



UNDERVISNINGSELEMENT G4

metrologi.dk

# OPTISK MÅLING AF OVERFLADER

## Mikkel Schou Nielsen, DFM A/S

1. udgave – November 2018



Copyright © 2018 metrologi.dk – Materialet må ikke anvendes til kommercielt brug, uden tilladelse fra metrologi.dk.

Metrologi.dk er finansieret af Styrelsen for Forskning og Innovation i perioden 2016 – 2018. Materialet er udarbejdet i et samarbejde mellem GTS-institutterne DFM A/S, FORCE Technology og DELTA - a part of FORCE Technology. Læs mere om projektet på <u>www.metrologi.dk</u>.

Parterne i Metrologi.dk kan ikke gøres ansvarlig for fejl og mangler i indholdet af undervisningsmaterialet eller i indholdet på websitet, samt indholdet i de eksterne dokumenter og websites, der linkes til, med mindre andet følger af dansk rets almindelige regler.

Grafisk design af: Henriette Schäfer Høyrup og David Balslev-Harder.



# Indholdsfortegnelse

	Boks 1: Mikroskopi gennem tiden1
1	Indledning1
2	Optik2
	2.1 Optisk forstørrelse og objektiver2
	2.2 Styrker og begrænsninger3
	Boks 2: Test dig selv I3
3	Optisk mikroskopi4
	3.1 Konfokalmikroskop4
	3.2 Fokusvariationsmikroskop5
	3.3 Interferensmikroskop6
4	Optiske målinger af overflader8
	4.1 Afstande8
	Boks 3: Analyse af underskrifter med
	fokusvariationsmikroskopi8
	I
	Boks 4: Ruhedsparametre9
	Boks 4: Ruhedsparametre
	Boks 4: Ruhedsparametre9 4.2 Arealer, rumfang og vinkler9 Boks 5: Ruhedsmåling på værktøjer hos Grundfos9
	Boks 4: Ruhedsparametre
5	Boks 4: Ruhedsparametre

		5.2 Horizontal kalibrering	12
		5.3 Kalibrering af ruhed	12
1 <b>1</b>		5.4 Sporbarhedskæde for optisk måling af overfladers topografi	12
2		Boks 6: Målestørrelser på plastemne	14
2	6	Usikkerhedsbudget for optisk overflademåling	. 14
3		6.1 Måleemne	14
3		6.2 Mikroskop (måleudstyr)	15
4		6.3 Målemetode	15
4		6.4 Målemiljø	15
5		6.5 Reference	15
6		6.6 Operatør	16
8		6.7 Usikkerhedsbudgettet	16
8		Boks 7: Test dig selv II	17
		6.8 Måleresultatet	17
8	7	Opsummering	. 18
9	8	Ordliste	. 19
9	9	Svar på test-dig-selv	. 20
9		9.1 Test-dig-selv I	20
9		9.2 Test-dig-selv II	20
0	10	) Læringsudbytte	. 21
0	11	L Litteraturliste	. 22

metrologi.dk

# 1 Indledning

Mange af et emnes egenskaber afhænger af dets overflade. Overfladen giver dels det visuelle og æstetiske udtryk af emnet i form af farve eller geometriske mønstre, glans eller mathed. Derudover bestemmer overfladen også funktionelle egenskaber, såsom hvor let et kugleleje glider, letheden i rengøring eller evnen til vandafvisning.

I dag kan producenter fremstille emner med overfladestrukturer på en størrelse af få mikrometer. Disse strukturer kan tilføre overfladen en funktion som f.eks. vandafvisning eller en særlig mathed. For at sikre, at overfladen virker efter hensigten, er det nødvendigt at bruge inspektionsteknikker til at karakterisere geometrien af et emnes overflade.

Optiske metoder til måling af overflader har som følge af dette oplevet en stigende efterspørgsel. Blandt fordelene ved optisk måling af overflader er, at det sker ikke-destruktivt og berøringsfrit. Da målingerne er berøringsfrie kan de optiske metoder også håndtere overflader af meget bløde materialer.

Der findes en lang række optiske målemetoder, som det vil være for omfattende at dække her. Dette kompendium vil derfor fokusere på optisk mikroskopi til måling af overfladers geometri i både vertikal og horisontal retning. Optisk mikroskopi har en lang historie og har været anvendt til målinger af overflader siden 1600-tallet (se Boks 1).

I mikroskopien måles ovenfra og ned på en overflade hvorved der ikke kan kigges inde under overhæng eller fremspring. Derfor opnås ikke i alle tilfælde en fuld 3D opmåling af overfladen. Af denne grund omtales de optiske mikroskopimålinger af overflader til tider som en måling i 2,5D (to-en-halv-dimensioner).

Kompendiet ligger i forlængelse af kompendierne "G1 – Geometriske målinger" [1] og "G2 – Ruhed" [2]. Samtidig trækkes på generel viden om metrologi og usikkerhedsbudgetter, som beskrevet i"A1 Introduktion til målinger" [3] og "A3 – Introduktion til usikkerhedsbudgetter" [4].

Opbygningen af kompendiet er som følger. I afsnit 2 gennemgås optiske målinger overordnet, mens afsnit

#### Boks 1: Mikroskopi gennem tiden

De tidligste mikroskoper blev fremstillet i starten af 1600-tallet af flere opfindere - herunder Galileo Galilei. Illustrationer af objekter set gennem mikroskoperne blev hurtigt populære i offentligheden.

Selvom kvantitative målinger af topografien ikke var mulige, kunne man ved at variere fokusafstanden for mikroskopet få en vis indsigt i højdevariationerne, som vist på illustrationen.



Illustration fra Hookes Micrographia (1665) [13] af krystaller på en overflade set gennem et mikroskop. Udvikling af interferens- og konfokalmikroskoper i 1950erne og frem åbnede for kvantitative målinger af overflader. Dog var det først i 1990erne, at computere gjorde hurtige og automatiske afbildninger af overfladers topografi til standard. Figuren nedenfor viser et eksempel fra et moderne mikroskop.



3 beskriver en række specifikke optiske mikroskopimetoder. Eksempler på målinger af overflader med et optisk mikroskop gennemgås i afsnit 4 og i afsnit 5 gennemgås kalibrering af mikroskopet. Endeligt gives i afsnit 6 et eksempel på en højdemåling ved brug af optisk mikroskopi, og hvordan et usikkerhedsbudget kan opstilles.

Undervejs henvises til ISO standarder, hvor det er relevant.

# 2 Optik

Optik er læren om lyset og dets opførsel, og er derfor essentiel for udviklingen af mikroskoper og andre optiske måleinstrumenter.

I de følgende afsnit introduceres først nogle begreber og egenskaber, som er vigtige for at forstå optikken i et mikroskop. Dernæst gennemgås styrker og begrænsninger ved optiske målinger.

# 2.1 Optisk forstørrelse og objektiver

Da størrelsen af overfladestrukturer er på en skala af mikrometer, skal metoder til geometrisk måling af overflader kunne gengive strukturer på denne skala. Optisk forstørrelse er en måde, hvorpå optiske metoder kan "se" strukturer på mikrometerniveau.

En måde at illustrere optisk forstørrelse er ved øjets måde at gengive størrelser, hvilket afhænger af indfaldsvinklen mellem en genstand og øjet. Hvis en genstand er på lang afstand som på Figur 1A, vil indfaldsvinklen være lille, hvorfor lyset fylder et lille område på nethinden, og genstanden opfattes som lille.

For bedre at kunne skelne detaljer på genstanden, kan den flyttes tættere på øjet som i Figur 1B. Derved bliver indfaldsvinklen øget, genstanden fylder mere på nethinden og *opløsningen* er blevet forbedret. Opløsningen angiver den mindste afstand mellem to punkter, som kan skelnes fra hinanden. Imidlertid er der en grænse for afstanden til genstanden, hvor øjet kan stille skarpt på overfladen.

Skal opløsningen forbedres endnu mere, kan en linse (f.eks. en lup eller et forstørrelsesglas) sættes ind mellem øje og genstand som på Figur 1C. Idet linsen bøjer lyset, giver det en større indfaldsvinkel til øjet, hvilket får genstanden til at fylde mere på nethinden og opfattes som større. Derved har linsen givet en *optisk forstørrelse*.



Figur 1: Forstørrelse og øjet. A) En genstand på lang afstand opfattes som lille pga. en lille indfaldsvinkel. B) Flyttes genstanden tættere på øges indfaldsvinklen og genstanden synes større. C) En linse (f.eks. fra en lup) kan øge indfaldsvinklen endnu mere og få genstanden til at opfattes større via optisk forstørrelse. (Tilpasset fra billede af Erin Silversmith, Wikimedia Commons)

I et *objektiv* anvendes én eller flere linser til at lave en veldefineret optisk forstørrelse. Forstørrelsen for et objektiv beskrives med et tal *M*, der angiver hvor mange gange en genstand forstørres, f.eks. x10, x20 eller x50 forstørrelse.

En anden vigtig egenskab ved et objektiv er, hvor små størrelser objektivet kan gengive, hvilket kan beskrives med den horisontale opløsning *D*. Opløsningen afhænger af den største åbningsvinkel for lyset, som objektivet tillader.

Objektiver er designet til, at genstande skal være placeret i en bestemt afstand fra objektivet for at overfladen gengives. Denne *arbejdsafstand* definerer en maksimal vinkel for lyset, som illustreret på Figur 2. En stor afstand (Figur 2A) betyder en lille vinkel, mens en lille afstand (Figur 2B) giver en stor vinkel.

Åbningsvinklen beskrives med et tal NA (*numerisk apertur*), som er givet ved følgende ligning:



Figur 2: Et objektiv til et mikroskop består af én eller flere linser. A) Lille åbningsvinkel giver stor arbejdsafstand, men betyder en lav NA og dermed en ringe rumlig opløsning. B) Stor åbningsvinkel giver lille arbejdsafstand men høj NA og god rumlig opløsning.

#### Ligning 1:

$$NA = n \cdot sin(\alpha)$$

Hvor  $\alpha$  er åbningsvinklen og *n* er brydningsindekset for materialet mellem objektiv og overflade, hvilket er 1 for målinger i luft. Jo større åbningsvinkel, jo større bliver værdien af NA.

Den horisontale opløsning D for et objektiv kan beregnes ud fra NA og bølgelængden af det anvendte lys,  $\lambda$ , som

#### Ligning 2:

$$D = \frac{0.61\lambda}{\mathrm{NA}}$$

Skal meget små strukturer kunne gengives, kræves en lille værdi af *D*, og dermed en stor værdi af NA, hvilket betyder en stor åbningsvinkel. Små åbningsvinkler sætter en begrænsning på opløsningen af objektivet. Objektiver designes derfor således, at opløsning og forstørrelse passer sammen.

### 2.2 Styrker og begrænsninger

Blandt styrkerne ved optiske mikroskopimålinger af overflader er

- Ikke-destruktiv metode optiske målinger er berøringsfrie og dermed ikke-destruktive over for emnets overflade
- Alsidighed en lang række materialer, både bløde og hårde, kan måles.
- Multiskala Optiske mikroskoper kan måle størrelser fra under en mikrometer til flere centimetre.

Da alle optiske målinger afhænger af lys, så sætter lysets opførsel, når det rammer en overflade, en række begrænsninger.

- Glatte overflader på gennemsigtige materialer kan i sagens natur være svære at måle med lys.
- Stejle flanker kan reflektere lyset væk fra mikroskopet, så kanten ikke kan måles. Ligeledes vil der heller ikke kunne måles ind under fremspring eller overhæng.
- Store forskelle i lysstyrken fra det reflekterede lys, kan føre til over- eller underbelysning og gøre det svært at lave en sammenhængende måling.

## Boks 2: Test dig selv l Optisk forstørrelse og billedområde

l et digitalt mikroskop består kamerachippen af et firkantet mønster af 1000x1000 pixels. Hver pixel har en bredde og længde på 10 μm.

Området som mikroskopibilledet dækker på emnets overflade, svarer til kamerachippens fysiske størrelse divideret med forstørrelsen M. Jo større M, jo mindre område dækkes.

- Hvor bredt og langt et område dækker mikroskopibilledet ved en x5 forstørrelse?
- 2. Hvor stort et område ved x20 forstørrelse?
- Med x20 forstørrelse sammensættes flere billeder (kant-mod-kant i firkantet mønster) til at dække samme område som ved x5. Hvor mange billeder kræves?
- 4. Hvor stort et område dækker en enkelt pixel ved x20 forstørrelse?

#### Rumlig opløsning

Den mindste størrelse D, som x20 objektivet kan opløse horisontalt, afhænger af lysets bølgelængde  $\lambda$  og objektivets NA som vist i Ligning 2.

Lad  $\lambda$  være 0,5  $\mu$ m. Hvilken mindste størrelse kan følgende objektiver opløse i luft (n=1)?

- 5. NA = 0,12 (åbningsvinkel på 7°)
- 6. NA = 0,87 (åbningsvinkel på 60°)

Ligning 2 kan også bruges til at svare på, hvilken NA, man skal vælge for, at objektivet kan opløse en bestemt størrelse.

 Ved hvilken NA kan mikroskopet opløse en størrelse på 1 µm?

Vejledende besvarelse i afsnit 9.1 på side 20.

# 3 Optisk mikroskopi

I et optisk mikroskop (Figur 3) anvendes et objektiv (A i Figur 3) til at opsamle det indkomne lys og fokusere det ind på billedplanet (B i Figur 3). Til at se billedet indsættes i analoge mikroskoper et okular til brug for øjnene, mens der i digtale mikroskoper indsættes en kamerachip.

Placeres overfladen af et emne i arbejdsafstanden for objektivet, vil et skarpt billede af overfladen dannes. Denne afstand kan indstilles ved at justere på højden mellem emne og objektiv (C i Figur 3). Overfladen siges da at befinde sig i *fokusplanet*.

I måling af overflader sendes lyset oftest ind ovenfra og reflekteres tilbage fra emnet og ind i objektivet, hvilket kaldes at måle i *refleksion.*<sup>1</sup>

Skarpe billeder kan kun opnås for tilpas plane overflader. Er der for store højdevariationer, vil hele overfladen ikke befinde sig inden for fokusplanet, og dele af billedet vil være uskarpt. Denne *dybdefølsomhed* afhænger af objektivets NA og kan anvendes til at måle højder med det optiske mikroskop. Ved at variere afstand mellem objektiv og emne kan overfladens *topografi* registreres, og i stedet for et fladt billede fås en model af overfladen i 3D.

I de følgende afsnit beskrives en række måleprincipper til at måle overflader i 3D ved brug af optiske mikroskoper. En dybere gennemgang er at finde i [5].



Figur 3: Optisk mikroskop. A) Objektiver til fokusering af lyset. B) Billedplanet, hvor det opsamlede lys fokuseres. C) Ved at justere på højden kan overfladen på et emne bringes i fokus.

## 3.1 Konfokalmikroskop

I konfokalmikroskopi benyttes objektivets dybdefølsomhed til at danne 3D billeder af et emnes overflade. Ved brug af en blænde begrænses det reflekterede lys, så der kun opsamles fra et bestemt højdeniveau på overfladen.

Princippet er illustreret på Figur 5A. Lys fra en lyskilde sendes igennem en blænde, reflekteres fra en stråledeler og fokuseres ned til et punkt ved brug af et objektiv. En blænde foran detektoren, som typisk er en



Figur 4: Måling af en hjerteformet struktur med konfokalmikroskopi, hvor fokusplanet skannes i højden. A) Området rundt om hjertet er placeret i fokusplanet og lyset herfra opsamles. B) Fokusplanet er placeret på toppen af hjertet. C) Fra det opsamlede lys fra en række højder kan en 3D model af overfladen dannes.

<sup>1</sup> Dette er i modsætning til, at lyset sendes nedenfra og op igennem et transparent emne, hvilket kaldes at måle i *transmission*.

metrologi.dk



Figur 5: Princip bag konfokal- og interferensmikroskopi. I begge fokuseres en lyskilde ned på en overflade med et objektiv. A) I konfokalmikroskopi sikrer en blænde foran kameraet, at kun det reflekterede lys fra fokusplanet måles. Blænden stopper lyset, der stammer fra ude af fokus. B) I interferensmikroskopi sendes en del af det indgående lys igennem stråledeleren og ind på et referencespejl. I kameraet opsamles lyset fra emne og spejl, og et interferensmønster dannes mellem lyset fra spejlet og højdevariationer på emnets overflade.

kamerachip, blokerer lys som ikke kommer fra fokusplanet. Kun lys fra fokusplanet registreres. Lyskilden er typisk en laser eller en farvet eller hvid LED.

Hvis afstanden mellem mikroskopet og overfladen varieres vil intensiteten af det målte lys ændre sig. Den maksimale intensitet for et punkt opnås, når punktet befinder sig midt i fokusplanet. Til at skanne fokusplanet anvendes typisk en translationsmotor til at flytte mikroskopet i højden, mens emnet holdes i ro.

For at måle højden i et område og ikke bare et enkelt punkt skal fokuspunktet for lyset bevæges hen over overfladen. Tre typiske måder at gøre dette er:

- I et konfokalt laserskannings mikroskop bruges et sæt af spejle til at skanne en laserstråle punkt for punkt hen over overfladen.
- I et disk skanning konfokalmikroskop benyttes et sæt af roterende skiver med et mønster af huller til at belyse forskellige punkter.
- En rumlig lysmodulator kan elektronisk skabe og variere et lysmønster, der rammer udvalgte dele af overfladen. Derved kan en overflade skannes uden brug af bevægelige mekaniske dele.

På Figur 4 er en måling af en hjerteformet struktur illustreret, hvor positionen af fokusplanet skannes i højderetningen over overfladen. I Figur 4A er området rundt om hjertet placeret i fokusplanet, hvorved lyset herfra opsamles. Efterfølgende flyttes fokusplanet opad på emnet, indtil toppen af hjertet befinder sig i fokusplanet som vist på Figur 4B. Fra det indsamlede lys fra de forskellige højder kan højden for hvert punkt bestemmes og vises i 3D som på Figur 4C.

## 3.2 Fokusvariationsmikroskop

Et fokusvariationsmikroskop benytter sig ligesom et konfokalmikroskop af objektivets dybdefølsomhed til at få information om højdeforskelle.

Princippet for fokusvariation minder om Figur 5A, men uden blænder foran lyskilde og kamera til at begrænse mængden af opsamlet lys. I fokusvariation opsamles lyset derfor også fra områder, der ikke er i fokus. I stedet for blænden anvendes den lokale skarphed i billedet til at afgøre, om et punkt er i fokus.

Dette er illustreret på Figur 6, hvor en hjerteformet struktur er blevet opmålt. Da hjertet er højere på midten i forhold til underlaget rundt om, vil hjerte og underlag ikke begge være i fokus samtidig. Dette er illustreret på Figur 6B og C, som viser billeder med hhv. underlag og hjerte i fokus og resten uskarpt.

UNDERVISNINGSELEMENT G4



Figur 6: Måling af en hjerteformet struktur med fokusvariation. A) 3D model af overfladen. B) Billede af udsnit af hjertet hvor baggrunden er i fokus og toppen af hjertet er uskarpt. C) Udsnit af hjertet hvor toppen er i fokus og baggrunden uskarpt.

Med fokusvariation tages ligesom med konfokalmikroskopi en række billeder, hvor afstand mellem objektiv og emne varieres. Efterfølgende anvendes for hvert punkt på overfladen en algoritme til at bestemme den højde, hvor punktet var i fokus. Dette sættes til sidst sammen til en 3D model, som illustreret i Figur 6A.

### 3.3 Interferensmikroskop

En egenskab ved lys er, at to sammenfaldende lysbølger kan forstærke eller formindske hinandens lysstyrke. Dette kaldes at lyset skaber hhv. konstruktiv og destruktiv interferens, hvilket opstår ved at lysbølgerne enten svinger i takt eller i modtakt som vist på Figur 7.

En måde at danne interferens er at sende to lysbølger på hver sin vej og lade dem mødes samme sted. Har lysbølgerne bevæget sig lige langt, når de mødes igen, vil de forstærke hinandens lysstyrke, som vist på Figur 7A. Har den ene lysbølge derimod bevæget sig en lille smule kortere eller længere, vil den begynde at svinge i modtakt og dæmpe intensiteten, som vist på Figur 7B. Den destruktive interferens vil øges, indtil forskellen i afstand svarer til halvdelen af lysets bølgelængde, hvorved de to bølger total udslukker hinanden som vist på Figur 7C.



Figur 7: Interferens mellem lysbølger. A) To lysbølger, der svinger i takt, forstærker hinanden i konstruktiv interferens. B) Svinger lysbølgerne ude af takt bliver forstærkningen mindre eller forsvinder helt. C) To lysbølger, der svinger i komplet modtakt, formindsker hinanden i destruktiv interferens. Den flade linje viser, at bølgerne har udslukket hinanden.

For større forskel i afstand begynder intensiteten at stige igen, og lysbølgerne vil igen nå fuld konstruktiv interferens, når forskellen i afstand er en hel bølgelængde. Dette mønster vil gentage sig for større forskel i afstand, således at der er konstruktiv interferens ved en forskel i afstand på et helt antal bølgelængder. Destruktiv interferens vil finde sted hvis forskellen er et helt antal bølgelængder plus en halv bølgelængde.

I et interferensmikroskop udnyttes dette til at måle forskelle i højde på en overflade. Mikroskopets opbygning er illustreret på Figur 5B. Lys fra en lyskilde



Figur 8: Måling med interferensmikroskop. A) Billede af overflade med et højdetrin i midten. B) Interferensmikroskopibillede af samme overflade viser, at interferensen påvirkes af trinnets højde ved at interferensstriberne forskydes nedad i billedet.

deles op i to ved brug af en stråledeler. Den ene del sendes ind på et referencespejl og den anden sendes ned på overfladen af emnet. Refleksionen fra begge dele sendes tilbage igennem stråledeleren, hvor lyset opsamles, og intensiteten registreres på en kamerachip.

Har lyset fra alle dele af overfladen bevæget sig samme afstand som til og fra referencespejlet (plus et helt antal bølgelængder) vil der være det samme interferensniveau over hele billedet. Er der en varierende forskel i afstand over billedet grundet en højdeforskel på overfladen, vil det ses som varierende konstruktiv og destruktiv interferens.

På Figur 8 er dette illustreret for en måling af et højdetrin. Lyset fra overfladen danner et antal lyse og mørke interferensstriber på Figur 8B, hvor der er hhv. konstruktiv og destruktiv interferens. Interferensen dannes fordi at overfladen hælder en smule i forhold til mikroskopet, så der er varierende afstand mellem overflade og referencespejl. Striberne har samme grad af interferens langs det flade stykke af overfladen, men hvor striben rammer trinnet, ændres interferensen som følge af højden af trinnet og striben forskydes nedad i billedet.

Til bestemmelse af højden ud fra forskydningen af interferensstriber findes forskellige måleprincipper.

- Med PSI (phaseshifting interferometry) bestemmes højdevariationer på en overflade ved at analysere interferensstribernes intensitet på et enkelt billede. PSI kræver at overfladehøjden ikke varierer for kraftigt.
- Med CSI (coherence scanning interferometry) bestemmes overfladehøjden ved at skanne afstanden mellem mikroskop og overflade og analysere

bevægelsen af interferensen ved brug af flere billeder. CSI kan anvendes på mere varierende overflader.

# 4 Optiske målinger af overflader

Med måling med optisk mikroskopi opnås en geometrisk gengivelse af overfladen i tre retninger – to horisontale samt den vertikale retning. Dette giver mulighed for at måle en lang række parametre i både én og flere dimensioner.

Fra opmålingen af overfladen med mikroskopet dannes en digital beskrivelse af geometrien. Denne kan visualiseres i 3D som illustreret på Figur 9. På den digitale overflade kan der nu foretages geometriske målinger af f.eks. højde og bredde, omkreds, overfladeareal, ruhed og vinkler. I det følgende beskrives eksempler på målinger med optisk mikroskopi.

## 4.1 Afstande

Med optisk mikroskopi kan afstande på mikroskala måles tilsvarende de målemetoder på makroskala, som blev beskrevet i "G1 – Geometriske målinger" [1].

Dette kan både være en horisontal afstand såsom afstanden mellem savtakkerne på Figur 9C, en vertikal afstand såsom højden af pyramiderne på Figur 9B eller en afstand langs en skrå retning som på Figur 10.



Figur 9: Optiske målinger af forskellige geometrier. A) Søjler. B) Pyramider. C) Savtak. (Emnet i A er lavet af NIL Technology og Karlsruhe Institute of Technology)

## Boks 3: Analyse af underskrifter med fokusvariationsmikroskopi.

I sager om forfalskede underskrifter kan det være svært selv for trænede øjne at fange en forfalskning på f.eks. en vigtig kontrakt. Hos danske DeltaPix har man en udviklet en automatiseret scannerløsning Modus AB8000, som med et fokusvariationsmikroskop måler og analyserer dybden af en underskrifts indtryk på papir. Måden en persons underskrift dynamisk ændrer indtrængning i papiret på, er ikke direkte synlig og er derfor svær at forfalske. Ud fra mikroskopimålingerne af en underskrift leverer Modus AB8000 en kvantitativ analyse, som kan bistå i de kriminaltekniske undersøgelser.



Figur 10: Underskriftsskanneren Modus AB8000 (venstre) fra danske DeltaPix benytter fokusvariationsmikroskopi til at måle dybden af underskrifters indtryk på papir (højre) til en kvantitativ analyse af underskrifter. (Billederne er stillet til rådighed af DeltaPix)

UNDERVISNINGSELEMENT G4

Et eksempel på en specifik måling i højden er analyse af underskrifter, som er beskrevet i Boks 3. Det viser sig, at variationen af dybden af indtrykket på papiret er meget specifikt for en persons underskrift. En måling af dybden af indtrykket forskellige steder på en underskrift kan derfor bruges til at skelne ægte fra forfalskede underskrifter, hvilket gøres automatisk i scanneren fra DeltaPix.

#### **Boks 4: Ruhedsparametre**

Der findes mange parametre til at beskrive arealruhed, som beskrevet i ISO 25178-2 [13]. Nogle af de mest er.

- Sz den maksimale højdeforskel mellem bund og top for arealet.
- Sa den gennemsnitlige højdevariation over arealets referenceflade.
- Sq variationen af højden beregnet som kvadratroden af kvadratsummen af højdeværdierne ift. referencefladen (rms værdien).

### 4.2 Arealer, rumfang og vinkler

En opmåling med optisk mikroskopi muliggør også mere komplicerede målinger i flere dimensioner såsom overfaldearealer, rumfang eller vinkler. Eksempler på målinger kunne være omkredsen eller volumet af søjlerne på Figur 9A, overfaldearealet af siderne på pyramiderne på Figur 9B eller vinklen på savtakkerne på Figur 9C.

## 4.3 Ruhed

Måling af ruhed er en meget udbredt anvendelse af optisk mikroskopi. Modsat traditionelle taktile ruhedsmålere (se [6]), som måler en profil langs overfladen, opmåler optiske mikroskoper over et areal på overfladen, hvilket giver en mere detaljeret beskrivelse af overfladens topografi og mulighed for at bestemme arealruheden af overfladen.

Arealruhed beskrives som nævnt i "G2 – ruhed" [7] ud fra en række arealruhedsparametre. Definitionen af nogle af disse er gengivet i Boks 4. Disse opsummerer forskellige aspekter ved overfladen, som hænger sammen med funktionelle egenskaber.

Ruheden kan både være en vigtig parameter ved produktion af nye emner, men kan også være et resultat af slid på en komponent såsom et værktøj.

Ved at måle ruheden i en løbende kvalitetskontrol kan slid på vigtige komponenter overvåges og udskiftninger foretages på rette tid. Dette gøres f.eks. hos Grundfos som beskrevet i Boks 5.

## Boks 5: Ruhedsmåling på værktøjer hos Grundfos

Grundfos fremstiller pumpeløsninger af en høj kvalitet. I produktionen af pumperne benyttes en række værktøjer til at udforme de forskellige komponenter. Over tid bliver værktøjerne imidlertid slidte, hvilket fører til en øget overfladeruhed. I det optiske laboratorium hos Grundfos måles overfladeruheden af værktøjerne løbende ved brug af konfokalmikroskopi. Dette sker som en del af en løbende kvalitetskontrol, der skal sikre kvaliteten af Grundfos' produkter. Med konfokalmikroskopi kan måles på skrå eller svært tilgængelige overflader, som ikke er muligt med taktil ruhedsmåling.



Figur 11: Måling af slid på værktøj hos Grundfos. Ruhedsprofilen måles på højderyggen af en krum overflade. (Billedet er stillet til rådighed af det optiske laboratorium på Grundfos)

UNDERVISNINGSELEMENT	G4

# 5 Kalibrering af mikroskop

For at sikre en korrekt gengivelse af overflader skal optiske mikroskoper kalibreres både i vertikal og horisontal retning.

For specifikke måleopgaver såsom måling af arealruhed kan det være gavnligt med yderligere karakterisering af mikroskopet.

Normaler til brug for kalibrering af mikroskoper i både vertikal og horisontale retninger er beskrevet i ISO 25178-70 [8].

I det følgende gives en grundlæggende beskrivelse af kalibrering af optiske mikroskoper. En mere dybdegående gennemgang kan f.eks. ses i [9] [10].

# 5.1 Vertikal kalibrering

### Nivellering

På visse mikroskoper er det muligt at lave en nivellering, så mikroskopets vertikale akse står vinkelret på referenceemnets overflade. Med et interferensobjektiv kan dette gøres ud fra at minimere antallet af interferenslinjer på emnet. Interferenslinjer opstår pga.



Figur 13: Resultater fra en vertikal flere-punkt kalibrering ved brug af stephøjde referencer. A) Datapunkter og LINEST fit. B) Residualer fra fit.



Figur 12: Normaler til brug for hhv. vertikal og horisontal kalibrering. A) Stephøjde med højde på 8 μm. B) Krydsgitter med periode på 10 μm.

en højdeforskel i billedet, såsom fra en overflade der hælder i forhold til mikroskopet. Færrest interferenslinjer ses derfor, når emnets overflade står vinkelret på mikroskopets vertikale akse.

Da en mekanisk nivellering ikke er perfekt og heller ikke altid er mulig, foretages ofte en softwaremæssig nivellering under dataprocesseringen. Dette gøres ved at fitte et plan til et fladt område på referenceemnet og fratrække dette fra målingen.

#### Vertikal kalibreringsfaktor

Den vertikale kalibrering foretages ud fra kalibrerede højdenormaler og for hvert objektiv på mikroskopet. Typisk anvendes et antal symmetriske stephøjder, som består af ét eller flere step med en veldefineret højde mellem top og referenceniveau på hver side af steppet, som vist på Figur 12A.

UNDERVISNINGSELEMENT G4

Flere-punkts kalibreringen foretages ud fra følgende lineære model for sammenhængen mellem referencehøjden  $h_{ref}$  og målte højde  $h_{målt}$ . Det antages at en referencehøjde på nul vil føre til en målt højde på nul.

Ligning 3:

$$h_{\rm ref} = a_z \cdot h_{\rm målt}$$

Kalibreringsfaktoren  $a_z$  kan efterfølgende anvendes til at korrigere højdeværdier målt med mikroskopet. Da mikroskopet kan måle i flere retninger angives den vertikale kalibreringsfaktor med et 'z' som reference til den vertikale akse i et 3D koordinatsystem (xyz).

Et eksempel på en flere-punkts kalibrering er vist i Figur 13. Fem stephøjdereferencer med symmetriske step i intervallet 10  $\mu$ m - 100  $\mu$ m blev målt. Højden findes som forskellen mellem det vertikale niveau på midten af steppet og et fælles referenceplan på hver side af steppet i tråd med ISO 5436 [11], som beskrevet i afsnit 6.1 og illustreret på Figur 17C.

Resultatet af kalibreringen er vist i Figur 13A med kalibreringsfaktoren  $a_z = 1,00294$  angivet. Afvigelsen mellem fit og referenceværdier ligger inden for ±0,15 µm som vist i Figur 13B.

I kalibreringen af et mikroskop på et akkrediteret laboratorium vil man typisk måle på stephøjdereferencerne et antal gange og gentage målingerne over flere dage for at inkludere repetérbarhed og reproducérbarhed i kalibreringen.

#### Baggrundsstøj

Optiske mikroskoper har i lighed med andre måleinstrumenter en baggrundsstøj, som stammer fra vibrationer i de elektriske og mekaniske dele i mikroskopet. Baggrundsstøjen kan ikke undgås, og vil komme med i alle målinger med mikroskopet.

Derfor er det vigtigt at have en ide om størrelsen, da det er med til at bestemme, hvor små højdevariationer der kan måles. Hvis overfladen således er glattere end størrelsen af baggrundsstøjen, vil man kun måle denne støj og ikke den faktiske overflades geometri.

Til at finde baggrundsstøjen anvendes et planglas, se Figur 14, som kun varierer en brøkdel af en mikrometer i højden. Der foretages to målinger som fratrækkes hinanden. Derved vil den tilbageværende højdevariation alene stamme fra støjen, der bestemmes som parameteren Sq delt med kvadratroden af to. Der



Figur 14: Et planglas kan benyttes til at bestemme usikkerhedsbidrag fra baggrundsstøj og afvigelse fra planhed. A) Planglas. B) Overfladetopografi målt med konfokalmikroskop.

divideres med kvadratroden af to, da der er benyttet to målinger.

#### Planhed

En kilde til usikkerhed i optiske målinger er afvigelser fra planheden ved måling på en plan overflade.

Afvigelserne fra planheden skyldes, at objektivets fokusplan i virkeligheden ikke er et fladt plan, men krummer en smule. Derved opfattes punkter ude i siden af mikroskopets billedfelt som at ligge i en anden afstand end punkter i midten. Denne effekt ved objektivet kaldes for *sfærisk aberration*.

Kommercielle mikroskoper vil ofte have en korrektion for den sfæriske aberration som en del af softwaren. Da korrektionen ikke vil fjerne alle afvigelser, bestemmes bidraget fra afvigelser fra planheden som et led i kalibreringen af mikroskopet.

Til måling af afvigelser fra planhed benyttes et planglas som vist på Figur 14A. Fra den målte topografi (illustreret på Figur 14B) udregnes arealruhedsparameteren Sz som angiver forskellen på det højeste og laveste punkt på overfladen. Da Sz er meget følsom over for f.eks. støv eller ridser foretages målinger forskellige steder på planglasset, og et gennemsnit af Sz værdier anvendes. Som nævnt i afsnit 6.3 beskrives usikkerhedsbidraget med en rektangulær fordeling.

# 5.2 Horisontal kalibrering

#### Horisontale kalibreringsfaktorer

Den horisontale kalibrering foretages typisk ved brug af et eller flere kalibrerede krydsgitre. Gitrene består af et kvadratisk mønster af felter med en nøjagtig periode i begge horisontale retninger, som vist på Figur 12B. Derved muliggøres en samtidig kalibrering af mikroskopet i begge horisontale retninger.

Den horisontale kalibrering foretages ligeledes typisk som en flere-punkts kalibrering. Som med den vertikale kalibrering, anvendes en tilsvarende lineær model for sammenhængen mellem referenceperioderne  $x_{ref}$  og  $y_{ref}$  og de målte perioder  $x_{målt}$  og  $y_{målt}$ , som givet ved

Ligning 4:

$$x_{\text{ref}} = a_x \cdot x_{\text{målt}}$$
$$y_{\text{ref}} = a_y \cdot y_{\text{målt}}$$

Kalibreringsfaktorerne  $a_x$  og  $a_y$  kan efterfølgende anvendes til at korrigere horisontale afstande målt med mikroskopet.

I kalibreringen af et mikroskop på et akkrediteret laboratorium vil man typisk måle på krydsgitter normalerne et antal gange over flere dage for at inkludere repetérbarhed og reproducérbarhed i kalibreringen.

#### Rumlig opløsning

Den rumlige opløsning af mikroskopet bidrager ligeledes til usikkerheden i en måling af en overflade. Til at bestemme den rumlige opløsning kan benyttes en normal med stjerneformede riller som vist på Figur 15A.

Rillerne har samme højde over hele stjernens område, men bredden mindskes fra yderkanten og ind mod centrum. I en optisk måling af overfladen vil højden begynde at aftage for små bredder, når den rumlige opløsning ikke længere er tilstrækkelig til at gengive rillerne. Usikkerhedsbidraget fra den rumlige opløsning kan estimeres ved at finde afstanden til



Figur 15: Normaler til brug for kalibrering af optiske måleinstrumenter. A) Normaler med stjerneformede riller kan benyttes til at bestemme den rumlige opløsning. B) Normaler med irregulære højdevariationer benyttes til at kalibrere arealruhedsmålinger.

centrum fra det punkt, hvor den målte højde er aftaget til 50 % af rillens højde.

# 5.3 Kalibrering af ruhed

En nøjagtig gengivelse af en overflades topografi afhænger af både vertikale og horisontale egenskaber ved mikroskopet. Til målinger af arealruhed på en overflade kalibreres mikroskopet derfor i både vertikal og horisontal retninger som beskrevet i de foregående afsnit.

Derudover kan særlige areal ruhedsnormaler med veldefinerede værdier af ruhedsparametre benyttes til at følge kalibreringen over tid. Et eksempel på en ruhedsnormal med irregulære højdevariationer er vist på Figur 15B. Ved at måle normalen løbende for, om de målte ruhedsværdier begynder at afvige, er det muligt at holde øje med, om der er behov for en genkalibrering af mikroskopet.

# 5.4 Sporbarhedskæde for optisk måling af overfladers topografi

Akkrediteret kalibrering sikrer sporbarhed hele vejen tilbage til meteren. Sporbarhedskæden for optisk måling af overfladers topografi kan variere alt afhængig af hvilket udstyr som benyttes i de enkelte led i kæden. På Figur 16 ses et eksempel på en sporbarhedskæde.

Sporbarhedskæden starter med definitionen af længde med enheden meter. Meteren er defineret som den strækning lys tilbagelægger i løbet af en given tid. Meteren er realiseret ved hjælp af en laser. Denne laser kaldes for primær-laseren og befinder sig på et af de nationale metrologiinstitutter. Dette er beskrevet mere uddybende i kompendiet "A1 – Introduktion til målinger" [3].

Primær-laseren sammenlignes med en sekundær laser. Den sekundære laser benyttes i et *laserinterferometer*, der er indbygget i et AFM mikroskop (Atomic Force Microscope). I AFM mikroskopet sidder en probe, som består af en følsom bladfjeder med en meget tynd spids monteret for enden. Når spidsen kommer i kontakt med en overflade måles et udsving fra proben i AFM mikroskopet. Laserinterferometeret kan så med nanometer præcision og nøjagtighed måle den afstand, som overfladen befinder sig i.

I næste led benyttes AFM mikroskopet til at måle dimensioner på en eller flere overførselsnormaler. Som nævnt benyttes typisk som overførselsnormal i den vertikale retning en stephøjde og horisontalt benyttes et krydsgitter. En stephøjde består af trin med en veldefineret højde, mens krydsgitteret har veldefinerede perioder i bredde og længderetning.

Det optiske mikroskop kalibreres så ved at måle afstandene på overførselsnormalerne. Herved sikres sporbarhed til meteren via sammenligningen med AFM mikroskopets målinger. Oftest vil et sæt af flere stephøjder og krydsgitre anvendes til at sikre kalibrering inden for et større interval vertikalt og horisontalt.

Stephøjderne har en højde, som er relevant for mikroskopets vertikale arbejdsområde, typisk i intervallet fra 0,01 til 100  $\mu$ m. For krydsgitrene vil perioderne have en værdi, som svarer til et antal gange af den rumlige opløsning typisk i området fra 1 til 50  $\mu$ m.

Derved er sporbarheden sikret fra definitionen af meteren til selve målingen af overfladen på et ukendt emne.



Figur 16: Eksempel på en sporbarhedskæde for en optisk måling af overfladers topografi. De enkelte led er uddybet i teksten.

# 6 Usikkerhedsbudget for optisk overflademåling

I dette afsnit gennemgås et eksempel på at opstille et usikkerhedsbudget for en optisk måling med konfokalmikroskopi af en højdeforskel på en overflade.

En kunde inden for sprøjtestøbning af plast ønsker at få opmålt højden af en tekst på overfladen af et emne. Emnet er udført i materialet polyethylen (PE), og kunden oplyser, at der derfor vil være en naturlig variation i højden hen over teksten. For at teksten er let læselig skal højden ligge inden for 60 til 80  $\mu$ m, hvilket kunden ønsker at få målt efter.

Efter en nærmere diskussion (se Boks 6) bliver I enige om at opstille to måleparametre for tekstens højde med hver sin tolerance; nemlig en gennemsnitlig højde på 70  $\pm$ 5  $\mu$ m, og en standardafvigelse af de målte højdeværdier på højest 5  $\mu$ m. Det sidste tager hensyn til, at der bl.a. vil være en vis ruhed på plasten.

Til højdemålingen benyttes et konfokalmikroskop. Du udvælger et bogstav, som afbilledes, og højden måles for hver linje på tværs af bogstavet (se Figur 17).

For at kunne afgøre om tolerancerne er overholdt, skal instrumentets kalibrering tages i betragtning og usikkerheden på målingen bestemmes. I det følgende er måleteknikkens sekstakkede stjerne (se A1 – Introduktion til målinger [3]) benyttet til at identificere de mulige kilder til måleusikkerhed og estimere deres bidrag.

## 6.1 Måleemne

Fremgangsmåden for målingen på måleemnet er illustreret på Figur 17. Et bogstav i teksten udvælges som vist på Figur 17A og overfladens højdevariation måles med konfokalmikroskopet som vist på Figur 17B.

Til at finde højden følges standarden ISO 5436 [11] for måling af symmetriske trin. På begge sider af bogstavet bestemmes et fælles referenceniveau og på toppen bestemmes et højdeniveau (se Figur 17C). Højden beregnes som afstanden mellem reference- og højdeniveau. Dette gøres for hver linje på tværs af bogstavet.

Den gennemsnitlig højde blev målt til 73,449  $\mu$ m, og standardafvigelsen bestemmes ud fra de målte højder

### Boks 6: Målestørrelser på plastemne

I geometriske målinger er målestørrelsen typisk en veldefineret afstand på et emne, f.eks. en længde, bredde eller diameter, som måles med en vis usikkerhed

Variationer i plastmaterialet gør at højden på teksten ligger i et interval og ikke udgøres af én enkelt højde.

En måde at håndtere dette på er at definere flere målestørrelser, som for eksempel

- Minimal og maksimal tilladt højde
- Gennemsnitlig højde samt standardafvigelse

Løsningen med at fastsætte en minimal og maksimal tilladt værdi giver nogle klare grænser. Det kan være relevant at fastsætte for bevægelige dele, såsom diametre på aksler og lejer. Til gengæld vil det potentielt kræve at alle områder opmåles for at finde min og max.

Løsningen med en gennemsnitsværdi og standardafvigelse beskriver, hvordan hovedparten af værdierne fordeler sig og kan lettere bestemmes end min og max værdi.

Da det for tekstens højde på plastemnet er vigtigst, hvordan hovedparten af værdierne fordeler sig vælges løsningen med gennemsnit og standardafvigelse.



Figur 17: Måling af højde af tekst på et plastemne ved konfokalmikroskopi. A) Teksten på plastemnet med måleområde angivet. B) Opmålt område i 3D med profil på tværs af teksten. Lysere farve indikerer større højde. C) Eksempel på profil med illustration af fremgangsmåden for højdemåling. Højden h måles jvf. ISO 5436 som afstanden mellem højderyggen i midten og et symmetrisk referenceniveau på hver side. til at være 2,454 µm. Værdierne antages at være normalfordelte omkring gennemsnittet. Standardusikkerheden på gennemsnitsværdien fås derfor ved at dividere med kvadratroden af antal profiler på tværs og bestemmes til at være 0,065 µm. Der sættes ikke normalt en usikkerhed på værdien af en standardusikkerhed.

I det følgende bestemmes kilder til usikkerheden på den gennemsnitlige højde.

### 6.2 Mikroskop (måleudstyr)

Mikroskopet bidrager primært til måleusikkerheden gennem baggrundsstøj i billederne og uperfektheder i optikken. Støjen kan stamme fra vibrationer samt elektrisk støj fra kameraudlæsningen. Uperfekterheder i optikken forsøges korrigeres som led i målemetoden som nærmere beskrevet i afsnit 6.3.

Bidraget fra støjen kan estimeres ved at måle arealruheden Sq (se Boks 4) af et *planglas*. Der foretages to målinger af overfladen, som trækkes fra hinanden, sådan at den tilbageværende variation vil stamme fra støjen.

Fra kalibreringen af mikroskopet (se afsnit 5.1) er der målt en Sq på 0,022 µm. Da der er foretaget to målinger vil usikkerhedsbidraget fra støjen reduceres med kvadratroden af to. Støjen beskrives med en normalfordeling.

$$u(baggrundsstøj) = \frac{0.022 \ \mu m}{\sqrt{2}} = 0.016 \ \mu m$$

Dele af baggrundsstøjen kan være forårsaget af vibrationer i målemiljøet, men vil indgå i bidraget for støjen fra måleinstrumentet.

### 6.3 Målemetode

Optikken i et mikroskop er aldrig helt perfekt. For en måling af en plan overflade fører disse uperfektheder til, at den målte overflade bliver let kurvet. Producenter af mikroskoper forsøger at korrigere for afvigelsen fra planhed som en del af målemetoden, men en vis usikkerhed kan ikke undgås helt.

Bidraget til måleusikkerheden fra afvigelsen på planheden kan estimeres ud fra parameteren Sz (se Boks 4) ved at måle på et *planglas*.

Ved kalibreringen af mikroskopet (se afsnit 5.1) blev målt en Sz på 0,199  $\mu m$  på planglasset. På trods af de

indbyggede korrektioner i målemetoden måler mikroskopet afvigelser fra planhed inden for 0,199  $\mu$ m. Til at beskrive usikkerhedsbidraget vælges en rektangulær fordeling, hvilket giver et bidrag på

$$u(planhed) = \frac{0,199 \,\mu\text{m}}{2\sqrt{3}} = 0,058 \,\mu\text{m}$$

### 6.4 Målemiljø

Da et materiale udvides af en øget temperatur, er det vigtigt at overveje indvirkningen af temperaturen på enhver geometrisk måling (inkl. optiske). For målinger med mikroskoper vil temperaturens bidrag til måleusikkerheden dog ofte være lille i forhold til andre bidrag, og der kan normalt ses bort fra det. Lad os prøve at udregne, om det er tilfældet for højdemålingen på det sprøjtestøbte plastemne.

Som beskrevet i "G1 – Geometriske målinger" [1] afhænger emnets udvidelse ( $\Delta L$ ) af længden i den målte retning (L), materialets udvidelseskoefficient ( $\gamma$ ) og ændringen i temperatur ( $\Delta T$ ), givet ved formlen:

$$\Delta L = \gamma \cdot L \cdot \Delta T$$

Som værdi for L benyttes højden af kanten, som er målt til 73,3 µm eller 0,0000733 m, og for PE ligger udvidelseskoefficienten  $\gamma$  på omkring 150 µm/(m°C). Lokalet med mikroskopet er ikke klimastyret, og temperaturen forventes at ligge mellem 21 til 29 °C. Derfor sættes  $\Delta T$  til ±4°C. Udvidelsen bliver altså:

$$\Delta L = 150 \ \mu m / (m \cdot ^{\circ}C) \cdot 0,0000733 \ m \cdot (\pm 4 \ ^{\circ}C)$$
$$= \pm 0,044 \ \mu m$$

Da det ikke vides, hvordan temperaturen varierer mellem 21 og 29 °C, vælges en rektangulær fordeling til at beskrive måleusikkerheden. Den maksimale længeudsving på  $2 \cdot \Delta L$  dvs 0,088 µm indsættes

$$u_{\rm temp} = \frac{0,088 \ \mu m}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,025 \ \mu m$$

Et usikkerhedsbidrag på temperaturudvidelsen på 0,025 µm er på niveau med bidragene fra måleudstyr og målemetode, så det vil i dette tilfælde være relevant at medtage bidraget.

### 6.5 Reference

Forud for målingen er konfokalmikroskopet blevet kalibreret. Da vi i denne omgang alene måler højder, kan

UNDERVISNINGSELEMENT G4

# metrologi.dk Usikkerhedsbudget

Felter med blå skrift udfyldes af brugeren

## Måling af højde med konfokalmikroskop

i Målestørrelse (enhed)	Fordeling	$\boldsymbol{x}_i$	u(x ,)	$u_i(\mathbf{y})$			
1 Måleemne - Gennemsnitlig højde (µm)	Normal	73.449	0.065	0.065			
2 Måleudstyr - Baggrundsstøj (µm)	Normal	0	0.016	0.016			
3 Målemetode - planhed (µm)	Rectangular	0	0.058	0.058			
4 Miljø - termisk udvidelse (µm)	Rectangular	0	0.025	0.025			
5 Reference - Kalibreringsfaktor a (relativ)	Normal	1.00294	0.00075	0.055			
6 Operatør (relativ)	Normal	0	0.001	0.073			
7							
γ Højde korrigeret (μm)	Normal	73.66	0.13				
	Conf. level =	95.45%	k =	2.0000			
DFM-GUM ver. 2.2a	Result =	73.66	U =	0.26			
$VIOUEI. t - (\Lambda_5 + \Lambda_6)^{-} \Lambda_1 + \Lambda_3 + \Lambda_4 + \Lambda_2$							

Tabel 1: Usikkerhedsbudget for måling af højden på teksten på et plastemne med et konfokalmikroskop. Til opstilling af usikkerhedsbudgettet er regnearket "A4 - Usikkerhedsbudget regneark" [4] benyttet.

vi nøjes med at medtage kalibreringen i højderetningen. Dertil er anvendt såkaldte stephøjde referencer, som består af symmetriske trin med en veldefineret højde. Højden af disse trin er blevet kalibreret på et akkrediteret laboratorium.

For at sikre pålidelige målinger i et bredt højdeinterval er kalibreringen udført som en flere-punkts kalibrering (se "A1 – Introduktion til målinger" [3]). Ud fra en lineær regression på referenceværdier  $h_{ref}$  og målte værdier  $h_{målt}$  fås en kalibreringsfaktor a (se afsnit 5.1). De målte værdier  $h_{målt}$  kan efterfølgende korrigeres ved at gange kalibreringsfaktoren på.

Kalibreringen gav en kalibreringsfaktor med værdi på a = 1.00294 og en standardusikkerhed (k=1) på u(a) = ±0.00075, som beskrives med en normalfordeling.

## 6.6 Operatør

Ved optisk måling af overflader med mikroskopi er operatørens bidrag til måleusikkerheden begrænset, idet operatøren hverken har kontakt med måleudstyr eller måleemne under målingen.

Orientering og placering af prøven, før målingen foretages, afhænger til gengæld af operatøren. For et plastemne med relativ stor variation vil måleresultatet også påvirkes af, hvordan måleområdet udvælges.

Da to operatører ikke vil placere emnet eller udvælge måleområdet helt på samme måde bidrager operatøren til måleusikkerheden. Dette kan vurderes ved at lade flere operatører måle på samme emne med samme udstyr, metode, målemiljø og kalibrering. Operatøren estimeres i dette tilfælde til at bidrage med en relativ usikkerhed på 0,1%, som beskrives med en normalfordeling.

# 6.7 Usikkerhedsbudgettet

Alle kilderne til usikkerhed samles nu i usikkerhedsbudgettet, se Tabel 1. Til opstilling af usikkerhedsbudgettet og beregningerne er brugt regnearket "A4 -Usikkerhedsbudget regneark" [12].

De enkelte søjler i usikkerhedsbudgettet har følgende betydning:

1. søjle beskriver kilden til usikkerhed.

2. søjle viser den anvendte sandsynlighedsfordeling.

3. søjle viser måleværdien. Ud over den gennemsnitlige højde i 1. række, og korrektionsfaktoren i 5. række er resten af værdierne nul. De påvirker altså alene usikkerheden og ikke måleværdien.

4. søjle viser den beregnede usikkerhed for hver kilde.

5. søjle fortæller hvor meget den enkelte kilde bidrager i  $\mu$ m til usikkerheden på den korrigerede højde (efter korrektion med kalibreringsfaktor o.l.)

Nederst i usikkerhedsbudgettet er modellen for beregning af måleresultatet angivet. De fire første kilder til usikkerhed (måleemne X1, måleudstyr X2, målemetode X3 og miljø X4) giver et absolut bidrag målt i  $\mu$ m, hvilket lægges til måleresultatet. De sidste to kilder (reference X5 og operatør X6) giver et relativt bidrag som ganges på bidraget fra måleemnet X1.

Excelarket beregner den samlede usikkerhed ud fra modellen ved at anvende regnereglerne for usikkerhedsberegning som er gennemgået i kompendiet "A3 – Introduktion til usikkerhedsbudgetter" [4].

Resultatet af usikkerheden ses i række "y" i Tabel 1 til at være 0,13  $\mu$ m. For at opnå en dækningssandsynlighed på 95% ganges dækningsfaktoren k=2 på resultatet, og den ekspanderede usikkerhed bliver derfor 0,26  $\mu$ m.

# 6.8 Måleresultatet

Det endelige måleresultat fås ud fra modellen ved at korrigere den målte gennemsnitlige højde  $h_{målt}$  med kalibreringsfaktoren *a*, hvilket er gjort i række "y".

Den endelige højde med ekspanderet usikkerhed er således

 $h_{korrigeret} = 73.66 \ \mu\text{m} \pm 0.26 \ \mu\text{m}$ 

Det endelige resultat for standardafvigelsen fås ligeledes ved at korrigere med kalibreringsfaktoren og er

$$\delta_{korrigeret} = 2,46 \, \mu m$$

Måleresultaterne på både den gennemsnitlige højde samt standardafvigelsen ligger altså inden for tolerancerne på hhv. 70  $\pm 5 \ \mu m \ og \ 5 \ \mu m.$ 

Derudover ses, at standardafvigelsen af de målte højder er næsten ti gange større end usikkerheden på den gennemsnitlige højde. Valget med at dele målingen op i to målestørrelser virker derfor fornuftig.

# Boks 7: Test dig selv II Usikkerhedsbudgettet

Efter måling af højden på teksten vil målelaboratoriet gerne prøve at forbedre usikkerheden af fremtidige målinger. Overvej følgende forslag til forbedringer:

- Hvis konfokalmikroskopet flyttes til et klimastyret rum med temperaturudsving på højest ±1°C, hvad bliver usikkerhedsbidraget fra målemiljøet så?
- 9. En ny softwareopdatering til mikroskopet inkluderer en forbedret korrektion af afvigelser fra planheden, som vurderes at kunne nedbringe den målte Sz til 120 μm. Hvad bliver usikkerhedsbidraget fra målemetoden så?

### Horisontal måling

Inden eventuelle forbedringer når at blive iværksat vender kunden tilbage og spørger om at få målt bredden på bogstaverne på samme emne. Overvej følgende:

- Hvilke af usikkerhedsbidragene i Tabel 1 fra målingen af højden vil kunne genbruges i målingen af bredden?
- Hvilke nye usikkerhedsbidrag ville skulle medtages? (Læs eventuelt først afsnit 5.2 om horisontal kalibrering)

Vejledende besvarelse i afsnit 9.2 på side 20.

# 7 Opsummering

I dette kompendium introduceres læseren til optiske målinger af overflader ved brug af optisk mikroskopi. Derudover beskrives mulige optiske målinger og et eksempel på usikkerhedsbudget for en konkret måling gennemgås.

Måleprincippet i optisk mikroskopi starter med objektivet. Selvom optiske mikroskoper anvender forskellige typer af måleprincipper til at bestemme overfladens topografi, bestemmer objektivet i sidste ende den opnåelige opløsning. I en måling med optisk mikroskopi tages typisk en række billeder, hvor afstand mellem overfladen af emnet og objektivet varieres. Ud fra disse billeder kan overfladens højdevariationer registreres digitalt og illustreres i 3D.

Den digitale gengivelse af overfladen kan efterfølgende anvendes til at opmåle en række geometriske størrelser på overfladen, såsom afstande, vinkler, arealer, volumen og ruheden.

Til enhver måling skal udarbejdes et usikkerhedsbudget. Et eksempel på et sådant usikkerhedsbudget er gennemgået for en konkret måling.

Optiske mikroskoper kalibreres ved brug af referencenormaler, som har en veldefineret geometri. Til den vertikale kalibrering anvendes typisk stephøjder med trin af en veldefineret højde og horisontalt anvendes krydsgitre med veldefinerede perioder. Derudover benyttes planglas og en normal med stjerneformede riller til at bestemme støj, afvigelse fra planhed og rumlig opløsning. For kalibreringen i hver retning kan en kalibreringsfaktor beregnes, så det sikres, at mikroskopet måler pålideligt og sporbart.

Sporbarheden af en optisk måling af en overflade med et optisk mikroskopi sikres ved at anvende kalibrerede referencenormaler i kalibreringen af mikroskopet. Ved at få kalibreret referencenormalerne hos et akkrediteret laboratorium sikres sporbarheden.

# 8 Ordliste

Begreb	Forklaring	Afsnit
Arbejdsafstand	Et emne skal placeres i objektivets arbejdsafstand for at være i fo- kus i mikroskopets billede. Arbejdsafstanden er altså afstanden mellem objektivet og fokusplanet.	2.1, 3
Dybdefølsomhed	Et objektivs dybdefølsomhed er en konsekvens af, at det kun er et begrænset højdeinterval, der kan være i fokus på samme tid. Dyb- defølsomheden anvendes i mikroskopi til at måle højdevariationer på et emnes overflade. Generelt betyder en højere numerisk aper- tur en bedre dybdefølsomhed.	3
Fokusplan	Fokusplanet angiver det område for objektivet, hvor et emnes overflade vil fremstå skarpt. Er dybden af fokusplanet mindre end højdevariationen, vil kun dele af overfladen være skarpt. Trods navnet er fokusplanet ikke fladt, men krummer en smule.	3
Interferens	En bølgeegenskab ved lys er, at to lysbølger kan interferere med hinanden. Svinger lysbølgerne i takt vil de forstærke hinanden, mens de vil dæmpe hinanden i tilfælde af modtakt.	3.3
Kalibreringsfaktor	En kalibreringsfaktor for et optisk mikroskop angiver forholdet mellem referenceværdier for de anvendte normaler og de målte værdier med mikroskopet.	6.5, 5
Mikrometer, μm	I mikrometer angiver præfikset "mikro" en milliontedel af SI-enhe- den "meter". Skrives også $\mu m$ med det græske symbol " $\mu$ " [my] som angivelse af "mikro". Dvs. 1 $\mu$ m = 0,000001 m	2.1
Numerisk apertur	Det numeriske apertur NA er et mål for objektivets evne til at op- samle lys og gengive et emnes detaljer. I luft er størrelsen af NA givet ved den maksimale vinkel, som lyset kan opsamles i. I en må- ling i en væske øges NA grundet væskens brydningsindeks.	2.1
Objektiv	Objektivet står for at danne det primære billede i mikroskopet, og er mikroskopets vigtigste komponent. Mens et primitivt objektiv kan udgøres af en enkelt linse, består et moderne objektiv af en kompleks samling af et antal linser og andre optiske elementer.	2.1, 3
Opløsning	Opløsningen for et objektiv angiver den mindste afstand mellem to punkter, der kan skelnes i et mikroskopibillede. Opløsningen af- hænger af objektivets numeriske apertur.	2.1
Optisk forstørrelse	Den optiske forstørrelse er et tal M, der angiver, hvor mange gange objektivet forstørrer et emne, der er placeret i objektivets arbejdsafstand.	2.1
Refleksion	Ved måling i refleksion måles det reflekterede lys fra overfladen af et emne. Står i kontrast til transmission, hvor lyset sendes igen- nem emnet og ind i objektivet.	3
Repetérbarhed	Graden af overensstemmelse mellem gentagende målinger fore- taget over et kort tidsrum og under samme betingelser.	5.1, 5.2
Reproducerbarhed	Graden af overensstemmelse for målinger foretaget under lidt for- skellige betingelser. F.eks. forskellige operatører eller tidsrum.	5.1, 5.2
Topografi	Topografi er en overordnet betegnelse for højdevariationer på en overflade.	3, 4.3, 5.3

# 9 Svar på test-dig-selv

## 9.1 Test-dig-selv l

Forslag til forklaringer og svar på spørgsmål

1. Bredden og længden af kamerachippen er 10 mm (1000 pixels × 10  $\mu$ m = 10.000  $\mu$ m = 10 mm) Ved x5 forstørrelse er bredde og længde af mikroskopibilledet derfor 2 mm. (Billedbredde =  $^{\text{Chipbredde}} = ^{10 \text{ mm}} = 2 \text{ mm}$ )

(Billedbredde =  $\frac{\text{Chipbredde}}{M} = \frac{10 \text{ mm}}{5} = 2 \text{ mm}$ )

- Ved x20 forstørrelse er billedet 4 gange (20/5) mindre end ved x5, altså er bredden og længden 0,5 mm.
- 3. Da både bredde og længde er 4 gange mindre, skal der altså lægges fire billeder efter hinanden i både bredde- og længderetning for at dække samme område som et x5 billede. Antallet af billeder er derfor  $4 \times 4 = 16$ .
- 4. Størrelsen af en enkelt pixel ved x20 forstørrelse er tilsvarende bredden på pixlen divideret med M. Altså fås  $\frac{10 \ \mu m}{20} = 0.5 \ \mu m$
- 5. Med NA = 0,12 bliver  $D = \frac{0,61 \cdot 0,5 \,\mu\text{m}}{0,12} = 2,5 \,\mu\text{m}.$ (Ved denne NA vil en struktur på størrelse med D fylde 5x5 pixels for x20 objektiv og kamerachip ovenfor. En struktur med samme størrelse lige ved siden af vil således have overlappende pixels. Strukturerne kan derved ikke skelnes fra hinanden, og billedet vil derfor virke sløret.)
- 6. Med NA = 0,87 bliver  $D = \frac{0.61 \cdot 0.5 \ \mu m}{0.87} = 0.35 \ \mu m$ (Ved denne NA vil en struktur på størrelse med D fylde mindre end 1 pixel for x20 objektiv og kamerachip ovenfor. Billedet vil derved virke skarpt.)
- 7. For at opløse størrelser på D=1,0  $\mu$ m kræves en NA på NA =  $\frac{0.61 \cdot 0.5 \ \mu m}{1.0 \ \mu m} = 0.31$

# 9.2 Test-dig-selv II

Forslag til forklaringer og svar på spørgsmål

8. Med et temperaturudsving på højest ±1 °C vil udvidelsen af materialet være  $\Delta L =$ 150 µm/(m·°C) · 0,0000733 m · (±1 °C) = ±0,011 µm og usikkerheden  $u_{\text{temp}} = \frac{2 \cdot 0,011 \text{ µm}}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,006 \text{ µm}$ (en fjerdedel af værdien ved ±4°C)

- 9. En Sz på 0,120 µm vil give et usikkerhedsbidrag på  $u(planhed) = \frac{0,120 \text{ µm}}{2\sqrt{3}} = 0,035 \text{ µm}$
- 10. Usikkerhedsbidrag, der vil gå igen:

*Operatøren* – det kan antages, at det relative bidrag for operatøren er det samme for målingen af bredden.

*Målemiljø* – der vil være samme relative termiske udvidelse af materialet i bredden som i højden. Dog skal denne udregnes ud fra størrelsen på bredden.

(Baggrundsstøj, afvigelse fra planhed og vertikal kalibrering vil ikke spille signifikant ind i en horisontal måling.)

 Nye usikkerhedsbidrag til måling af bredden: Horisontal kalibrering – der skal medtages kalibreringsfaktorer for de horisontale retninger. Opløsning – Opløsningen bestemmer hvor små strukturer, der kan måles.

# 10 Læringsudbytte

Efter gennemførsel af dette undervisningselement om optisk måling af overflader er det målet, at den studerende kan

- 1. Beskrive og forstå optiske målinger af overflader.
- 2. Forstå måleprincipperne bag optisk mikroskopi.
- 3. Kunne gengive mulige geometriske målinger ved brug af optisk mikroskopi på overflader.
- 4. Beskrive anvendelsen af referencenormaler til kalibrering af optiske målinger.
- 5. Identificere og evaluere mulige kilder til usikkerhed for optiske målinger.
- 6. Vurdere et måleresultat og beregne den tilknyttede måleusikkerhed

#### Forudsætninger:

Det anbefales, at kompendierne "G1 – Geometriske målinger" [1] og "G2 – Ruhed" [2] er læst. Derudover vil det være en gavn at have læst kompendierne "A1 – Introduktion til målinger" [3] og "A3 – Introduktion til usikkerhedsbudgetter" [4] og være bekendt med "A4 – Usikkerhedsbudget regneark" [12].

# **11 Litteraturliste**

- S. R. Johannsen, G1 Geometriske målinger, Lyngby: metrologi.dk, 2017.
- [2] M. S. Nielsen og S. R. Johannsen, G2 Ruhed, Lyngby: metrologi.dk, 2017.
- [3] S. R. Johannsen og M. H. Madsen, A1 -Introduktion til målinger, Lyngby: metrologi.dk, 2017.
- [4] D. Balslev-Harder, S. R. Johannsen og M. H. Madsen, A3 - Introduktion til usikkerhedsbudgetter, Lyngby: metrologi.dk, 2017.
- [5] R. Leach og e. al, Optical Measurement of Surface Topography, R. Leach, Red., Teddington: Springer, 2011.
- [6] S. R. Johannsen, G3 Måling af ruhed med taktil ruhedsmåler, Hørsholm: metrologi.dk, 2018.
- [7] M. S. Nielsen og S. R. Johannsen, G2 Ruhed, Lyngby: metrologi.dk, 2017.
- [8] Dansk Standard, DS/ISO 25178-70 Geometriske produktspecifikationer (GPS) -Overfladebeskaffenhed: Areal - Del 70: Materialiserede mål, 2014.
- [9] C. L. Giusca og R. Leach, Calibration of the metrological characteristics of Imaging Confocal Microscopes (ICMs), NPL, 2013.
- [10] C. L. Giusca og R. Leach, Calibration of the metrological characteristics of Coherence Scanning Interferometers (CSI) and Phase Shifting Interferometers (PSI), NPL, 2013.
- [11] Dansk Standard, DS/ISO 5436-1 Geometrical product specification (GPS) -Surface texture: Profile method; Measurement standards - Part 1, 2000.
- [12] D. Balslev-Harder, S. R. Johannsen og L. Nielsen, A4 - Usikkerhedsbudget regneark, Lyngby: metrologi.dk, 2017.

- [13] R. Hooke, Micrographia, or, Some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses: With observations and inquiries thereupon., London: J. Martyn and J. Allestry, 1665.
- [14] D. Schorsch, »Wikimedia Commons,« 5 April 2010. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Con focal\_measurement\_of\_1-eurostar\_3d\_and\_euro.png.
- [15] Dansk Standard, DS/ISO 25178-2 Geometriske produktspecifikationer (GPS) -Overfladebeskaffenhed: Areal - Del 2: Termer, definitioner og parametre, 2012.