

**MULTISPEKTRÁLIS KÉPALKOTÁSI MÓDSZEREK
A MŰTÁRGYDIAGNOSZTIKÁBAN**

**AZ INFRAVÖRÖS LUMINESZCENS KÉPALKOTÁS ÉS A *FALSE COLOR* KÉPSZERKESZTÉS MÓD-
SZERTANA ÉS GYAKORLATI ALKALMAZÁSA**

MESTERMUNKA

Horváth Mátyás
DLA értekezés
2025

Témavezető: Dr. Galambos Éva
egyetemi docens

TECHNIKAI MEGOLDÁSOK A MIKROSKÓPOS FELVÉTELKÉSZÍTÉS- HEZ

Már a kutatás kezdetén ismert volt, hogy milyen felépítésű, márkájú és típusú polarizációs fény-mikroszkóp átalakítására van szükség. Az első tesztek a Magyar Képzőművészeti Egyetem vizsgálati laborjában rendelkezésre álló Zeiss Axio Imager polarizációs mikroszkópon történtek. A felvételkészítéshez a rendszer saját fényforrásai (HAL 100 és HXP 120 V) kerültek alkalmazásra, a reflexió és lumineszcens felvételek rögzítésére egyaránt. Képrögzítő eszközként a Tanszék teljes spektrumra átalakított tükörreflexes fényképezőgépére (Canon 50D APSC DSLR) esett a választás, B+W 093 IR (830 nanométeres) infravörös szűrővel felszerelve.

A módszer a következőképpen zajlott: a Zeiss képrögzítő feltét helyére egy Canon DSLR váz került, amelyet a megfelelő csatlakozó hiányában a fotótubusra illesztettek a szűrővel együtt. A beépített sugárváltót UV-irányba állították, a fényútból pedig minden szűrőt eltávolítottak. Az expozíciós beállítások empirikus úton, több próbafelvétel alapján kerültek meghatározásra. A teszthez használt minta a Tanszék egyik hallgatója által készített mintatáblából származott, egy olyan festett mezőből, ahol több különböző vörös pigment – egymásra felhordva – volt jelen.



1. ábra - A Zeiss Axio Imager rendszerű polarizációs optikai mikroszkóp fényútjainak egyszerűsített ábrája (ráeső átmenőfényes vizsgálati típus egyaránt feltüntetve).

Forrás: www.zeiss.com

Kezdeti tapasztalatok és fejlesztések

Reflexiós képalkotás

Az első, egyértelműen pozitív eredménnyel zárult próbálkozásokat követően a kutatás a megfelelő eszközök beszerzésének irányába folytatódott. Rövid információgyűjtés után kiderült, hogy a fényképezőgépekhez több, az objektív mögé építhető, úgynevezett *clip filter* is beszerezhető. Ezek a szűrők egyszerű mozdulattal behelyezhetők és eltávolíthatók a vázba, az objektív mögé. A kamera fotótubusra történő rögzítése egy kifejezetten erre a célra gyártott, APSC szenzorméretű kamerákkal kompatibilis fotótubus alkalmazásával vált megoldhatóvá.

Ezzel a lumineszcens felvételek készítése lehetővé vált, azonban az infravörös tartományban történő reflexiós felvételkészítés során kisebb-nagyobb problémák merültek fel.



2. ábra - Az STC clip filter, Canon APSC vázakhoz.

Forrás: https://www.stcoptics.com/collections/clip-filters?pf t_camera_type=Canon



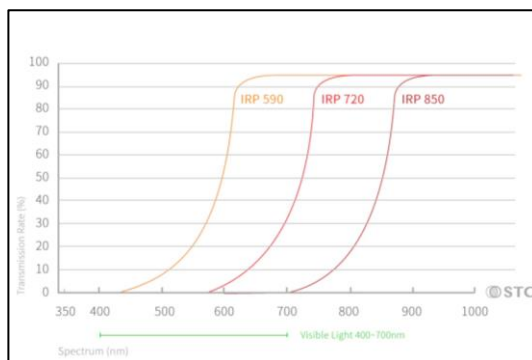
3. ábra - A szűrő behelyezése módja.

Forrás: https://www.stcoptics.com/collections/clip-filters?pf t_camera_type=Canon



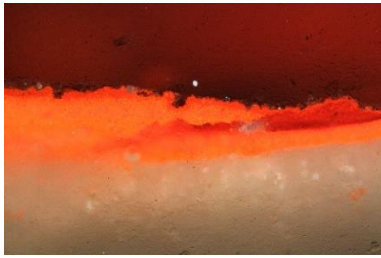
4. ábra – Egy Canon APSC vázba beillesztett szűrő.

Forrás: https://www.stcoptics.com/collections/clip-filters?pf t_camera_type=Canon



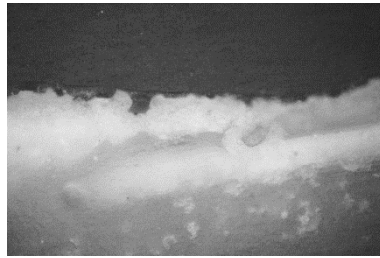
5. ábra – AZ STC infravörös *clip filter*-ek áteresztési görbéi.

Forrás: https://www.stcoptics.com/collections/clip-filters?pf t_camera_type=Canon



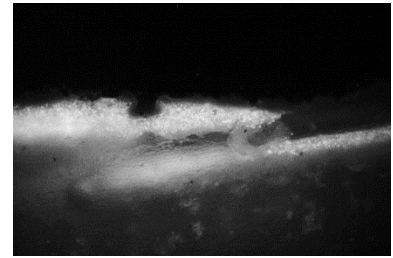
6. ábra - Próba felvétel a tesztelési folyamat során egy vörös festékrétegből vett minta keresztmetszet-csiszolatáról (VIS-R_VIS).

Forrás: saját felvétel



7. ábra - Próba felvétel a tesztelési folyamat során egy vörös festékrétegből vett minta keresztmetszet-csiszolatáról, IR-R_IR830-1000.

Forrás: saját felvétel



8. ábra - Próba felvétel a tesztelési folyamat során egy vörös festékrétegből vett minta keresztmetszet-csiszolatáról, IR-L_UV₃₆₅

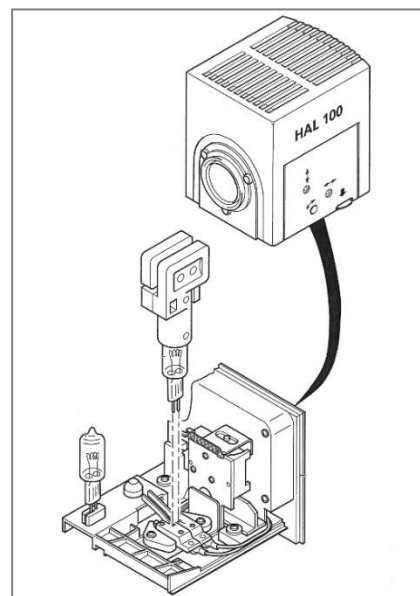
Forrás: saját felvétel

A mikroszkóp beépített halogén fényforrása elegendő infravörös sugárzást bocsátott ki a felvételek elkészítéséhez. A gyártóval való egyeztetés során kapott javaslat ellenére – a kezdeti sikeres tesztek tapasztalatai alapján – a hővédő szűrő nem került eltávolításra a fényútból. Ennek a szűrőnek a feladata a látható tartományban végzett reflexiós felvételnél az, hogy a fényforrásból érkező sugárzást megsűrje, így a fényútban és az objektívekben található lencsék által felerősített és központosított fénynyaláb ne károsítsa a behelyezett mintát. Noha a gyártó által közölt adatok szerint a szűrő éppen a kívánt rögzítési tartományban nem enged át sugárzást, a képalkotás során ennek ellenére sikerült jó eredményeket elérni.



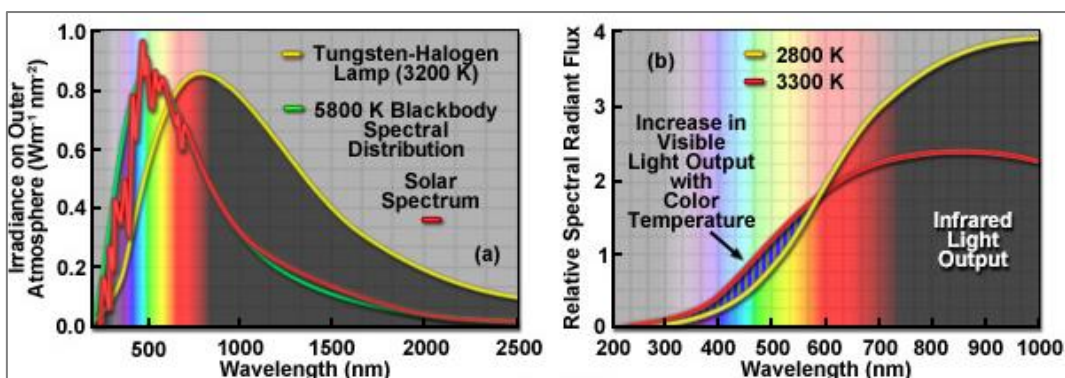
9. ábra – A Zeiss HAL 100-as halogén fényforrása.

Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>



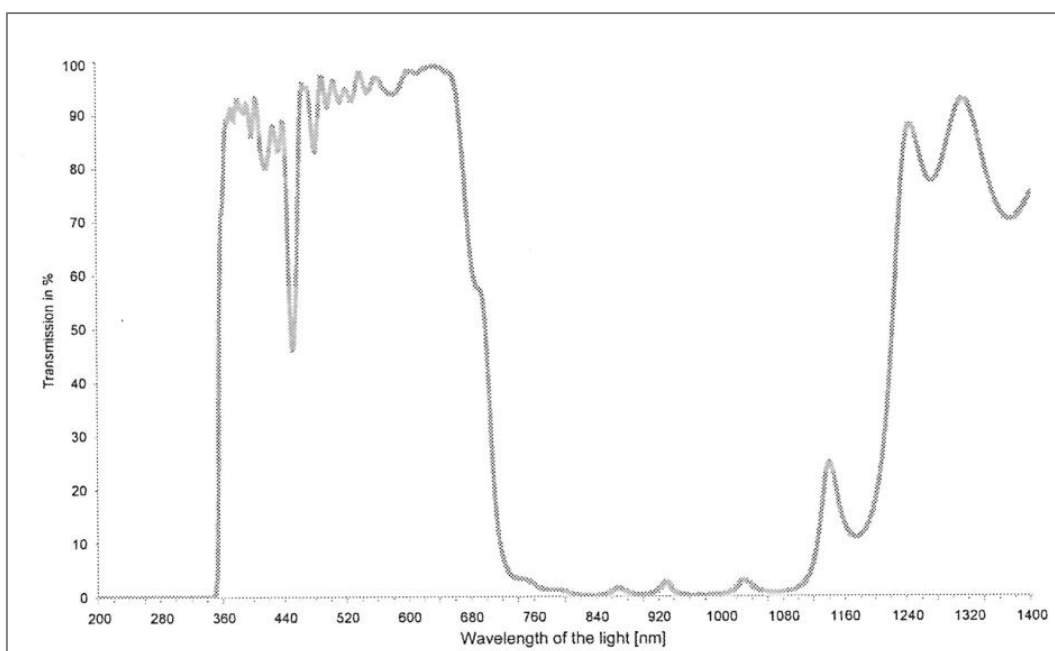
10. ábra – a Zeiss HAL 100-as halogén fényforrás robbantott ábrája.

Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>



11. ábra – Halogén sugárzó kibocsátási görbéi.

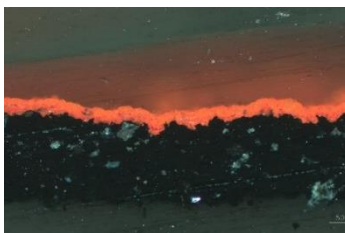
Forrás: <https://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>



12. ábra – A beépített hővédő szűrő áteresztési spektruma.

Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>

A felvételek elkészítéséhez a fényképezőgép fénymérője által meghatározott adatok elegendőnek bizonyultak, mivel a készülék élőképes módban, valamint számítógéphez csatlakoztatva, szoftveres vezérlés mellett is képes volt a szükséges mérések elvégzésére. Az így beállított rekesznyíláshoz és ISO-értékhez viszonyítva relatíve rövid záridő volt alkalmazható. Az elkészült felvételek azonban az erős reflexiók miatt nehezen voltak értékelhetők. A képek alapvetően a fényútban elhelyezett lineáris polarizációs szűrővel készültek, azonban a kedvezőtlen eredmények miatt polarizált megvilágítás mellett – két, egymáshoz képest keresztezett kioltási irányú polarizációs szűrő alkalmazásával – is készültek felvételek, amelyek hasonlóan gyenge eredményt adtak.



13. ábra -A modellkísérletekhez készült mintatábla R1-es szektorából származó minta, keresztmet-szet-csiszolatának felvétele, VIS-R_VIS.

Forrás: saját felvétel



14. ábra – A modellkísérletekhez készült mintatábla R1-es szektorából származó minta, keresztmet-szet-csiszolatának felvétele, UV-R_UV₃₆₅.

Forrás: saját felvétel



15. ábra – A modellkísérletekhez készült mintatábla R1-es szektorából származó minta, keresztmet-szet-csiszolatának felvétele IR-R_IR₈₃₀₋₁₀₀₀.

Forrás: saját felvétel

További tervezés és információgyűjtés eredményeként az alábbi megállapítások születtek:

- a beépített polarizációs szűrők egyike sem biztosít elegendő polarizációt az infravörös tartományban,
- a fényforrásból érkező infravörös sugárzás mennyisége a hőszűrő alkalmazása mellett is megfelelő a képalkotásra; mindez annak ellenére, hogy a filter 700–1200 nanométer között is szűr, azaz éppen a közel-infravörös (830–1100 nanométer) reflexiós képalkotás tartományában,
- amennyiben ultraibolya reflexiós felvétel készítése is cél, a gépvázba helyezett infravörös szűrő (*clip filter*) nem tekinthető felhasználóbarát megoldásnak, hiszen UV tartományú felvételkedészítés igénye esetén azt cserélni szükséges.

E tapasztalatok alapján egyértelművé vált, hogy az elhamarkodott felvételkedészítési próbálkozások helyett átfogóbb szakirodalmi kutatásra és gondos tervezésre van szükség a végső, lehető leginkább felhasználóbarát megoldások kialakítása érdekében.

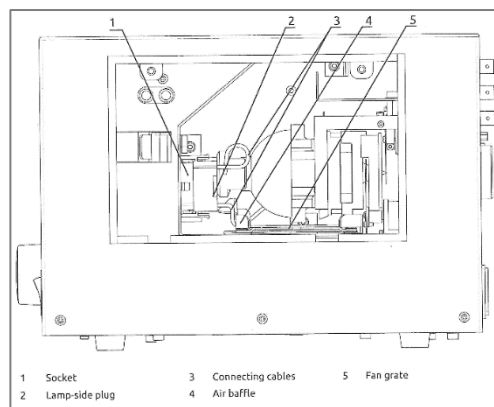
Lumineszcens képalkotás

A restaurátori vizsgálatok során rendszeresen alkalmazott Zeiss mikroszkópok egyik alternatív sugárforrása a „LEJ (Lightning & Electronics Jena) HXP 120 V” elnevezésű egység. Ez a sugárforrás egy úgynevezett rövid ívű higanygőz-izzót (pontos típusa: OSRAM HXP-R120W/45C VIS) tartalmaz, amelyhez (hővédő szűrő is tartozik, lásd 16. ábra).



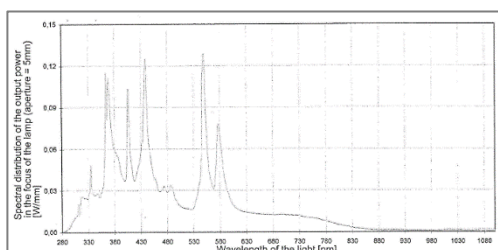
16. ábra - A JEL HXP 120 V sugárforrás.

Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>



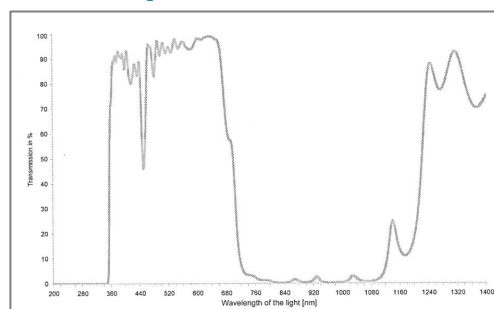
17. ábra - A JEL HXP 120 V sugárforrás, robbantott ábra, oldalnézet.

Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>



18. ábra - A JEL HXP 120 V sugárforrás, kibocsátási görbéje.

Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>



19. ábra - A beépített hővédő szűrő átteresztési spektruma.

Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>

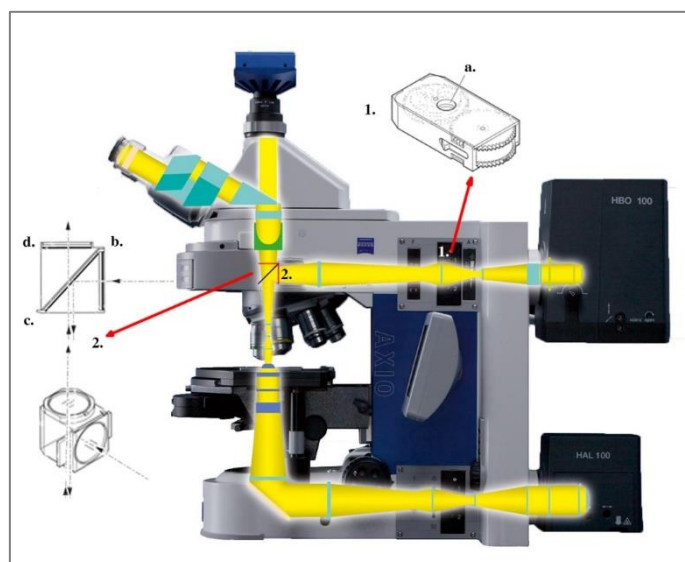
Az izzó kibocsátási görbéje alapján megállapítható, hogy a sugárforrás nem csupán az ultraibolya, hanem a látható tartományban is bocsát ki sugárzást, sőt elenyésző mértékben az infravörös tartományban is. Ezáltal egyaránt alkalmas látható és ultraibolya tartományú gerjesztésre. A hagyományos UVVL felvételek esetében a szűrőblokkban elhelyezett zárószűrő biztosítja, hogy a mintára érkező sugárzás kizárólag az ultraibolya tartományra korlátozódjon (a szűrőblokk felépítését a következő fejezet részletesen ismerteti). A fentiek alapján a mikroszkópok alapvető sugárforrásai önmagukban is alkalmasak a kiegészítő vizsgálati típusok elvégzésére, amennyiben a megfelelő szűrők megfelelő helyen kerülnek alkalmazásra.

A végső kialakítás

A vonatkozó szakirodalom feldolgozását és a részletes tervezési fázist követően sikerült kialakítani egy kellően felhasználóbarát és technikailag megbízható megoldást, amely alkalmas a látható, kompromisszumokkal az ultraibolya és a közeli infravörös tartományban végzett

reflexiók, valamint a látható és az infravörös tartományban rögzített lumineszcens felvételek elkészítésére is.

Az első jelentős módosítás a tesztek során alkalmazott Canon fényképezőgép cseréje volt a Zeiss Axiocam 506 rendszer színes és monokróm képrögzítő egységeire. Mindkét kamera a Sony ICX 694 EXview HAD CCD IITM típusú¹ szenorra épül, amely 6 megapixeles (2752×2208 pixel) felbontással és $4,54 \times 4,54$ mikrométeres pixelmérettel rendelkezik. A színes egység érzékenysége 400–720 nanométer közé esik, amelyet a gyártó Hoya C5000 szűrő² és RGB Bayer color filter mask kombinációjával valósít meg. A monokróm egység érzékenysége 400–1000 nanométer között alakul, ebből hiányoznak a fent említett színszűrők, a szenzor mindössze egy BK7 protektív szűrővel (bór-szilikát, optikai védőüveg) rendelkezik. A 14 bites kamerák 250 mikroszekundum és 60 másodperc közötti expozíciós tartományt biztosítanak, ami a kívánt vizsgálati felvételek rögzítéséhez megfelelő.



20. ábra – A Zeiss polarizációs mikroszkópja az átalakításokkal.

Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html> weboldalról származó ábrák montázsa.

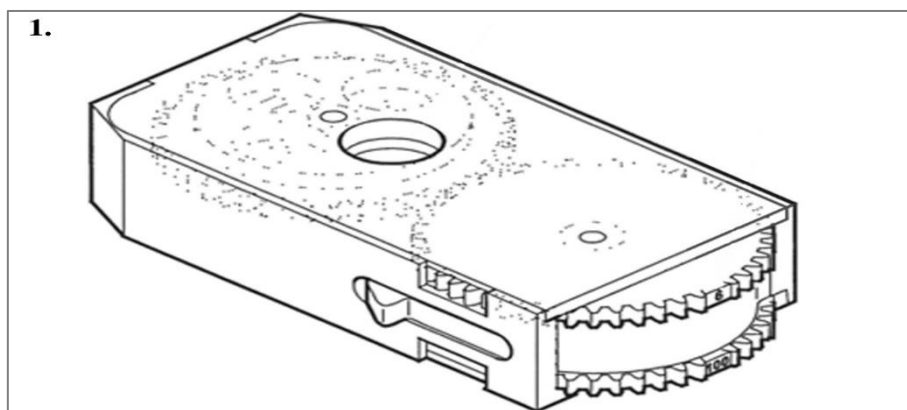
A megfelelően illeszthető, és nem mellékesen a Zeiss saját szoftverével is kompatibilis képrögzítő egységek kiválasztását követően a következő feladatot a szűrők típusának és optimális

¹ A Sony ICX-694 EXview HAD CCD II rendkívül érzékeny és precíz képrögzítő szenzor, amely kombinálja a magas felbontást, kiváló QE-t és alacsony zajszintet. Ez a szenzor különösen ideális asztrofotózásra, mikroszkópos alkalmazásokra, tudományos mérésekre, illetve nagy igénybevételű gépi látó rendszerekhez. Az EXview HAD II technológia biztosítja a kiváló teljesítményt még gyenge fényviszonyok mellett is. https://www.ximea.com/products/usb-vision-industrial/xid-usb3-scientific-sony-ccd-cameras/sony-icx694al-usb3-mono-scientific-camera?utm_source=chatgpt.com

² Color Compensating Filter - A Hoya C5000 egy technikai, laboratóriumi célú színtompító üveg, amelyet elsősorban optikai korrekciós feladatokra – például kamerás vagy kijelzős rendszerek színtempozíciójára – használnak. <https://www.hoyaoptics.eu/colour-compensating-filters-c/> 2025.08.29.

elhelyezési helyeinek meghatározása jelentette. Egyértelműnek bizonyult, hogy a külső egységekből a mikroszkópba érkező sugárzás szűrését első lépésben a belépési pont közelében célszerű megvalósítani. Erre azonban kizárólag a lumineszcens felvételek esetében volt szükség.

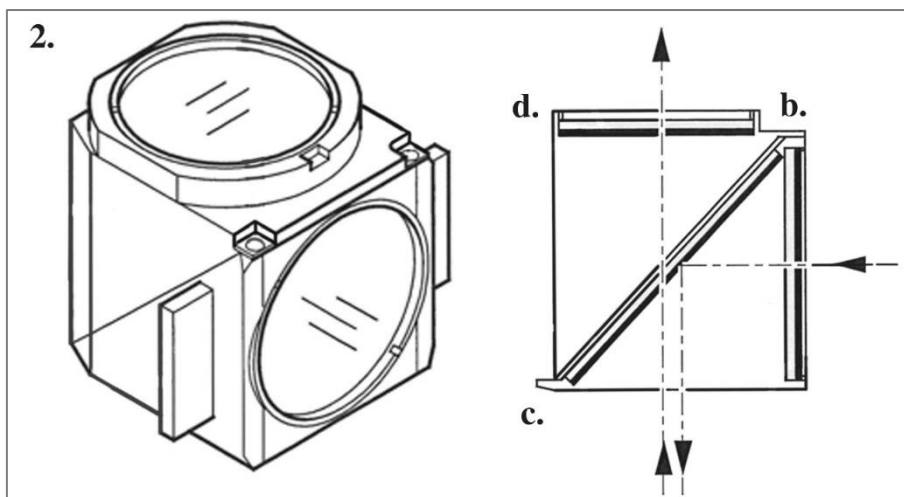
Az első könnyen hozzáférhető elhelyezési pontot a mikroszkóp vázának hátsó részén található szűrőtárcsa jelentette (lásd 122. ábra/1.). Ez a szűrőtárcsa (*filter wheel*) két beépített kerékkel rendelkezik, amelyekbe egyenként négy 25 milliméter átmérőjű szűrő rögzíthető. Gyári állapotban jellemzően különböző ND (*neutral density*, a fény mennyiségét szabályozó) szűrők, valamint a színhőmérséklet módosítására szolgáló színes szűrők találhatók benne.



21. ábra - A szűrőtárcsa (1.) rajza.

Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>

A beérkező sugárzás megszűrésének második lehetőségét az objektívek fölött, a revolverben elhelyezkedő szűrőblokk (2.) és az abban rögzített szűrők jelentik (124. ábra). A blokk felépítése a következőképpen alakul: a belépő (b) és a kilépő (d) oldalon egy-egy szűrő beszerelésére van lehetőség (a belépő oldalon függőleges, a kilépő oldalon vízszintes elrendezésben). A b) pozícióban általában egy zárószűrő található, amely a beérkező sugárzást szabályozza, a blokk közepén pedig 45° -os szögben helyezkedik el az úgynevezett *beam splitter* (c). Ez egy féligáteresztő tükör, amelynek feladata, hogy a beérkező sugarakat 45° -os szögben lefelé, az objektíven keresztül a mintára irányítsa. A mintáról visszaérkező sugarak – amelyek lehetnek reflexió vagy emisszió eredetűek – a féligáteresztő tükrön áthaladva a vízszintes irányú (d) szűrőhely felé jutnak, amely gyári állapotban jellemzően üres.



22. ábra - A szűkőblokk felépítése, ballra a blokk háromdimenziós rajza, jobbra pedig a keresztmetszeti ábrája, a sugárirány nyilakkal jelölve. A „b.” a belépő oldali szűrőt, a „c.” a féligáteresztő tükröt (*beam splitter*), a „d.” pedig a kilépő oldali szűrőt jelöli.

Forrás: <https://www.zeiss.com/corporate/en/home.html>

A lumineszcens képképzés

Különböző gerjesztésű infravörös lumineszcens felvételkedzésítés

Az ultraibolya- és látható tartományú sugárzással gerjesztett infravörös lumineszcencia vizsgálatnál a beérkező sugárzás módosítása már a fényútba való belépéskor szükséges. A fényforrásból származó széles spektrumú sugárzásból elsődlegesen az infravörös tartományba eső komponenseket kell kiszűrni, majd a gerjesztés hatására a mintából kilépő, szintén széles spektrumú sugárzásból kizárólag az infravörös tartományba eső részt szükséges átengedni a rögzítő egység felé.

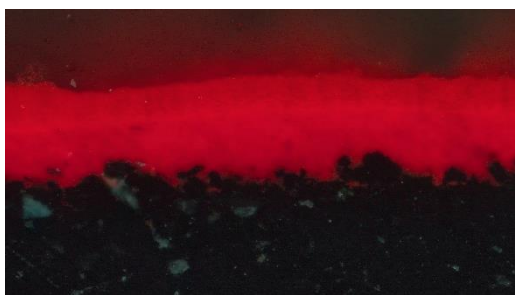
Az infravörös lumineszcens képképzés a megfelelő átalakításoknak köszönhetően az alábbiak szerint valósul meg:

- a HPX 120 V típusú fényforrás kerül alkalmazásra,
- látható fényes gerjesztés esetén a szűrőtárcsában (1./a.) a Schott BG 18-as szűrő aktív, a fényútban helyezkedik el, ennek feladata a képképzés szempontjából zavaró ultraibolya és infravörös sugárzás kiszűrése, ultraibolya sugaras gerjesztés esetén egy 400 nanométeres *shortpass* szűrő van beiktatva (1/b), mely csak az UV sugárzást engedi át,
- a szűrőblokk belépő oldala (b) üres, míg a kilépő oldalon (d) egy infravörös szűrő³, (Schott RG830 típus) kerül elhelyezésre,

³ <https://www.edmundoptics.com/p/rg-830-254mm-dia-longpass-filter/2577/>

- a fotótubus az Axiocam 506 *mono* kameraállásba van csatlakoztatva; a szoftver élőkép funkciójában a fókuszálás ritkán valósítható meg, ezért azt a Schott BG18-as szűrő beiktatása előtt, a halogén fényforrás mellett kell elvégezni,
- az expozíciós idő meghatározása empirikus módon történik.

A fényforrásból érkező sugárzás a beavatkozásoknak köszönhetően mentes az infravörös komponensektől, ugyanakkor egyszerre tartalmazza az ultraibolya- és a látható tartományú sugárzásokat. Ez nem jelent problémát, mivel így egyidejűleg gerjeszthetők az az ibolyántúli sugárzásra reagáló pigmentek, például a titánfehér (rutil) és az egyiptomi kék, valamint a látható tartomány hatására emissziót mutató pigmentek, például a kadmium-tartalmú festékek.



23. ábra - Az R7-es mezőből vett minta keresztmetszet-csiszolatának VIS-R_VIS (pol) felvétele, 10x okulár, 20x objektív.
Forrás: saját felvétel



24. ábra - Az R7-es mezőből vett minta keresztmetszet-csiszolatának IR-L_VIS felvétele, 10x okulár, 20x objektív.
Forrás: saját felvétel

A reflexiós képalkotás

Infravörös-reflexiós felvételkedészítés

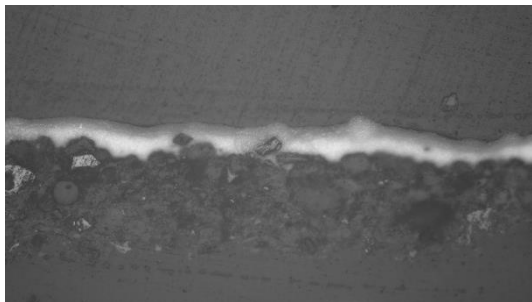
Az IRP típusú felvételkedészítés során a kutatások és a tesztek alatt tapasztalt képalkotási problémák összességében megoldást nyertek. A nehézséget az okozta – ahogyan azt korábban is említettük –, hogy a mikroszkóp fénycsatornájába gyárilag beépített polarizációs szűrők az infravörös tartományú sugárzást nem voltak képesek megfelelően polarizálni. Emiatt a rendszer kiegészült infravörös polarizációs szűrőkkel, amelyek közül egy a szűrőtárcsában, egy másik pedig a szűrőblokk belépő oldali (b) foglalatában kapott helyet. Ennek eredményeként a minta felületéről visszaérkező zavaró reflexió mérséklődött.

Az így kialakított képalkotási módszer a következőképpen foglalható össze:

- a fényforrás szerepét a HAL 100 típusú halogén egység tölti be,
- az első szűrőtárcsában egy infravörös lineáris polarizációs szűrő helyezkedik el⁴,

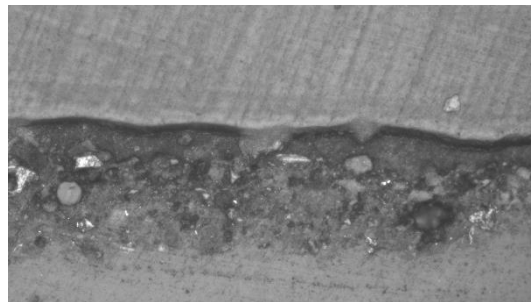
⁴ <https://www.edmundoptics.com/f/near-infrared-nir-linear-polarizing-film/39534/>

- a másodikban egy infravörös szűrő, mely a látható fényt nem, csak az infravörös sugarakat engedi át
- a szűrőblokk belépő oldalán szintén infravörös polarizációs szűrő található (90 fokkal elforgatva az előzőhöz képest), míg a kilépő oldalon is (biztonság kedvéért) egy infravörös zárószűrő került beépítésre,
- a fotótubus a Zeiss mono kameraállásba van csatlakoztatva,
- az élességállítás és az expozíciós idő megválasztása a szoftver élőkép funkciójának segítségével történik.



25. ábra - A modell kísérletekhez készült tábla Y13 szektorából származó minta keresztmetszet-csiszolatának felvétele, IR-R_IR₈₃₀₋₁₀₀₀.

Forrás: saját felvétel



26. ábra - A modell kísérletekhez készült tábla Y13 szektorából származó minta keresztmetszet-csiszolatának felvétele, UV-R_UV.

Forrás: saját felvétel

Ultraibolya-reflexiós képalkotás

Az UVR felvételkészítés során az infravörös reflexiós képalkotásnál tapasztalt reflexiós és polarizációs problémák nem jelentkeztek. A módszer ennek megfelelően egyszerűbben, mindössze egyetlen szűrő alkalmazásával valósítható meg:

- a használt fényforrás a HPX 120 V típusú egység,
- a szűrőtárcsában egy 400 nanométeres *shortpass* szűrő van beiktatva (1/b), mely csak az UV sugárzást engedi át,
- a szűrőblokk belépő oldala (b) üres, a kilépő (d) oldalon pedig újabb 400 nanométeres zárószűrő került elhelyezésre.

A beépített és a módosítható polarizációs szűrők ebben az esetben nem játszanak szerepet a képalkotásban, mivel a reflexiós UV felvételeknél nem szükséges a sugárzás polarizációs módosítása.

A kialakított eljárás működési elve a hagyományos műtermi gyakorlatban is ismert képalkotási módszerhez hasonlítható. A fényforrásból származó, szűrt sugárzás a minta felületére jutva kölcsönhatásba lép a rétegeket alkotó anyagokkal: részben elnyelődik, részben visszaverődik, bizonyos esetekben pedig lumineszcenciát vált ki. Az így létrejövő összetett sugárzás a

szűrőblokkban kerül szelektálásra, ahol az UV zárószűrőnek köszönhetően kizárólag az ultraibolya reflexió jut el a képérzékelőig, míg a látható tartományú lumineszcencia nem.