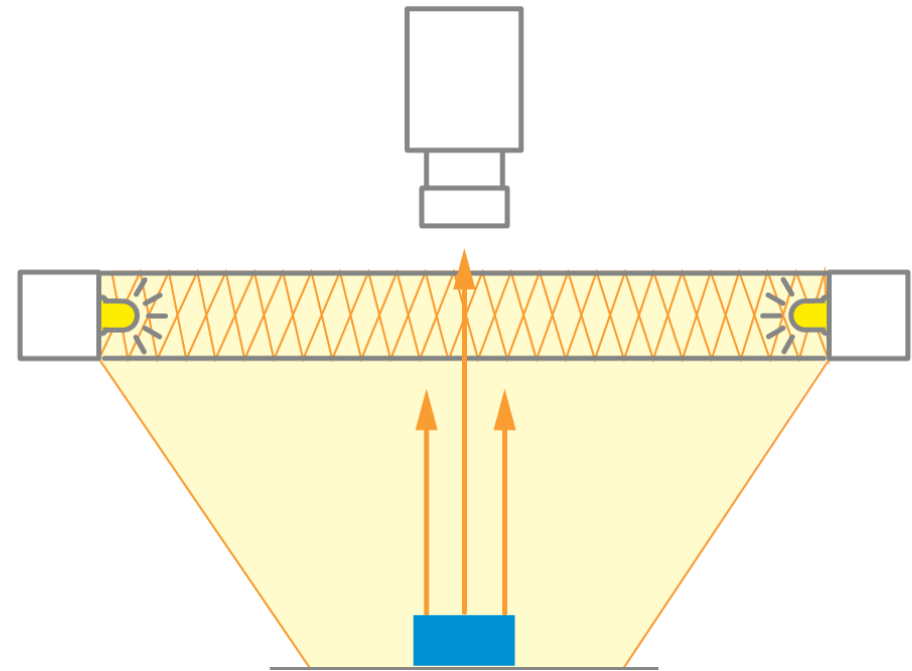
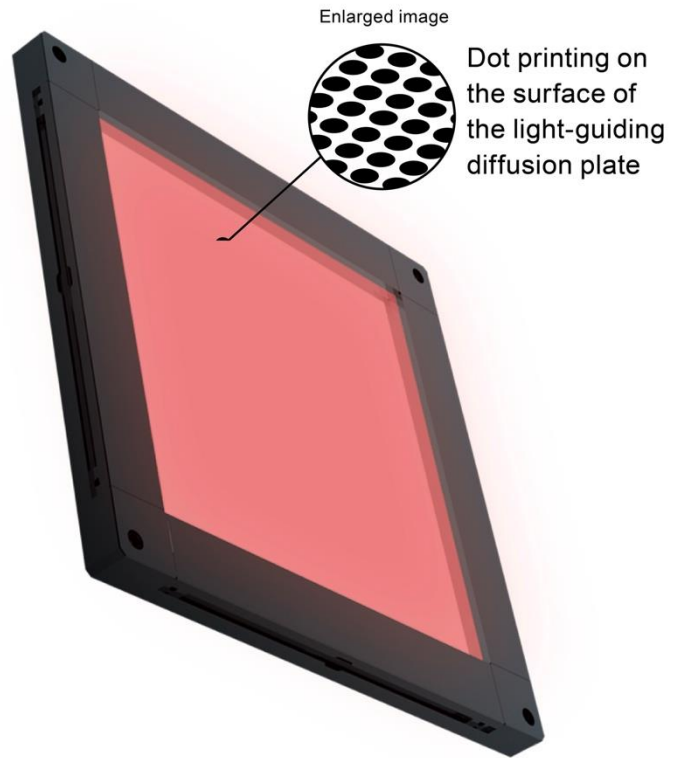


Zadní ne-telecentrické

Osvětlení – kopulové (dome)



Osvětlení – flat dome



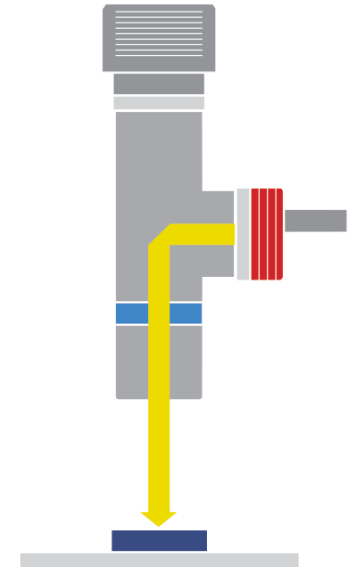
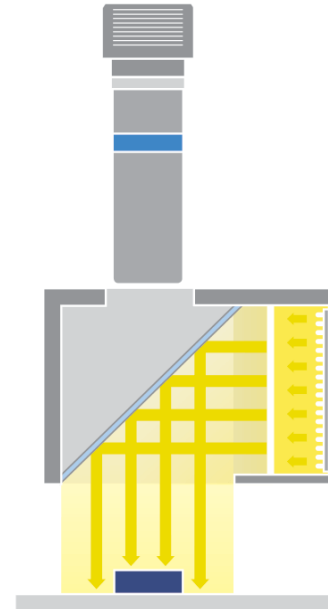
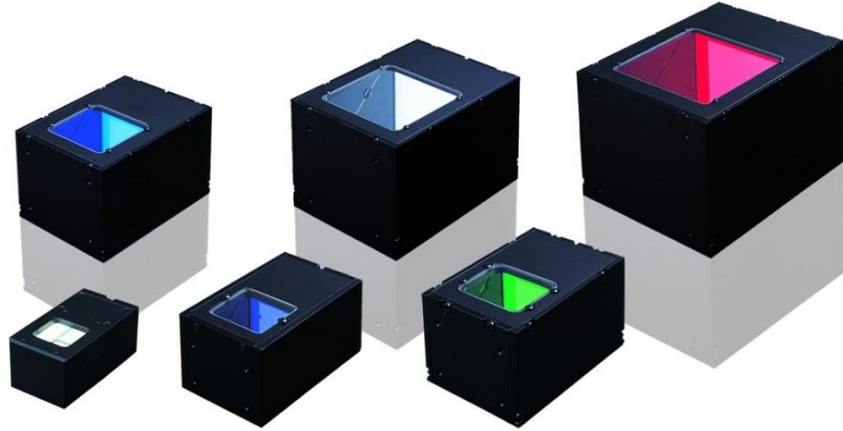
Osvětlení – lesklé povrchy (zaoblené)



Osvětlení – lesklé povrchy (obaly)

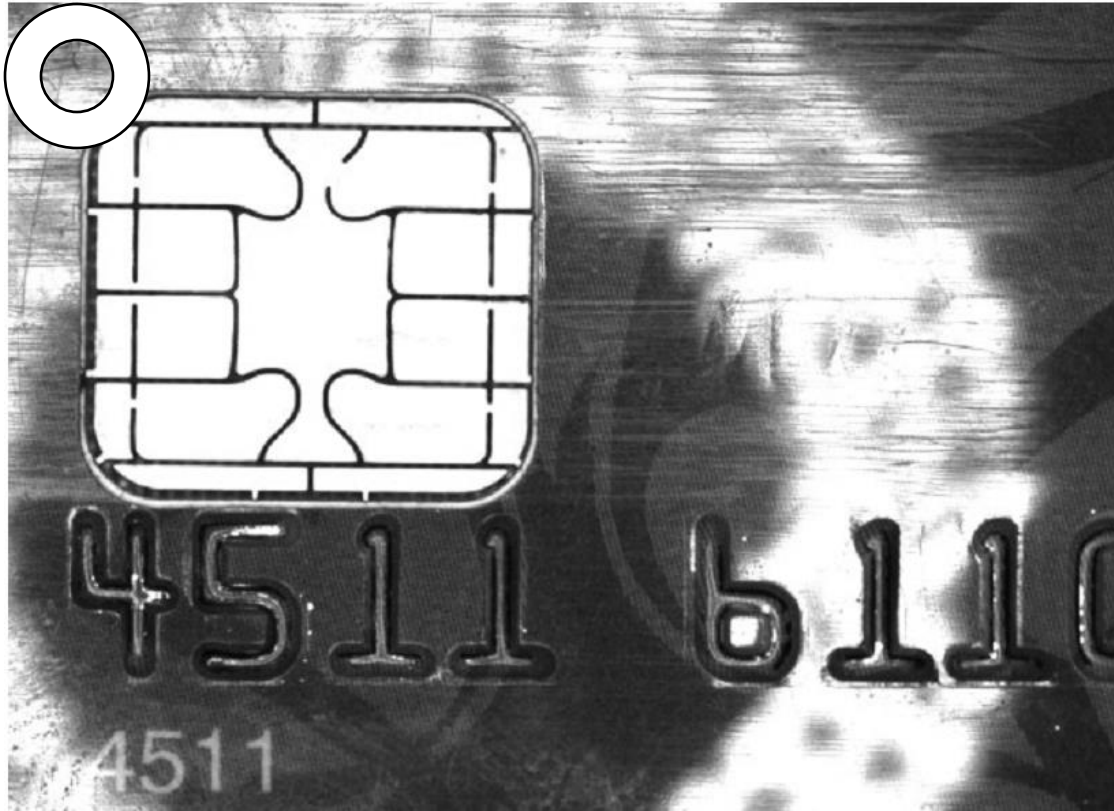


Osvětlení – koaxiální (doal)

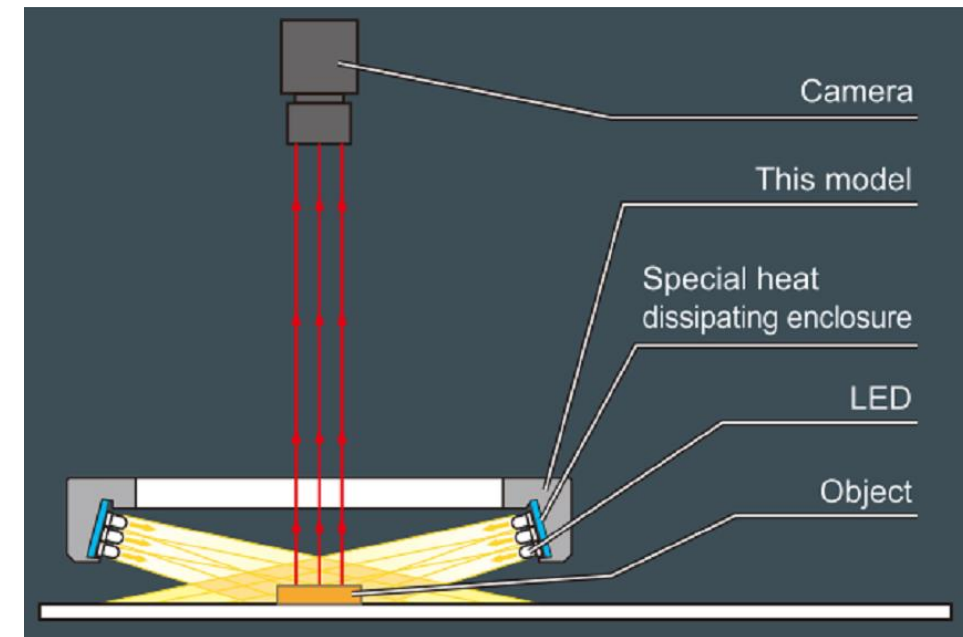


DOAL = Diffused On Axis Light

Osvětlení – reliéfy a hladké povrchy



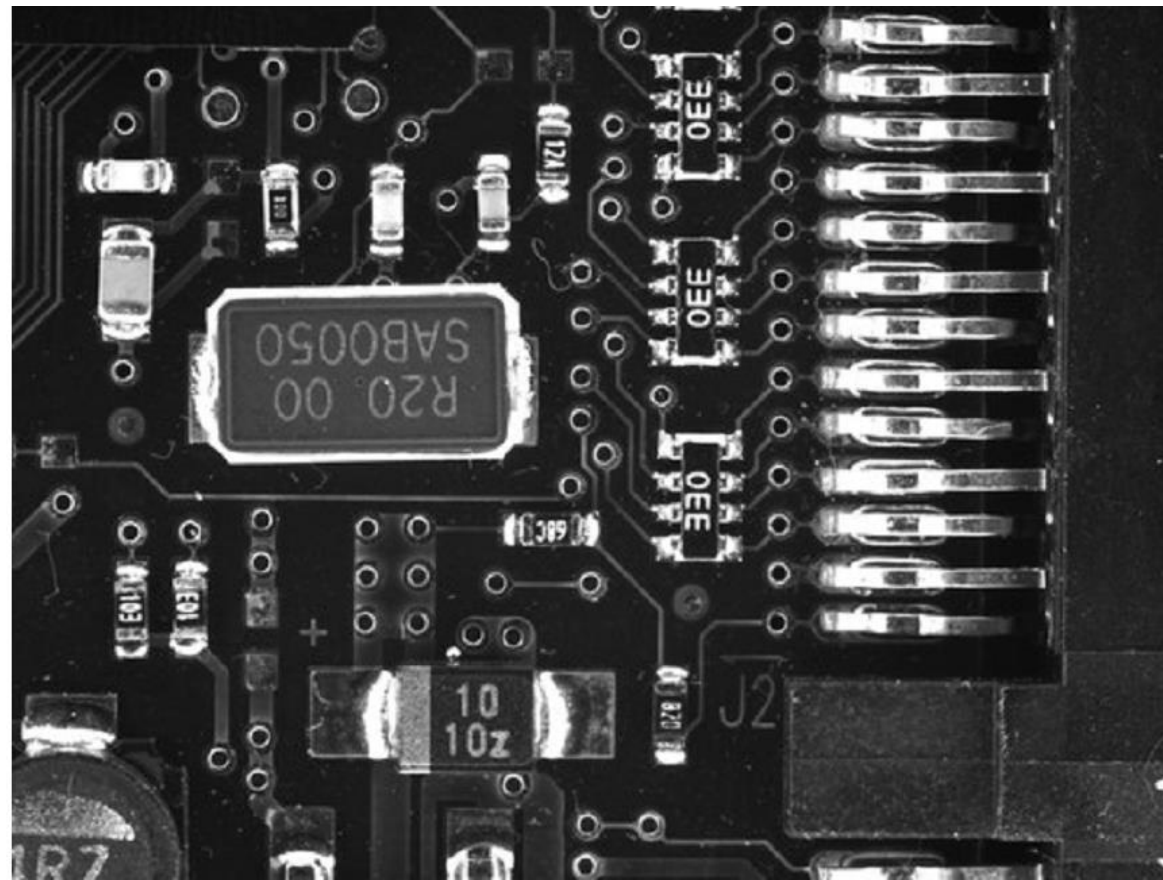
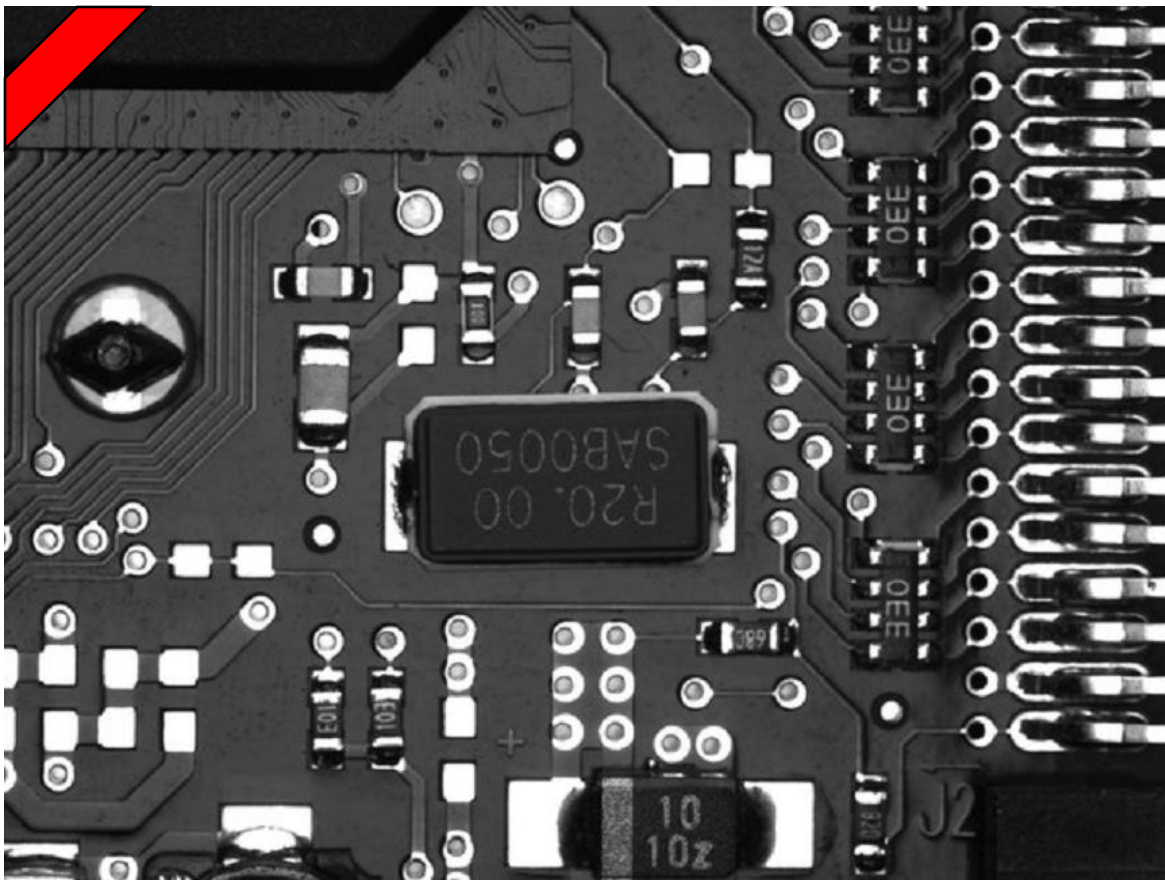
Osvětlení – temné pole (dark field)



Osvětlení – zvýraznění reliéfu



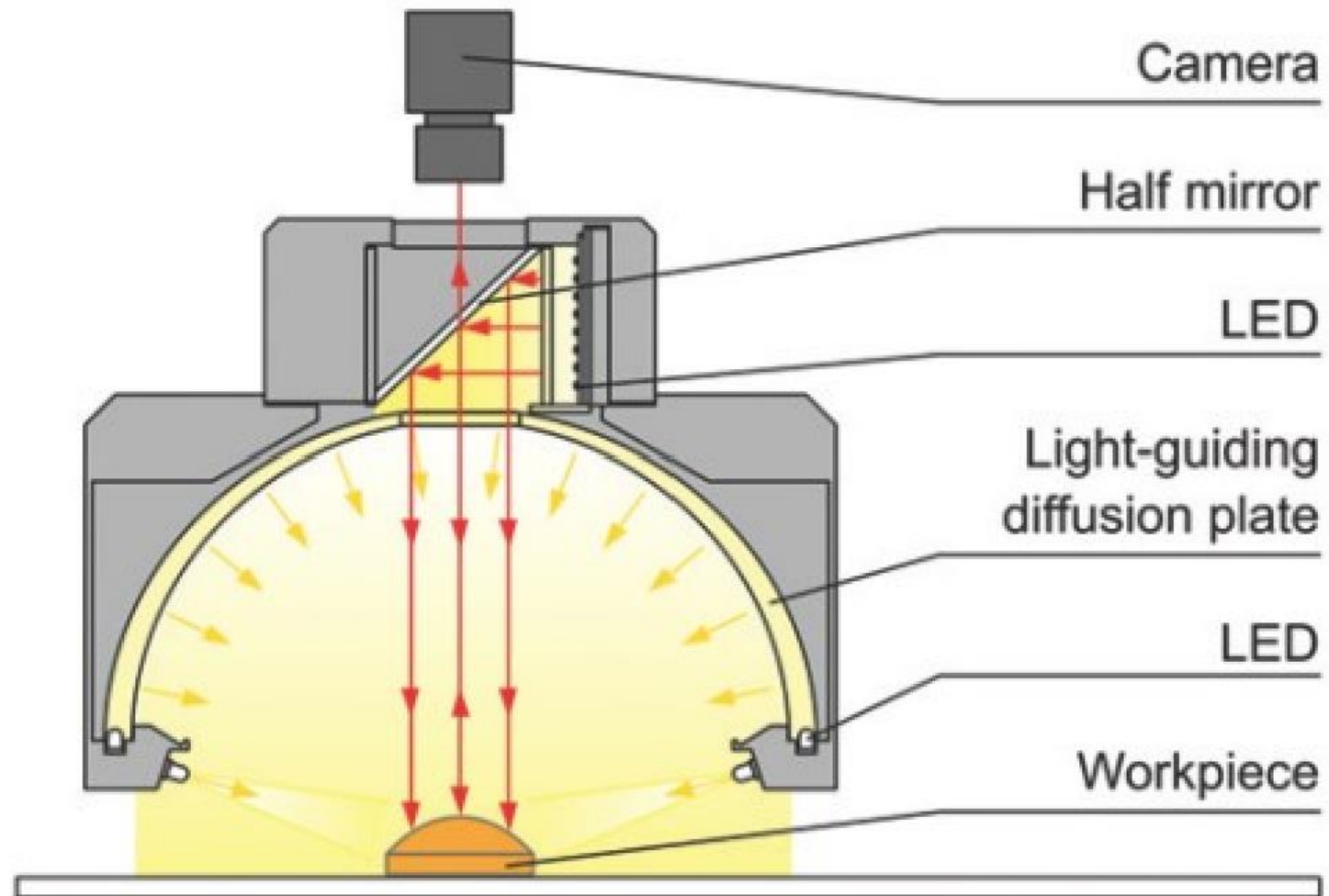
Osvětlení – plošné spoje



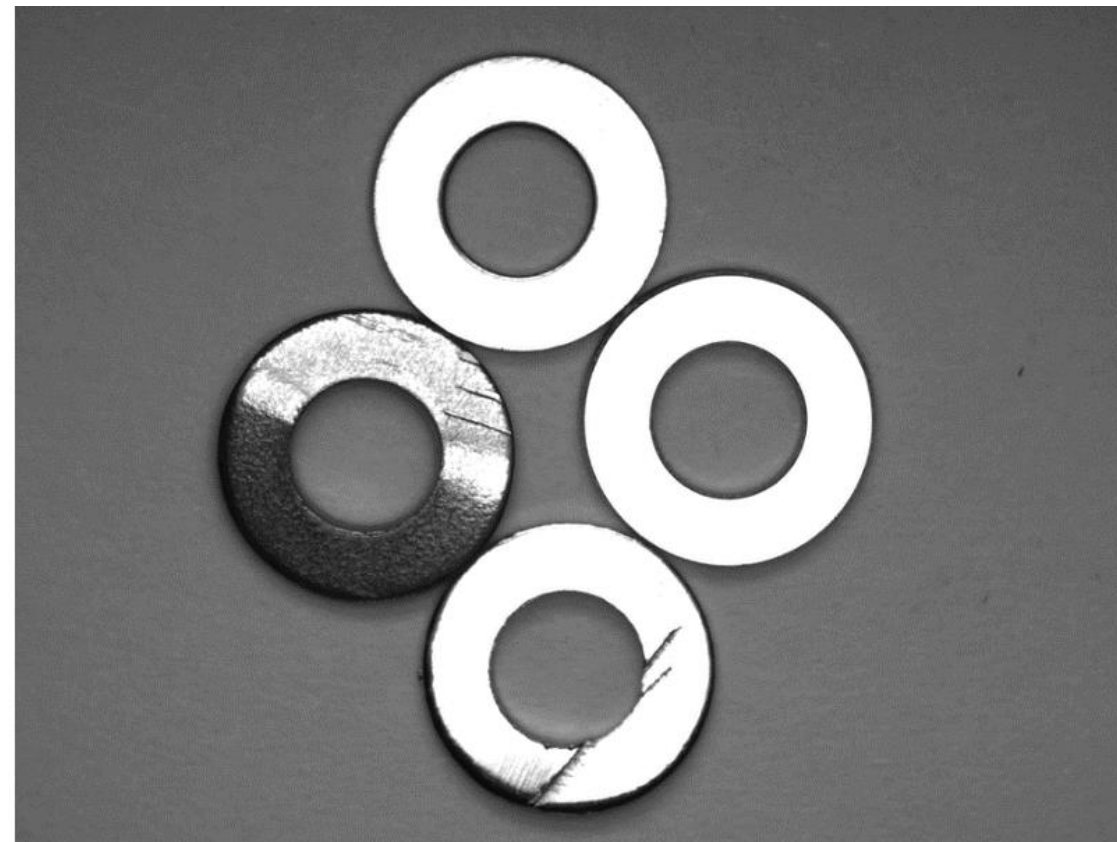
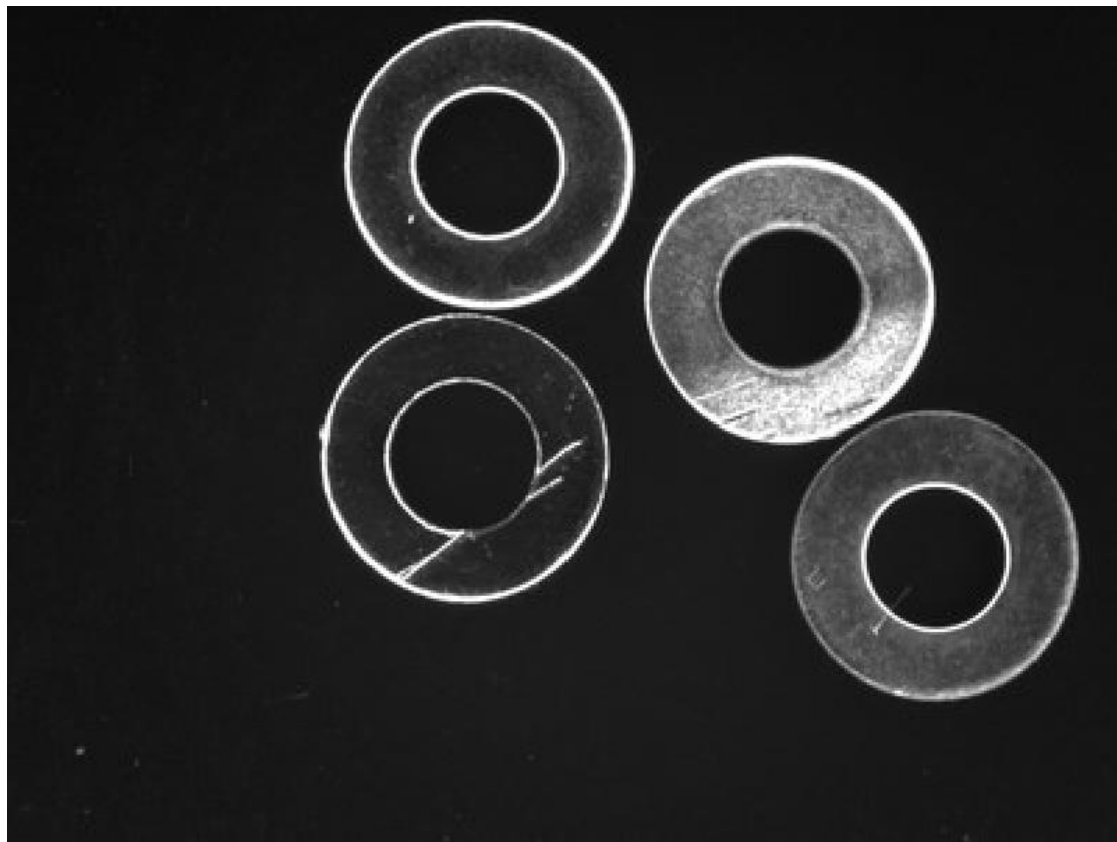
Osvětlení – reliéfy v transparentních materiálech



Osvětlení – kombinace



Osvětlení – detekce vad



Případová studie: Měření dílů

- **Modelové zadání**

- Plastový výlisek, rozměry 55 x 35 mm
- Měření rozměrů s přesností 0,05 mm
- Umístění kamery ve vzdálenosti 100 - 400 mm

- Objekt se pod kamerou může zastavit



Pozn. Dále závisí na barvě objektu, barvě pozadí, rychlosti pohybu dílu a mnoho dalších.

Výběr kamery – parametry výběru

- Závisí na úloze, která diktuje
 - Snímané spektrum - UV, IR, Mono, Multispektrální (barevné), Hyperspektrální
 - Typ senzoru (Maticový/Řádkový)
 - FPS/frekvence snímání řádku
 - Typ závěrky u maticových kamer
 - Rozlišení snímače
 - Komunikační rozhraní
 - Závisí na datovém toku
 - Kolik potřebujeme světla (velikost senzoru a pixelů)
 - Vysoká snímková frekvence -> málo světla -> větší pixely -> vyšší senzitivita
 - Rozpočet (cena kamery)
 - Mnoho dalších...
- Jak porovnat kamery* -> EMVA 1288 data uváděné výrobcem

*Pozn. Není dostačující porovnávat pouze snímač!

Výběr kamery – odhad rozlišení snímače

$$\text{rozlišení [px]} = \frac{\text{FOV[mm]}}{\frac{\text{přesnost [mm]}}{\text{Nyquistův faktor [px]}}}$$

- FOV
 - Velikost delší strany v **milimetrech**
- Přesnost
 - Přesnost měření / velikost nejmenší zájmové oblasti (škrábanec apod.)
- Nyquistův faktor
 - Vyplývá z [Nyquistova-Shanonova](#) teorému o vzorkování signálu
 - Typické hodnoty jsou 2,3,4 a víc
 - Uvádí kolik pixelů má zabírat **nejmenší zájmová oblast**

Výběr kamery – odhad rozlišení snímače

$$\text{rozlišení [px]} = \frac{\frac{55 \text{ mm}}{0,05 \text{ mm}}}{2 \text{ px}} = 2200 \text{ px}$$

- FOV = 55 mm
- Přesnost = 0,05 mm
- Nyquistův faktor = 2 px



Snímač musí mít alespoň 2200 px

Výběr kamery – konkrétní typy



Lucid Triton
[TRI051S-MC](#)

- Sony IMX547 CMOS
- Globalní
- 8.8 mm (Type 1/1.8")
- 2448 x 2048 px, 5.0 MP
- 2.74 μm (H) x 2.74 μm (V)
- 22 FPS (24 FPS) @ 5 MP
- C-Mount
- GigE
- 530 €



Lucid Triton
[TRI050S-MC](#)

- Sony IMX264 CMOS
- Globalní
- 11.1 mm (Type 2/3")
- 2448 x 2048 px, 5.0 MP
- 3.45 μm (H) x 3.45 μm (V)
- 22 FPS (24 FPS) @ 5 MP
- C-Mount
- GigE
- 535 €



Lucid Triton
[TRI064S-MC](#)

- Sony IMX178 CMOS
- Rolling
- 8.92 mm (Type 1/1.8")
- 3072 x 2048 px, 6.3 MP
- 2.40 μm (H) x 2.40 μm (V)
- 17.7 FPS (19.5 FPS) @ 6.3 MP
- C-Mount
- GigE
- 390 €

Výběr kamery – EMVA 1288



Lucid Triton
[TRI051S-MC](#)

MONO EMVA 1288 RESULTS	
Dynamic Range	69.9 dB
SNR (Max)	39.8 dB
Saturation Capacity	9608 e ⁻
Absolute Sensitivity Threshold (Measured at 527.5nm)	4.29 γ
Temporal Dark Noise	2.48 e ⁻
Gain	0.41 DN / e ⁻
Dark Current	0.94 e ⁻ / s
Dark Signal Non-Uniformity	0.37 e ⁻
Photo Response Non-Uniformity	0.36 %
Linearity Error Max/Min	0.11/-0.23 %



Lucid Triton
[TRI050S-MC](#)

MONO EMVA 1288 RESULTS	
Dynamic Range	71.61 dB
SNR (Max)	40.23 dB
Saturation Capacity	10540 e ⁻
Absolute Sensitivity Threshold (Measured at 527.5nm)	3.99 γ
Temporal Dark Noise	2.13 e ⁻
Gain	0.37 DN / e ⁻
Dark Current	3.15 e ⁻ / s
Dark Signal Non-Uniformity	0.63 e ⁻
Photo Response Non-Uniformity	0.64 %
Linearity Error Max/Min	0.25 / -0.46 %



Lucid Triton
[TRI064S-MC](#)

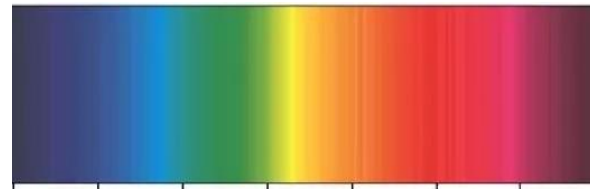
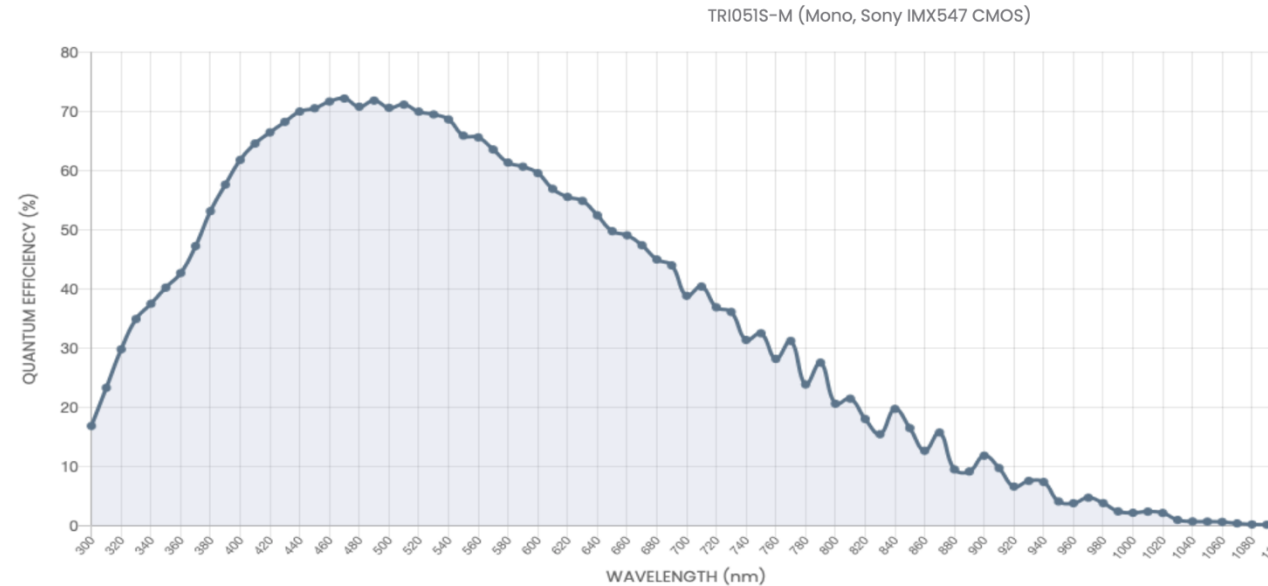
MONO EMVA 1288 RESULTS	
Dynamic Range	71.93 dB
SNR (Max)	41.61 dB
Saturation Capacity	14475 e ⁻
Absolute Sensitivity Threshold (Measured at 527.5nm)	4.57 γ
Temporal Dark Noise	2.98 e ⁻
Gain	0.27 DN / e ⁻
Dark Current	0.35 e ⁻ / s
Dark Signal Non-Uniformity	0.19 e ⁻
Photo Response Non-Uniformity	0.41 %
Linearity Error Max/Min	0.13/-0.25 %

Výběr kamery – TRI051S-MC



Lucid Triton TRI051S-MC

- Sony IMX547 CMOS
- Globalní
- 8.8 mm (Type 1/1.8")
- 2448 x 2048 px, 5.0 MP
- 2.74 μm (H) x 2.74 μm (V)
- 22 FPS (24 FPS) @ 5 MP
- C-Mount
- GigE
- 530 €



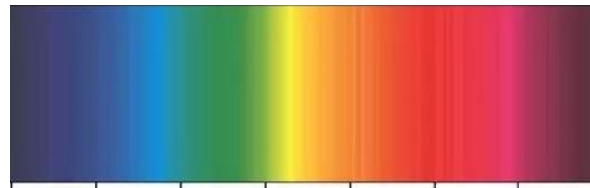
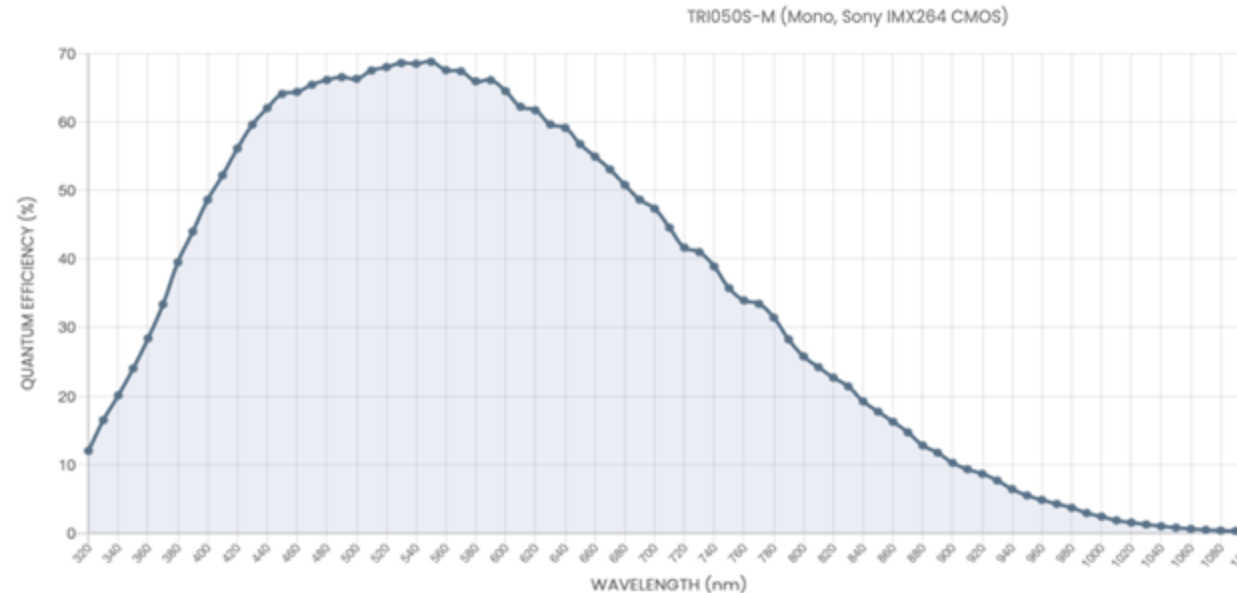
MONO EMVA 1288 RESULTS	
Dynamic Range	69.9 dB
SNR (Max)	39.8 dB
Saturation Capacity	9608 e ⁻
Absolute Sensitivity Threshold (Measured at 527.5nm)	4.29 γ
Temporal Dark Noise	2.48 e ⁻
Gain	0.41 DN / e ⁻
Dark Current	0.94 e ⁻ / s
Dark Signal Non-Uniformity	0.37 e ⁻
Photo Response Non-Uniformity	0.36 %
Linearity Error Max/Min	0.11/-0.23 %

Výběr kamery – TRI050S-MC



Lucid Triton TRI050S-MC

- Sony IMX264 CMOS
- Globalní
- 11.1 mm (Type 2/3")
- 2448 x 2048 px, 5.0 MP
- 3.45 μm (H) x 3.45 μm (V)
- 22 FPS (24 FPS) @ 5 MP
- C-Mount
- GigE
- 535 €



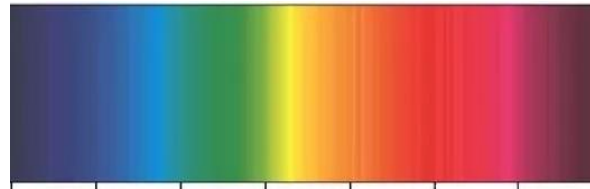
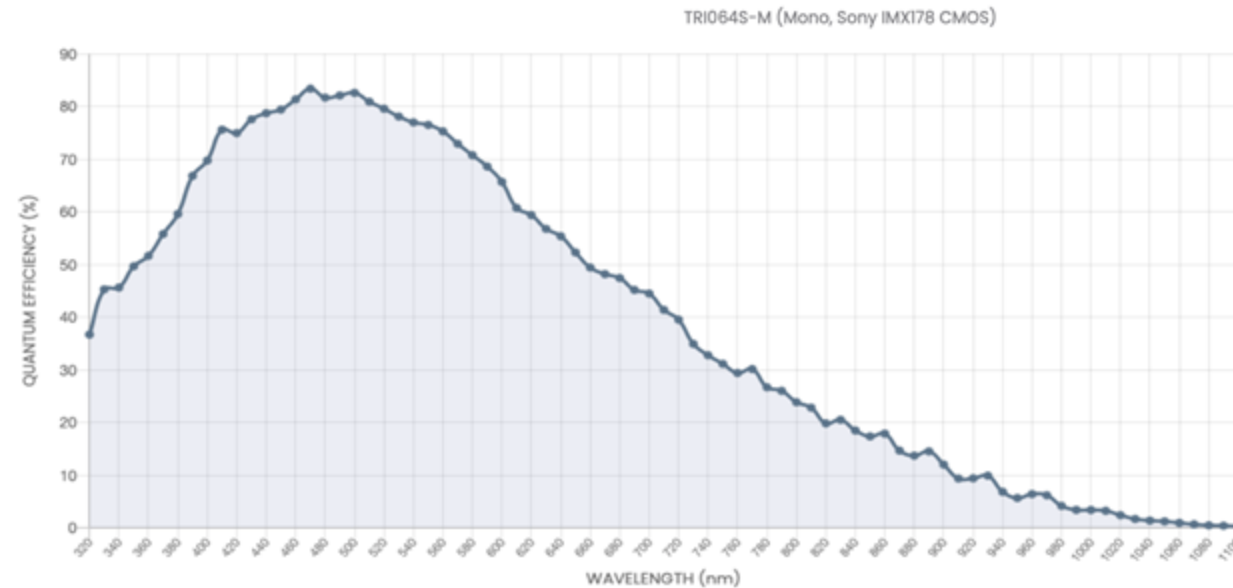
MONO EMVA 1288 RESULTS	
Dynamic Range	71.61 dB
SNR (Max)	40.23 dB
Saturation Capacity	10540 e-
Absolute Sensitivity Threshold (Measured at 527.5nm)	3.99 γ
Temporal Dark Noise	2.13 e-
Gain	0.37 DN / e-
Dark Current	3.15 e- / s
Dark Signal Non-Uniformity	0.63 e-
Photo Response Non-Uniformity	0.64 %
Linearity Error Max/Min	0.25 / -0.46 %

Výběr kamery – [TRI064S-MC](#)



Lucid Triton [TRI064S-MC](#)

- Sony IMX178 CMOS
- Rolling
- 8.92 mm (Type 1/1.8")
- 3072 x 2048 px, 6.3 MP
- 2.40 μm (H) x 2.40 μm (V)
- 17.7 FPS (19.5 FPS) @ 6.3 MP
- C-Mount
- GigE
- 390 €



MONO EMVA 1288 RESULTS

Dynamic Range	71.93 dB
SNR (Max)	41.61 dB
Saturation Capacity	14475 e-
Absolute Sensitivity Threshold (Measured at 527.5nm)	4.57 γ
Temporal Dark Noise	2.98 e-
Gain	0.27 DN / e-
Dark Current	0.35 e- / s
Dark Signal Non-Uniformity	0.19 e-
Photo Response Non-Uniformity	0.41 %
Linearity Error Max/Min	0.13/-0.25 %

Výběr kamery – verdikt



Lucid Triton
[TRI051S-MC](#)

- Sony IMX547 CMOS
- Globalní
- 8.8 mm (Type 1/1.8")
- 2448 x 2048 px, 5.0 MP
- 2.74 μm (H) x 2.74 μm (V)
- 22 FPS (24 FPS) @ 5 MP
- C-Mount
- GigE
- 530 €



Lucid Triton
[TRI050S-MC](#)

- Sony IMX264 CMOS
- Globalní
- 11.1 mm (Type 2/3")
- 2448 x 2048 px, 5.0 MP
- 3.45 μm (H) x 3.45 μm (V)
- 22 FPS (24 FPS) @ 5 MP
- C-Mount
- GigE
- 535 €



Lucid Triton
[TRI064S-MC](#)

- Sony IMX178 CMOS
- Rolling
- 8.92 mm (Type 1/1.8")
- 3072 x 2048 px, 6.3 MP
- 2.40 μm (H) x 2.40 μm (V)
- 17.7 FPS (19.5 FPS) @ 6.3 MP
- C-Mount
- GigE
- 390 €

Výběr kamery – zdůvodnění



Lucid Triton

[TRI064S-MC](#)

- Sony IMX178 CMOS
- Rolling
- 8.92 mm (Type 1/1.8")
- 3072 x 2048 px, 6.3 MP
- 2.40 μm (H) x 2.40 μm (V)
- 17.7 FPS (19.5 FPS) @ 6.3 MP
- C-Mount
- GigE
- 390 €

- Na úlohu **není** potřeba globální závěrka
- Menší pixely, ale!
 - vyšší SNR, dynamický rozsah, saturační kapacita
- Vysoká QE pro modrou (pro 470nm - 83,38%)
- Menší cena

Pozn. Pokud by byla nutná globální závěrka, je lepší volba [TRI050S-MC](#)

Výběr kamery – teoretická přesnost

- Velikost objektu na pixel

- $velikost\ objektu\ na\ pixel = \frac{1,1 \cdot 55\ mm}{3072\ px} = \frac{60,5\ mm}{3072\ px} = \mathbf{0,0197\ mm \cdot px^{-1}}$

- Přesnost

- $Nyquistův\ faktor\ [px] \cdot velikost\ objektu\ na\ pixel\ [mm \cdot px^{-1}]$
 - $2\ px \cdot 0,0197\ mm \cdot px^{-1} = \mathbf{0,0393\ mm}$
 - Jedná se o teoreticky dosažitelné hodnoty, dále ovlivněny
 - Výběrem optiky – aberace, difrakce, distorze, ...

Případová studie: Zadání měření dílů

- **Modelové zadání**

- Plastový výlisek, rozměry 55 x 35 mm
- Měření rozměrů s přesností 0,05 mm
- Umístění kamery ve vzdálenosti 100 - 400 mm

- Objekt se pod kamerou může zastavit



Pozn. Dále závisí na barvě objektu, barvě pozadí, rychlosti pohybu dílu a mnoho dalších.

Výběr optiky – parametry výběru

- Typ objektivu
 - Entocentrický
 - Telecentrický
 - Mnoho dalších...
- Ohnisková vzdálenost
- Pracovní vzdálenost
- Clonové číslo
 - Potřebná hloubka ostrosti
 - Množství světla
- Závit
- Velikost snímače/velikost pixelů
- Snímané spektrum
- Typ snímače
 - Maticový/Rádkový

Výběr optiky – volba pracovní vzdálenosti

- Chceme: Maximalizovat obrazovou kvalitu při minimalizaci ceny objektivu
- Vždy je potřeba respektovat minimální pracovní vzdálenost objektivu!
- Často diktuje samotná úloha
- Nepsané pravidlo [Edmund Optics](#) pro pracovní vzdálenost
 - Poměr pracovní vzdáleností a velikostí objektu jsou v poměru $4:1$ ($2:1$)
 - Mějme ohniskovou vzdálenost f
 - Objektiv s výrazně menší ohniskovou vzdáleností bude dražší
 - Jsme moc blízko => Je složitější vyrobit objektiv bez vad optiky
 - Objektiv s výrazně větší ohniskovou vzdáleností bude dražší
 - Jsme moc daleko => Máme méně světla apod.

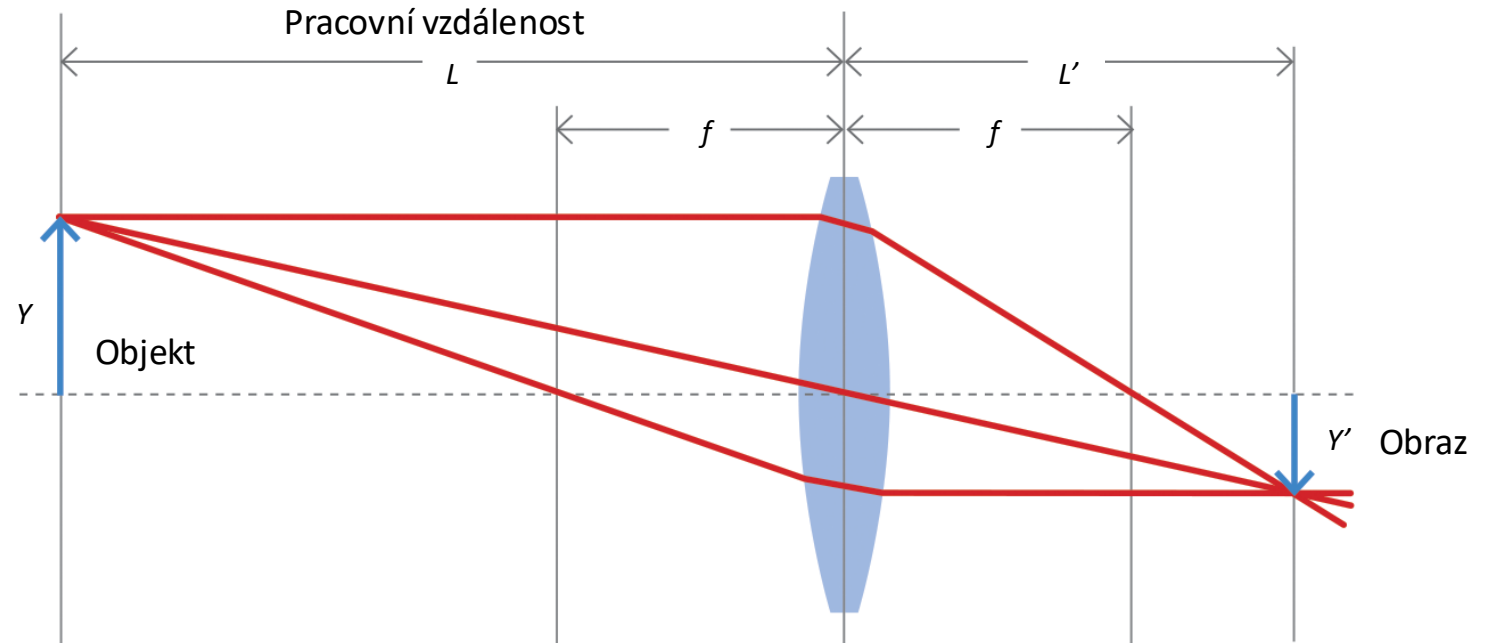
Výběr optiky – odhad ohniskové vzdálenosti

- Thin lens rovnice

- $\frac{1}{f} = \frac{1}{L} + \frac{1}{L'}$

- f a L' jsou neznámé
- Musíme zjistit zvětšení (magnifikaci)

- $M = -\frac{L'}{L} = \frac{Y'}{Y}$



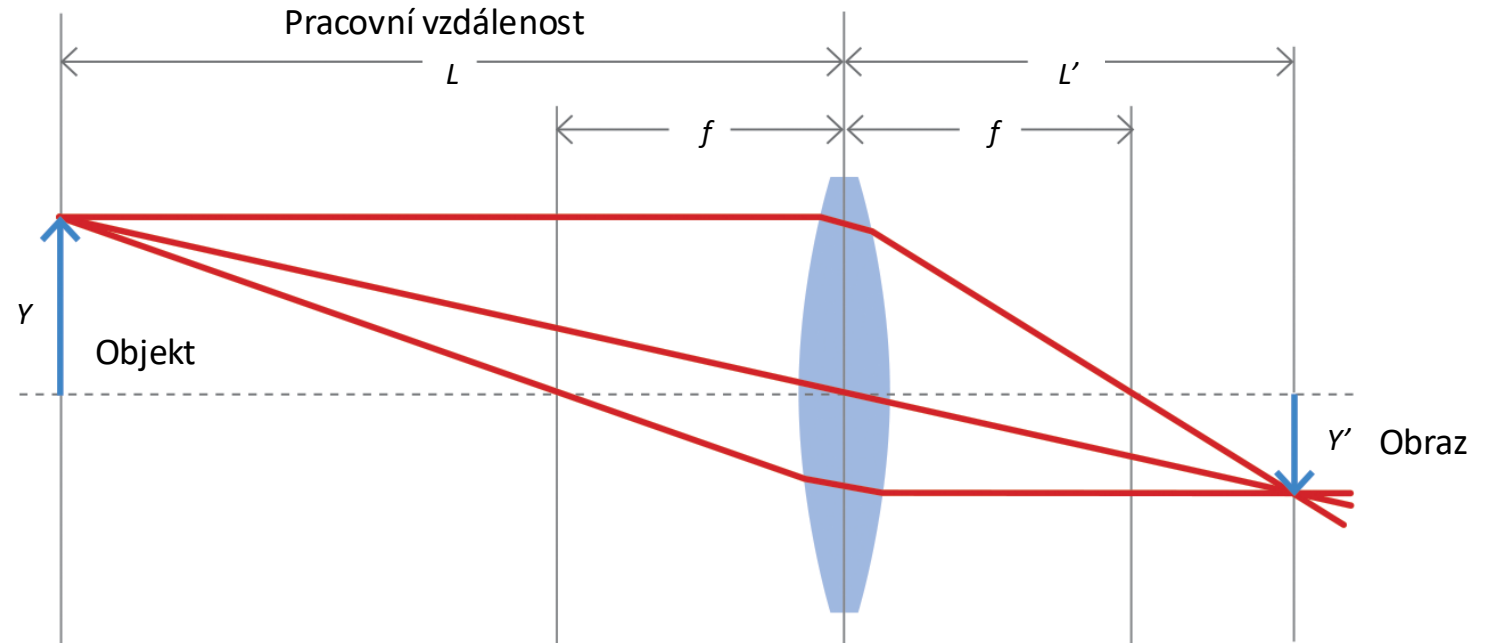
Pozn. Reálný objektiv obsahuje několik optických prvků

Výběr optiky – odhad ohniskové vzdálenosti

- Po odvození dostáváme

$$f = L \cdot \frac{Y'}{Y' + Y}$$

- Bereme že Y' je pozitivní
- Pozor $f = L'$, jen když $L = \infty$



Pozn. Reálný objektiv obsahuje několik optických prvků

Výběr optiky – odhad ohniskové vzdálenosti

- Po odvození dostáváme

$$f = L \cdot \frac{Y'}{Y' + Y}$$

- Bereme že Y' je pozitivní
- Pozor $f = L'$, jen když $L = \infty$

$$L = (4 \cdot 55) = 220 \text{ mm}$$

$$f = (4 \cdot 55) \frac{8,92}{8,92 + 55} = 30,701 \text{ mm}$$

$$L = (2 \cdot 55) = 110 \text{ mm}$$

$$f = (2 \cdot 55) \frac{8,92}{8,92 + 55} = 15,3505 \text{ mm}$$

Pozn. Viz předchozí slidy: $\frac{L}{Y'} = \frac{4}{1}$ až $\frac{2}{1}$

Výběr optiky – konkrétní typy



Edmund Optics
[UC Series #33-304](#)

- C-mount
- 1/1,8"
- F/# 1.8 – 11
- f 16 mm
- 200 - ∞
- 299 \$



Edmund Optics
[UC Series #33-305](#)

- C-mount
- 1/1,8"
- F/# 1.85 - 16
- f 25 mm
- 200 - ∞
- 299 \$



Edmund Optics
[UC Series #33-306](#)

- C-mount
- 1/1,8"
- F/# 1.85 - 16
- f 35 mm
- 200 - ∞
- 299 \$

Pozn. Pro robustní měření bychom měli volit telecentrický objektiv

Výběr optiky – reálná pracovní vzdálenost

$$f = L \cdot \frac{Y'}{Y' + Y} \longrightarrow Y = \frac{LY' - fY'}{f}$$

- Pozor! Platí $\min WD \neq L$
- Nerespektujeme fyzické rozměry objektivu
- Pro objektiv [UC Series #33-306](#), $f = 35 \text{ mm}$, $H_o = 49,24 \text{ mm}$

$$Y = \frac{LY' - fY'}{f} = \frac{(\min WD + H_o)Y' - fY'}{f}$$
$$= \frac{(200 + 49,24) \cdot 8,92 - 35 \cdot 8,92}{35} = 54,6 \text{ mm}$$

- Volbou vyšší než $\min WD = 200 \text{ mm}$ dokážeme zachytit celý objekt (55 mm)
- **Vždy chceme zachytit trošku větší plochu $1,1 \cdot 55 = 60,5 \text{ mm}$**
- Ověřte, co se stane pro objektivy $f = 16 \text{ mm}$ a $f = 25 \text{ mm}$



Edmund Optics
[UC Series #33-304](#)

- C-mount
- 1/1,8"
- F/# 1.8 – 11
- f 16 mm
- 200 - ∞
- 299 \$

Pozn. H_o je vzdálenost od okraje objektivu ke středu čočky (**Object Space Principal Plane**) – uvedeno výrobcem

Případová studie: Zadání měření dílů

- **Výsledek**

- | | |
|---|-----------------------------------|
| • Plastový výlisek, rozměry | 55 x 35 mm |
| • Měření rozměrů s přesností | 0,05 mm |
| • Umístění kamery ve vzdálenosti | 100 až 400 mm |
| • Měření rozměrů s přesností | 0,0393 mm |
| • Umístění kamery ve vzdálenosti
(Pracovní vzdálenost) | $274,24 - 49,24 = 225 \text{ mm}$ |



Pozn.: Při výběru objektivů je vhodné porovnat jejich [MTF křivky](#), zejména pokud uživatel vybírá mezi podobnými objektivy a potřebuje vybrat ten s nejlepší optickou kvalitou.