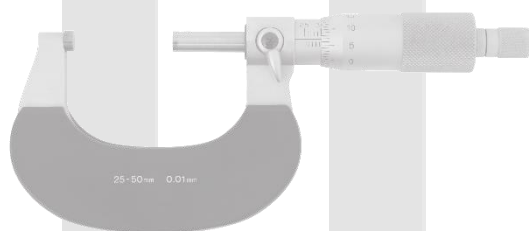


# MÅLING AF RUHED MED TAKTIL RUHEDSMÅLER

UNDERVISNINGSELEMENT

# G3

—  
UNDERVISNING  
I MÅLETEKNIK

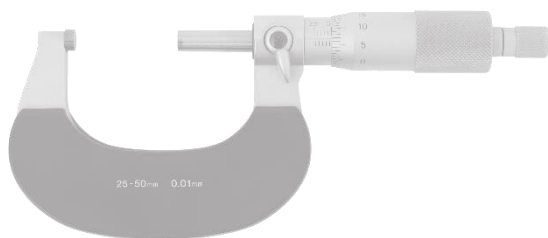




# MÅLING AF RUHED MED TAKTIL RUHEDSMÅLER

Sabrina R. Johannsen & Mikkel S. Nielsen, DFM A/S

1. udgave – Juni 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. Materiale 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 [www.metrologi.dk](http://www.metrologi.dk).*

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

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

## Indholdsfortegnelse

<b>1 Indledning</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Måling af ruhed</b> .....	<b>1</b>
<b>3 Taktil ruhedsmåler</b> .....	<b>2</b>
3.1 Måleprincip for taktil ruhedsmåler .....	2
3.1.1 Filtrering af total profilen .....	3
3.1.2 Muligheder og begrænsninger .....	4
3.2 Ruhedsnormaler .....	5
Boks 1: Typer af ruhedsnormaler .....	5
3.3 Prøvning af taktil ruhedsmåler .....	7
Boks 2: Indstillinger for taktil ruhedsmåler .....	7
3.3.1 Indstilling af taktil ruhedsmåler .....	7
3.3.2 Kontrol af tastspids .....	8
3.3.3 Kalibreringsfaktor .....	8
3.3.4 Vurdering af prøvningens resultat .....	9
3.4 Måling med taktil ruhedsmåler .....	9
3.5 Relevante ISO GPS-standarder .....	10
<b>4 Usikkerhedsbudget for en taktil ruhedsmåling</b> ....	<b>10</b>
4.1 Måleemne .....	10
4.2 Ruhedsnormal (reference) .....	11
4.3 Ruhedsmåler (måleudstyr) .....	11
4.4 Målemiljø .....	12
Boks 3: Drift (misvisning) .....	12
4.5 Operatør .....	12
4.6 Målemetode .....	13
4.7 Usikkerhedsbudgettet .....	13
<b>5 Akkrediteret kalibrering af taktil ruhedsmåler og ruhedsnormal</b> .....	<b>15</b>
5.1 Kalibrering af ruhedsnormal .....	15
5.2 Kalibrering af håndholdt ruhedsmåler .....	16
Boks 4: Fritastinstrument .....	16
5.2.1 Justering af en ruhedsmåler .....	17
5.3 Sporbarhedskæde for ruhedsmåling .....	18
<b>6 Opsummering</b> .....	<b>20</b>
<b>7 Ordliste</b> .....	<b>21</b>
<b>8 Læringsudbytte</b> .....	<b>23</b>
<b>9 Litteraturliste</b> .....	<b>24</b>
<b>10 Appendiks</b> .....	<b>25</b>

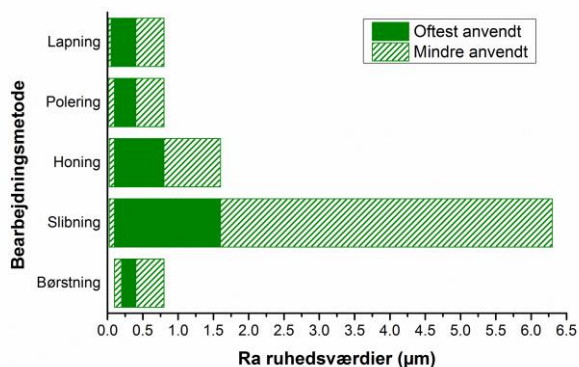
# 1 Indledning

Ruhedsmåling er en geometrisk måling. Den er således knyttet til SI-enheden meter, da man ved en ruhedsmåling måler dimensioner. Ruhedsmåling foregår dog på en skala, der er meget mindre end en meter; nemlig skalaen mikrometer som er 0,000001 m.

Kendskab til ruheden af et emnes overflade er essentiel, da mange af emnets funktioner afhænger af ruheden. Funktionelle egenskaber såsom smøring, adhæsion, friktion, korrosion eller slid kan alle spores direkte tilbage til overfladens ruhed.

Ruhed kan måles med mange forskellige teknikker. Den kan vurderes kvalitativt ved berøring eller visuel inspektion. Eller den kan bestemmes mere kvantitativt ved at benytte optisk eller taktilt måleudstyr.

Dette kompendie vil fokusere på måling af ruhed med den *taktile metode*. Det vil sige at målingen foretages ved kontakt mellem en meget tynd spids og prøvens overflade. Den tynde spids føres hen over prøveoverfladen og derved følger spidsen overfladens kontur. Taktil måling af ruhed er den mest udbredte målemetode i industrien i dag.

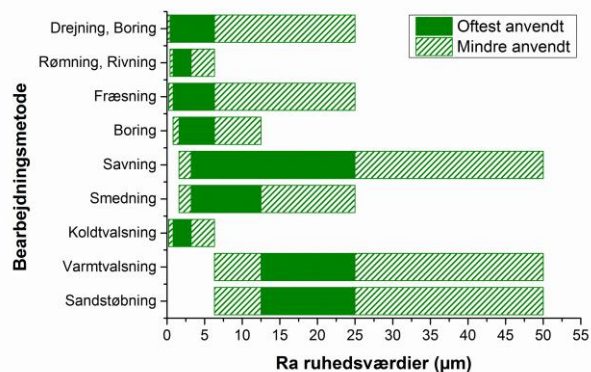


Kompendiet ligger i forlængelse af kompendiet "G2 – Ruhed" [1], hvis indhold forudsættes kendt. Ydermere anvendes begreber fra kompendierne "A1 - Introduktion til målinger" [2] og "A3 – Introduktion til usikkerhedsbudgetter" [3].

Kompendiet er opbygget som følger: I afsnit 2 diskuteres hvorledes forskellige bearbejdnings teknikker resulterer i overflader med forskellige ruheder. Derefter følger i afsnit 3 en introduktion til taktile ruhedsmålinger. Der gives en beskrivelse af måleprincippet, hvordan ruhedsmåleren kontrolleres i form af en prøvning mod kendt ruhedsnormale. I afsnit 4 gennemgås et eksempel på et usikkerhedsbudget for en taktil ruhedsmåling. Endeligt i afsnit 5 gives en gennemgang af akkrediterede kalibreringer af ruhedsnormale og taktile håndholdte ruhedsmålere. Derudover gennemgås et eksempel på en sporbarhedskæde for ruhed. Undervejs henvises der til ISO GPS standarder hvor relevant.

## 2 Måling af ruhed

Overfladers udseende og egenskaber bestemmes af de processer overfladen har gennemgået under fremstillingen. For at opnå en ønsket funktion eller udseende på en overflade er det således vigtigt at vælge den rette bearbejdningsmetode. På Figur 1 ses en oversigt over hvilke ruheder det kan forventes at



Figur 1: Typer af bearbejdningsmetoder og den typiske ruhed som opnås med denne bearbejdningsmetode [8]. Ruheden er angivet med ruhedsparmeteren Ra som er en global gennemsnitlig angivelse.

opnå med en given overfladebehandling. Den endelige ruhed på overfladen varierer meget afhængig af hvilken bearbejdningsmetode som benyttes. F.eks. kan polering give  $Ra$  ruheder mellem 0,012 til 0,8  $\mu\text{m}$ . Mens rømning kan give  $Ra$  ruheder mellem 0,4 til 6,3  $\mu\text{m}$ . Parameteren  $Ra$  angiver den globale gennemsnitlige ruhed, den er omtalt i "G2 – Ruhed" [1].

Det fremgår også af Figur 1, at samme bearbejdningsmetode kan resultere i meget forskellige ruheder. F.eks. kan man se, at man ved varmtvalsning af en plade kan opnå  $Ra$  ruheder som strækker sig fra 6 – 50  $\mu\text{m}$ . Således garanterer disse bearbejdningsmetoder ikke et bestemt slutresultat. Det er snarere guidelines. Så for at kontrollere, at den rette overfladefinish er opnået ved bearbejdningen, skal dette verificeres ved måling. En af metoderne til dette kan være at måle overfladens ruhed.

GPS systemet giver konstruktøren/designeren mulighed for at kunne angive krav til emnets ruhed på den tekniske tegning. Ruhedsmåling benyttes så til at verificere, at den krævede ruhed er opnået. I næste afsnit beskrives måling af ruhed med en taktil håndholdt ruhedsmåler.



Figur 2: Eksempel på en håndholdt taktil ruhedsmåler (tastnitinstrument).

### 3 Taktil ruhedsmåler

Det mest udbredte metode at måle ruhed på i industrien er ved hjælp af kontaktmåling med en taktil ru-

hedsmåler. Betegnelsen taktil betyder at målingen foretages ved at måleudstyrets føleenhed er i kontakt med overfladen. Princippet bag en håndholdt taktil ruhedsmålers virkemåde beskrives i næste afsnit.

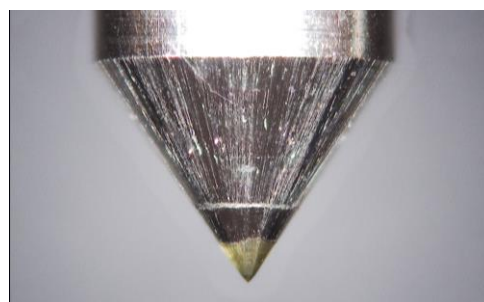
#### 3.1 Måleprincip for taktil ruhedsmåler

En taktil ruhedsmåler er et måleinstrument som undersøger en overflade med en *tastspids* som er i kontakt med overfladen. Den korrekte betegnelse for en ruhedsmåler er da også et *tastnitinstrument* ifølge ISO 3274. På Figur 2 ses en typisk håndholdt taktil ruhedsmåler.

Måleprincippet bag en ruhedsmåler er det samme som princippet bag en gramofon. Grammofonens spidse pickup bevæger sig hen over rillerne på en LP-plade, hvorved musikinformationen aflæses. Ruhedsmåleren har på samme måde en spids tast som føres over overfladen. Ved at aflæse tastens bevægelse hen over overfladen fås et tværsnit af overfladens topografi. Dette tværsnit kaldes den *aftastede profil*.

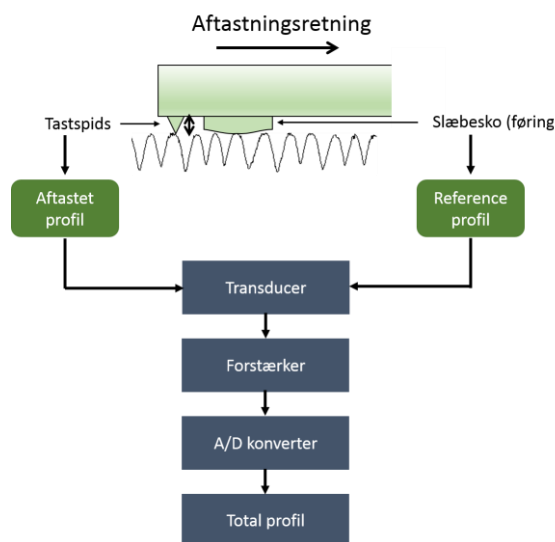
Når en ruhedsmåler sættes til at måle en overflades ruhed kaldes det at ruhedsmåleren *aftaster* overfladen.

Tasten er ruhedsmålerens vigtigste element. Tastens tastspids har form som en kegle med en sfærisk top, se Figur 3. Taster kan købes med en spids radius på enten 2, 5 eller 10  $\mu\text{m}$ , og med en keglevinkel på 60° eller



Figur 3: Tastspidsen har en kegleform med en sfære i toppen.

90°. Taster med en spids-radius på 2  $\mu\text{m}$  og en keglevinkel på 90° er de mest benyttede, på nær i USA hvor en radius på 5  $\mu\text{m}$  i nogle sammenhænge benyttes [4]. Tasten er lavet af diamant således så den er hård og ikke ødelægges når den kommer i kontakt med prøvens overflade.



Figur 4: Skematisk illustration af en håndholdt taktile ruhedsmålers virkemåde. Figuren omtaler kun instrumenter som benytter sig af slæbesko til at generere referenceføring. Jf. ISO 3274 [4].

På Figur 4 ses en skematisk illustration af en taktile ruhedsmåler. Øverst ses tasten. Den består af en tastspids og slæbesko.

Tastspids og slæbesko bevæger sig sammen langs den horisontale aftastningsretning (langs overfladen). Men de bevæger sig uafhængigt af hinanden vertikalt (i højden). Tastspidsen følger overfladens topografi mens slæbeskoen glider på toppen.

Tastspidsens bevægelse hen over overfladen omdannes til en aftastet profil. Tastspidsen bevæges i et spor i snitplanet langs en referenceføring. Referenceføringen sikrer at tastspidsen føres i et korrekt spor. Sporet kaldes for en *referenceprofil*. Denne referenceprofil er typisk en ret linje.

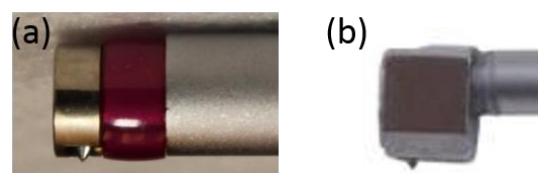
En måde at sikre referenceføringen er ved brug af en *slæbesko*. Slæbeskoen har en radius som er meget

større end både tastspidsen og afstanden mellem prøveoverfladens toppe. Slæbeskoen glider således hen over toppen af overfladen. Derved fungerer slæbeskoen som en retlinjet datum, hvor selve prøvens form fungerer som reference.

Slæbeskoen kan være bygget ind i det hus som dækker tastspidsen og kan sidde foran, bagved eller ved siden af tastspidsen. Slæbeskoen er oftest lavet af metal eller safir. Den kan have form som på Figur 5, eller som en donut-form hvor tastspidsen stikker ud i midten af donuten.

Efter aftastningen af overfladen sendes den aftastede profil og referenceprofilen ind i en transducer. Det fremgår af Figur 4. Transduceren sammenholder hvert punkt på den aftastede profil med det tilsvarende punkt på referenceprofilen. På denne måde fungerer emneoverfladen som reference. Resultatet konverteres til et signal, som ruhedsmåleren kan arbejde videre med.

Signalet forstærkes derefter i en forstærker, hvorefter det konverteres fra analogt til digitalt signal. Derpå fås *den totale profil*. Den totale profil undergår efterfølgende filtrering hvilket omtales i næste afsnit.



Figur 5: Eksempler på design af tast. (a) Slæbeskoen er placeret bagved tastspidsen. (b) Slæbeskoen er indbygget i huset.

### 3.1.1 Filtrering af total profilen

Detaljerne omkring filtrering af den totale profil er beskrevet i kompendiet "G2 – Ruhed" [1]. Ved filtrering opdeles profilen i form, bølgethed og ruhed.

Ruhedsmåleren filtrerer den totale profil med det kortbølgede  $\lambda_s$  filter, som fjerner de korte bølger i den

totale profil.  $\lambda_s$  filtrering foretages automatisk af nogle ruhedsmålere, mens andre ruhedsmålere kræver at man selv skal sætte  $\lambda_s$  filteringen til. Det er derfor vigtigt at kontrollere at  $\lambda_s$  filteringen er slået til under indstillinger. Ydermere skal man sikre sig, at

*Tabel 1: Bestemmelse af størrelsen af cut-off filtret  $\lambda_c$  ud fra overfladens  $Ra$ -værdi for ikke-periodiske topografier.  $l_r$  er referencelængden.  $\lambda_c$  er lig med  $l_r$ .  $l_n$  er evalueringlængden, og angiver længden af hele den profil som evalueres. Fra DS/ISO 4288 [6].*

$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda_c / l_r$ (mm)	$l_n$ (mm)
$0,006 < Ra \leq 0,02$	0,08	0,40
$0,02 < Ra \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < Ra \leq 2$	0,80	4,00
$2 < Ra \leq 10$	2,50	12,50
$10 < Ra \leq 80$	8,00	40,00

den rette størrelse filter benyttes. Valget af den rette størrelse af  $\lambda_s$  er beskrevet i DS/ISO 3274, og afhænger af tastspidsens radius. Oftest vil man skulle anvende  $\lambda_s = 2,5 \mu\text{m}$ , idet tastspidsens radius typisk er  $2 \mu\text{m}$  [1].

Efter  $\lambda_s$  filtreringen kaldes profilen for *primærprofilen*. Primærprofilen filtreres med det langbølgede cut-off filter  $\lambda_c$ .  $\lambda_c$  opdeler primærprofilen i en bølgethedsprofil og ruhedsprofil. Det rette valg af størrelsen af  $\lambda_c$  er beskrevet i DS/ISO 4288. Den størrelse af  $\lambda_c$ , som man skal benytte, afhænger af hvor ru overfladen er, og om ruheden er periodisk (gentager sig selv) eller ikke-periodisk. Hvis overfladen har en  $Ra$ -værdi på mellem  $0,1 - 2 \mu\text{m}$  benyttes  $\lambda_c = 0,80 \text{ mm}$ . Som det fremgår af Figur 1 vil bearbejdningsmetoderne lapning, polering, honing, slibning og børstning alle typisk resultere i  $Ra$ -værdier indenfor dette område. Men måler man  $Ra$ -værdier udenfor dette område skal man benytte en anden størrelse  $\lambda_c$ , se Tabel 1.

Ud fra ruhedsprofilen beregnes så de ønskede ruhedsparametre. De hyppigst anvendte ruhedsparametre er gennemgået i "G2 – Ruhed" [1].

Nogle ruhedsmålere viser både ruhedsprofil og ruhedsparametre på displayet, mens andre kun viser ruhedsparametrene. I indstillinger kan man vælge hvilke ruhedsparametre, ruhedsmåleren skal beregne.

I næste afsnit vil styrker og begrænsninger ved de håndholdte ruhedsmålere blive diskuteret.

### 3.1.2 Muligheder og begrænsninger

Styrken ved de håndholdte ruhedsmålere er

- Brugervenlighed
- Robusthed, så de kan benyttes direkte i produktion eller på værksted
- Flexibilitet, idet de kan benyttes på mange forskellige emner. F.eks. kan de benyttes direkte i store tanke eller i installerede rør. Ydermere kan de både måle på horisontale og vertikale overflader, så længe de er flade.

Håndholdte taktile ruhedsmålere med slæbesko kan kun måle på flade overflader. Overflader som er runde, eller har en anden form, vil ikke kunne måles på grund af slæbeskoen, som ikke kan glide jævnt hen over overfladen. Instrumenter som benytter sig af slæbesko kan derfor ikke benyttes til at måle form eller bølgethed. De kan udelukkende benyttes til at måle ruhedsprofiler og ruhedsparametre.



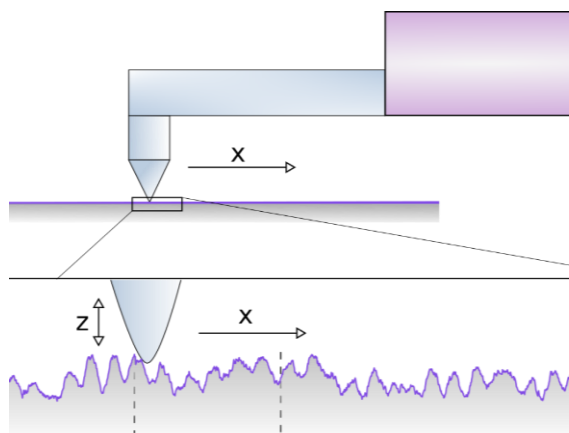
Da tastspidsen har en endelig kegleform, kan radius og vinklen af denne kegleform påvirke den profil, som måles. Hvis overfladen har dybe og smalle grøfter, kan det være, at tastspidsen ikke kan komme helt ned på bunden af grøfterne. Derved vil grøfterne fremstå mindre dybe end de faktisk er. Se Figur 6. Jo større radius af spidsen og jo større vinkel, jo sværere er det for tastspidsen at komme ned i grøfterne. Dog vil en tastspids med en lille radius være mere skrøbelig og derfor lettere blive beskadiget under måling.

En anden ulempe ved taktile ruhedsmålinger er, at det er en kontakt måling. Det kan betyde at måleemnet kan blive ridset og beskadiget ved målingen. Dette er dog hovedsageligt et problem for bløde måleemner såsom blødt plast eller blødt aluminium.

Næste afsnit vil omhandle de ruhedsnormaler som benyttes til at kontrollere om ruhedsmåleren måler korrekt.

### 3.2 Ruhedsnormaler

For at sikre at ruhedsmåleren måler pålideligt skal den jævnligt prøves eller kalibreres op imod én eller flere *ruhedsnormaler*. En ruhedsnormal er kendetegnet ved, at dens overflade har en bestemt ruhedsværdi. Den kan f.eks. være specificeret til at have  $Ra = 1,0 \mu\text{m}$  og  $Rz = 3,0 \mu\text{m}$ .



Figur 6: Illustration af at tastspidsens form påvirker den målte profil, idet tastspidsen ikke nødvendigvis kan komme ned i alle smalle grøfter.

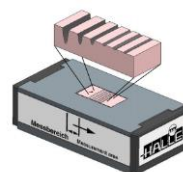
#### Boks 1: Typer af ruhedsnormaler

Nedenfor er listet de mest anvendte ruhedsnormaler. For yderligere uddykning og definition af normalerne henvises til DS/ISO 5436-1 [10].

##### Type A

Overfladen har én eller flere brede separate riller med stigende dybder, se nedenfor. Hver rille er så bred at tastspidsens form ikke påvirker den målte profil af rillen. Bunden af rillen kan enten være plan (type A1) eller rund (type A2).

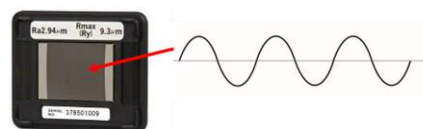
Type A normaler benyttes til at kalibrere fritastinstrumenter (profilometre) som ikke har en slæbesko. Mere om profilometre i boks 4.



##### Type C

Overfladen består af riller med en gentagende form. F.eks. sinusbølger eller trekantede. De mest anvendte type C normaler har riller med sinusbølgeprofil som nedenfor. De kaldes type C1.

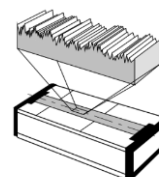
Type C normaler anvendes primært til at kontrollere ruhedsmålerens angivelse af ruhedsparemetre. Altså hvor nøjagtigt ruhedsparemetre som  $Ra$ ,  $Rz$  eller  $RSm$  angives.



##### Type D

Overfladen er uregelmæssig vinkelret på aftastningsretningen. Den minder om en slebet overflade, se nedenfor. Idet type D bedre efterligner et virkeligt måleemne giver kontroller med type D normaler et mere retvisende billede af hvordan ruhedsmåleren aftaster en reel overflade.

Type D normaler er dyrere end type C normaler, så derfor vælger mange virksomheder at købe type C normaler frem for type D.



Der findes forskellige typer af ruhedsnormaler, som er opdelt efter hvordan deres overflade ser ud, og hvad de kontrollerer. De hyppigst anvendte typer er angivet i boks 1.

Ruhedsnormaler fremstilles for det meste i hærdet rustfrit stål eller glas. Ruhedsnormaler af glas er de mest stabile og holdbare men også de dyreste.

Som det fremgår af billederne i boks 1, så er det kun et bestemt område af ruhedsnormalen, som har den ønskede ruhedsværdi. Disse måleområder er normalt markeret med en boks eller placeret mellem to sandblæste områder.

I næste afsnit vil vi se nærmere på hvordan ruhedsnormaler anvendes til prøvning af ruhedsmåleren.

### 3.3 Prøvning af taktil ruhedsmåler

Det er vigtigt løbende at kontrollere, at ruhedsmåleren måler pålideligt og korrekt. Dette gøres ved brug af de før omtalte ruhedsnormaler.

En prøvning kan udføres med én eller flere ruhedsnormaler. Benyttes én ruhedsnormal betyder det, at ruhedsmåleren kun er kontrolleret lige omkring den pågældende ruhedsværdi. Anvendes f.eks. en ruhedsnormal med  $Ra = 1,2 \mu\text{m}$ , så kan man kun være sikker på at ruhedsmåleren måler pålideligt umiddelbart tæt på denne  $Ra$ -værdi.

Ruhedsmålere er almindeligvis stabile instrumenter, som ikke ændrer sig så meget over tid. Dog kan anvendelse og forkert håndtering give anledning til, at ruhedsmåleren måler anderledes. Især kan tasten blive beskadiget ved forkert håndtering. Derfor er det vigtigt, at prøvning udføres regelmæssigt, f.eks. én gang om måneden. Men dette afhænger helt af, hvor meget ruhedsmåleren benyttes, og hvor mange forskellige operatører som benytter ruhedsmåleren.

Ved en prøvning følges den samme måleprocedure hver gang. Prøvning af en ruhedsmåler indebærer blandt andet:

- Måleindstillinger kontrolleres
- Kontrol af tastspids
- Aftastning af en ruhedsnormal
- Udregning af en kalibreringsfaktor
- Vurdering af måleresultatet for at bestemme om ruhedsmåleren kan benyttes som hidtil

De enkelte trin gennemgås i de følgende afsnit.

#### 3.3.1 Indstilling af taktil ruhedsmåler

Inden en prøvning af ruhedsmåleren er det vigtigt at kontrollere, at ruhedsmålerens indstillinger er sat korrekt. De væsentligste indstillinger som bør kontrolleres ses i boks 2.

#### Boks 2: Indstillinger for taktil ruhedsmåler

Indstillinger som skal kontrolleres inden en aftastning eller prøvning:

##### $\lambda_s/L_s$ filter

$\lambda_s$  kortbølgefilteret kaldes oftest  $L_s$  i indstillingerne. Tjek at filteret er slået til, og at det er sat til den rette værdi som er defineret i DS/ISO 2374.

I de fleste tilfælde skal man benytte  $L_s = 2,5 \mu\text{m}$ .

##### $\lambda_c/L_c$ cut-off filter

Cut-off filteret  $\lambda_c$  kaldes oftest  $L_c$  i indstillingerne. Tjek at filteret er slået til, og at det er sat til den rette værdi, som er defineret i DS/ISO 4288 (se også Tabel 1).

I de fleste tilfælde skal man benytte  $L_c = 0,80 \text{ mm}$ .

Ved nogle ruhedsmålere indstiller man størrelsen af filtrene ved at angive forholdet mellem  $L_c$  og  $L_s$ .

$$\text{F.eks. } L_c/L_s = \frac{0,80 \text{ mm}}{2,5 \mu\text{m}} = \frac{0,08 \text{ mm}}{0,0025 \text{ mm}} = 300$$

##### Evalueringsslængde, $l_n$

Evalueringsslængden angiver længden af den profil, som ruhedsparemetrene skal beregnes ud fra. Evalueringsslængden bestemmes ud fra valget af  $L_c$ . Det fremgår i DS/ISO 4288 (se også Tabel 1).

I de fleste tilfælde er  $L_c = 0,80 \text{ mm}$ , og ifølge Tabel 1 skal derfor benyttes  $l_n = 4,0 \text{ mm}$ . Ved de fleste ruhedsmålere angives  $l_n$  dog som antallet af  $L_c$  ( $l_r$ ). Dvs.  $N = 5$ .

##### Forstærkningstrin

I indstillingerne vil forstærkningstrinnet oftest hedde "Measuring range" eller blot "Range". Tjek at det rette forstærkningstrin er sat til. Det rette forstærkningstrin er det, som ruhedsmåleren er blevet eksternt kalibreret i, hvilket fremgår af kalibreringscertifikatet.

Mange benytter forstærkningstrin "Auto". Bemærk: ikke alle ruhedsmålere giver operatøren mulighed for at vælge forstærkningstrin.

##### Målehastighed

Det anbefales, at aftaste overflader med en hastighed på  $0,5 \text{ mm/s}$ . Dette kan kun indstilles ved nogle ruhedsmålere.

### Forstærkningstrin

En af de omtalte indstillinger for en ruhedsmåler er dens *forstærkningstrin*. Forstærkningstrinnet bestemmer, hvor meget tastspidsen maksimalt kan bevæge sig op og ned, når den skal følge overfladens topografi. Dette kaldes for *dynamikområdet*. Derudover bestemmer forstærkningstrinnet opløsningen af profilen.

I ruhedsmålerens manual vil man kunne læse hvilken opløsning og dynamikområde et givent forstærkningstrin giver. I manualen vil forstærkningstrinnet oftest stå beskrevet under "range".

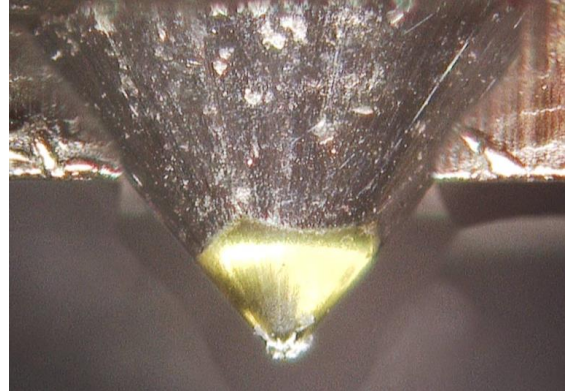
**Eksempel:** Hvis man skal aftaste en meget glat overflade, vil man typisk vælge et lille forstærkningstrin. Et lille forstærkningstrin resulterer i en høj opløsning. Men samtidig vil dynamikområdet være lille, så tastens bevægelse vertikalt er begrænset. Hvis den benyttede ruhedsmåler f.eks. er en Mitutoyo SJ-210, er det mindste forstærkningstrin, som kan vælges, på 25  $\mu\text{m}$ . Ifølge manualen giver dette forstærkningstrin en opløsning vertikalt (højden) på 0,002  $\mu\text{m}$ . Dog vil tasten kun kunne bevæge sig op og ned indenfor 25  $\mu\text{m}$ .

Skulle man i stedet måle på en overflade, som er væsentligt mere ru end i ovenstående eksempel, kan man risikere at tasten ikke ville kunne bevæge sig tilstrækkeligt op og ned til at kunne følge overfladens topografi. Derfor vælger mange at indstille ruhedsmåleren til forstærkningstrin "auto", hvor udstyret selv vælger det rette forstærkningstrin i forhold til overfladens topografi. Dette medfører dog, at man ikke ved, hvilket forstærkningstrin ruhedsmåleren har benyttet, og derfor ikke kender opløsningen.

### 3.3.2 Kontrol af tastspids

Forud for en prøvning er det en god vane at undersøge tastspidsen i et optisk mikroskop. Derved vil man opdage, hvis spidsens form er beskadiget, eller om spidsen er beskidt. En beskidt tastspids kan resultere i fejlagtige målinger, eller skidtet kan afsættes på måleemnet. Hvis tastspidsen er beskidt, kan den renses med trykluft. Dog er det vigtigt, at man ikke benytter

for højt tryk, da man så kan risikere at blæse tastspidsen ind i huset. På Figur 7 ses et eksempel på en tastspids med skidt på spidsen.



Figur 7: Eksempel på en beskidt tastspids. Skidtet sidder lige på spidsen og kan derfor påvirke ruhedsmålingen. Sammenlign evt. med tastspidsen på Figur 3.

### 3.3.3 Kalibreringsfaktor

I industrien benyttes type C ruhedsnormaler til prøvning af ruhedsmålere. Type C ruhedsnormalen er god til at kontrollere om ruhedsmåleren aftaster og beregner ruhedsparemetre, såsom  $R_a$ ,  $R_z$  og  $R_{Sm}$ , korrekt.

En type C ruhedsnormal skal minimum aftastes 12 gange jævnt fordelt på normalen ifølge DS/ISO 5436-1. Derudover skal man undgå fejl og ridser i overfladen.

Hvis man kun er interesseret i, at ruhedsmåleren beregner  $R_a$ -værdien korrekt, kan man sætte den til at beregne  $R_a$ -værdien for alle 12 profiler. Derefter tages gennemsnittet. Den målte gennemsnitlige  $R_a$ -værdi sammenlignes så med den  $R_a$ -værdi som er angivet i kalibreringscertifikatet for ruhedsnormalen. Dette gøres ved at udregne en kalibreringsfaktor (mere herom i "A1 – Introduktion til målinger" [2]):

Ligning 1:

$$\text{Kalibreringsfaktor} = \frac{R_a \text{ fra kalibreringscertifikat}}{\text{Målt } R_a}$$

Resultatet af prøvningen af ruhedsmåleren er denne kalibreringsfaktor. Den fundne kalibreringsfaktor skal dernæst benyttes til at korrigere fremtidige målinger, derved sikres pålidelige målinger:

*Ligning 2:*

$$\text{Korrigeret } Ra = \text{Kalibreringsfaktor} \cdot \text{Målt } Ra$$

Herved sikres, at fremtidige målinger er pålidelige, idet de kan korrigeres med kalibreringsfaktoren.

Det er her vigtigt at understrege, at man *ikke* skal justere ruhedsmåleren ind i forhold til prøvningens resultat. Lige så snart ruhedsmåleren justeres, vil den måle anderledes, og man vil miste historikken på udstyret. Derudover vil man ikke længere kunne bruge de måleværdier, som er angivet i kalibreringscertifikatet. Læs mere om justering i afsnit 5.2.1.

### 3.3.4 Vurdering af prøvningens resultat

Det er en god ide at sætte nogle acceptgrænser for, hvor stor en afvigelse der kan tolereres mellem ruhedsværdien for ruhedsnormalen og visningen på ruhedsmåleren. Derved er det let for operatøren at fastlægge, om ruhedsmåleren leverer målinger af tilstrækkelig kvalitet. Disse grænser kan for eksempel sættes ud fra kundens krav til ruhedsmålingens nøjagtighed og præcision.

I de tilfælde, hvor prøvningen viser, at ruhedsmåleren ikke overholder de fastlagte krav og grænser, skal ruhedsmåleren kalibreres. Kalibreringen kan som regel fastlægges om det er tasten, de elektriske komponenter, eller noget andet, som har ændret sig. Mere om kalibrering i afsnit 5.2.

Viser prøvningen derimod, at ruhedsmåleren overholder de fastlagte grænser, kan den benyttes til måling af ukendte overflader.

## 3.4 Måling med taktil ruhedsmåler

I DS/ISO 4288 findes der regler for, hvordan overflader skal aftastes. Blandt andet skal det sikres, at overfladen aftastes, således så de største højdeværdier for ruhedsparemetre  $Ra$  og  $Rz$  fås. Dette opnås ved at benytte en måleretning, som er vinkelret på mønstret på overfladen. For en sleben overflade vil man f.eks. skulle måle på tværs af slibespolene.

Målingerne skal udføres på den del af emnets overflade, hvor de mest kritiske værdier kan forventes, eller områder som er kritiske for emnets anvendelse. Dette kan evalueres ved visuelt at undersøge overfladen inden måling.

Derudover skal aftastningerne foretages jævnt fordelt på overfladen, så man opnår et så repræsentativt billede af overfladen som muligt.

Antallet af aftastninger, som skal foretages på et emne, skal vurderes i forhold til den ønskede pålidelighed af målingen og i forhold til omkostningerne. Jo flere aftastninger der foretages, jo bedre kan man afgøre om overfladen opfylder kravene, og jo mindre er usikkerheden på ruhedsparemetrens middelværdi. Men at foretage mange aftastninger er også omkostningstungt.

I DS/ISO 4288 er således angivet en 16 %-regel, som er en acceptregel. Denne regel er omtalt i kompendiet "G2 – Ruhed" i boks 7. I praksis betyder reglen at hvis man foretager seks aftastninger af overfladen så må maksimalt én måling ligge udenfor den acceptgrænse man har fastlagt:

$$6 \text{ målinger} \cdot 16 \% = \frac{6 \text{ målinger}}{100} \cdot 16 \approx 1 \text{ måling}$$

Vælger man at foretage tre målinger, må ingen af de tre målinger ligge udenfor acceptgrænserne. Hvis én af målingerne ligger udenfor, må man foretage yderligere målinger for at sikre at 16 %-reglen er overholdt.

16 %-reglen må kun benyttes, hvis andet ikke er angivet i kundens specifikationer.

I afsnit 4 vil vi opstille et eksempel på et usikkerhedsbudget for måling af en ståloverflade med en taktil ruhedsmåler. Men først vil de relevante ISO GPS-standards blive introduceret.

### 3.5 Relevante ISO GPS-standards

I løbet af afsnit 3 er allerede omtalt en del ISO GPS-standards. De opsummeres i dette afsnit.

DS/ISO 3274: Beskriver opbygningen og de enkelte delkomponenter i en taktil ruhedsmåler. Derudover angives hvilket  $\lambda_s$  filter, som skal benyttes for en given tastspids radius.

DS/ISO 4288: Regler for måling med taktile ruhedsmålere og angivelser af hvilket cut-off filter,  $\lambda_c$ , som skal benyttes for en given overflade.

DS/ISO 5436-1: Beskriver de forskellige typer af ruhedsnormaler, og hvordan de skal aftastes.

## 4 Usikkerhedsbudget for en taktil ruhedsmåling

I dette afsnit vil vi gennemgå et eksempel på, hvordan man kan opstille et usikkerhedsbudget for en ruhedsmåling foretaget med en taktil ruhedsmåler.

En kunde har specificeret, at du skal slibe en rustfri stålplade med korn 320. Specifikationerne for ruheden af pladen siger, at slutresultatet for pladen skal have en  $R_a < 0,65 \mu\text{m}$ . Men er denne specifikation overholdt, eller skal du blive ved med at slibe overfladen?

Du benytter en taktil ruhedsmåler til at måle ruheden af stålpladen. For at sikre at stålpladens overflade har

fået den ønskede ruhed, måles pladen 12 forskellige steder jævnt fordelt på overfladen og i en retning vinkelret på slibesporene, således så DS/ISO 4288 er overholdt. Resultatet af de 12 målinger ses i Tabel 2. Gennemsnittet af de 12 målinger er  $0,625 \mu\text{m}$ , men for at kunne afgøre om specifikationen er overholdt, skal usikkerheden på målingen bestemmes.

I det følgende er måleteknikkens sekstakkede stjerne (fra A1 – Introduktion til målinger [2]) benyttet til at identificere de mulige kilder til måleusikkerhed. Disse kilder indgår i usikkerhedsbudgettet. Ud over at identificere kilderne har vi også estimeret, hvor meget de enkelte kilder bidrager til usikkerheden.

### 4.1 Måleemne

Måleemnet er en rustfri stålplade som er slebet med korn 320. Ruheden kan variere fra sted til sted, hvilket giver anledning til en spredning i de målte  $R_a$ -værdier. Spredningen er beregnet som standardafvigelsen. Dens størrelse er vist i Tabel 2, hvor den beregnede

*Tabel 2: 12 målinger foretaget jævnt fordelt på en rustfri stålplade som er slebet med korn 320.*

	Målt $R_a$
	0,620
	0,623
	0,584
	0,619
	0,641
	0,576
	0,680
	0,677
	0,638
	0,574
	0,622
	0,643
Middelværdi, $\bar{R}_a$	<b>0,625</b>
Standardafvigelse, $s(\bar{R}_a)$	<b>0,035</b>
Standardusikkerhed, $u(\bar{R}_a)$	<b>0,010</b>

standardusikkerhed også fremgår. Da måleusikkerheden er beregnet ud fra statistik, er det en type A usikkerhed. Selve beregningen af usikkerheden kan ses i appendikset.

## 4.2 Ruhedsnormal (reference)

Ruhedsmåleren har været til kalibrering hos et akkrediteret laboratorie. Kalibreringen foregår ved, at ruhedsmåleren måler på ruhedsnormaler med forskellig  $Ra$ -værdi (se afsnit 5.2). Det akkrediterede laboratorie har udstedt et kalibreringscertifikat, hvor det fremgår, hvilken gennemsnitlig  $Ra$ -værdi ruhedsmåleren har målt på de enkelte normaler.

Den ene ruhedsnormal har en nominel  $Ra$ -værdi på  $0,6 \mu\text{m}$ . Da denne  $Ra$ -værdi er tæt på kundens ønskede  $Ra$ , benyttes resultaterne fra måling på denne ruhedsnormal.

Det akkrediterede laboratorie har målt den pågældende ruhedsnormal til at have:

$Ra(\text{reference}) = 0,604 \mu\text{m}$  med en ekspanderet usikkerhed ( $k=2$ ) på 2,5 %. Dvs. den ekspanderede usikkerheden på referencemålingen er for  $k=2$ :

$$U(Ra(\text{reference})) = \frac{0,604 \mu\text{m}}{100} \cdot 2,5 = 0,015 \mu\text{m}$$

Den usikkerhed som skal indsættes i standardusikkerheden er for  $k=1$ , dvs.

$$\begin{aligned} u(Ra(\text{reference})) &= \frac{U(Ra(\text{reference}))}{2} \\ &= \frac{0,015 \mu\text{m}}{2} = 0,0075 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Når det akkrediterede laboratorie benytter ruhedsmåleren til at måle på samme ruhedsnormal måler den:

$Ra(\text{certifikat}) = 0,593 \mu\text{m}$  med en ekspanderet usikkerhed  $\pm 0,024 \mu\text{m}$ . Så usikkerheden på  $Ra(\text{certifikat})$  er  $\pm 0,024 \mu\text{m}/2 = \pm 0,012 \mu\text{m}$ .

Ved modtagelse af kalibreringscertifikatet kan du beregne en kalibreringsfaktor (omtalt i A1 – Introduktion til målinger [2]):

Ligning 3:

$$k = \frac{Ra(\text{reference})}{Ra(\text{certifikat})} = \frac{0,604}{0,593} = 1,02$$

Når kalibreringsfaktoren ganges på ruhedsmålingen, vil målingen korrigeres, så en mere korrekt og sporbar ruhedsværdi opnås.

Usikkerheden på kalibreringsfaktoren beregnes ved brug af regnereglerne for usikkerhed. Se kompendiet "A3 – Introduktion til usikkerhedsbudgetter" i boks 6 [3]:

Generelt:

Funktion  $y = \frac{a}{b}$

Usikkerhed  $u(y) = y \cdot \sqrt{\left(\frac{u(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{u(b)}{b}\right)^2}$

I dette tilfælde anvendes funktionen fra Ligning 3:

Funktion  $k = \frac{Ra(\text{reference})}{Ra(\text{certifikat})}$

Usikkerhed  $u(k) =$

$$\begin{aligned} k \cdot \sqrt{\left(\frac{u(Ra(\text{reference}))}{Ra(\text{reference})}\right)^2 + \left(\frac{u(Ra(\text{certifikat}))}{Ra(\text{certifikat})}\right)^2} \\ = 1,02 \cdot \sqrt{\left(\frac{0,0075}{0,604}\right)^2 + \left(\frac{0,012}{0,593}\right)^2} = 0,024 \end{aligned}$$

Bemærk at kalibreringsfaktoren og dens usikkerhed er enhedsløs.

## 4.3 Ruhedsmåler (måleudstyr)

I dette eksempel medtages måleusikkerhed fra ruhedsmålerens opløsning og drift.

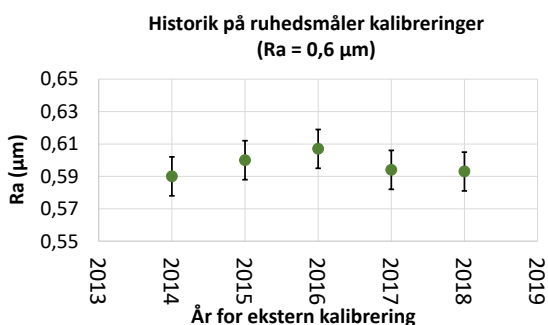
### Boks 3: Drift (misvisning)

Instrumenters drift er en løbende ændring over tid i den talværdi, som måleudstyret viser. Driften kan opstå på grund af ændringer i måleudstyrets egenskaber.

Ruhedsmålere kan drive med tiden. For at sikre at man har styr på, hvor meget ruhedsmåleren er drevet, skal den regelmæssigt sendes til kalibrering hos et kalibreringslaboratorie, eller man skal kalibrere den internt med en ruhedsnormal.

Nedenfor ses et eksempel på registrering af kalibreringer over tid. Hver gang ruhedsmåleren har været til ekstern kalibrering, er den målte  $R_a$  og standardusikkerheden ( $k=1$ ) indført på grafen. Det ses, at der ikke er en lineær tendens i driften. F.eks. at  $R_a$ -værdien stiger en smule ved hver kalibrering.

Dog er der en lille ændring fra år til år, men indenfor standardusikkerheden, og derfor måler ruhedsmåleren fortsat pålideligt. Den lille ændring i den målte  $R_a$ , gør at der kommer en ekstra kilde til måleusikkerhed. I dette tilfælde estimeres det, ud fra forskellene i  $R_a$  fra år til år, at det giver en usikkerhed på 1 %.



Ruhedsmålerens opløsning findes i manualen til at være på  $0,001 \mu\text{m}$ .

Ligesom i kompendiet "A3 – Introduktion til usikkerhedsbudgetter" [3] behandles usikkerheden fra opløsningen som en rektangulær fordeling (se afsnit 4.7):

Ligning 4:

$$u(\text{opløsning}) = \frac{0,001 \mu\text{m}}{2\sqrt{3}} = 0,0003 \mu\text{m}$$

Drift omtales i kompendiet "A1 – Introduktion til målinger" [2]. Den giver anledning til en misvisning på måleudstyret over tid. Driften for din ruhedsmåler er fundet ved at kigge på kalibreringshistorikken, se boks 3. Ud fra den kan man estimere hvor meget ruhedsmåleren driver med tiden. Driften er estimeret til at være 1 %.

## 4.4 Målemiljø

Generelt er ruhedsmålinger relativt upåvirket af den absolutte temperatur. Det har altså ikke den store betydning, om man måler i et rum med temperatur  $20^\circ\text{C}$  eller  $25^\circ\text{C}$ , da længdeskalaen som ruhed måles på er så lille. Men ændring i temperaturen under en måling kan have betydning. Derfor foretages målingerne i et klimastyret lokale.

De største miljøkilder til måleusikkerhed kommer fra vibrationer og elektrisk støj. Disse kilder skal derfor helst undgås. Men idet de ikke kan undgås fuldstændigt, kan man estimere størrelsen af vibrationer og elektrisk støj ved at måle på et planglas. Mere herom i afsnit 5.2. Resultatet af 12 målinger foretaget samme sted på planglasset er  $R_a = 0,009 \mu\text{m}$ . Denne  $R_a$  er et udtryk for *baggrundsstøjen*. Denne usikkerhed behandles også som rektangulært fordelt:

Ligning 5:

$$u(\text{baggrundsstøj}) = \frac{0,009 \mu\text{m}}{2\sqrt{3}} = 0,003 \mu\text{m}$$

Dele af baggrundsstøjen kommer fra selve ruhedsmåleren, men i dette tilfælde er dette bidrag tillagt miljøkilden.

## 4.5 Operatør

Måleusikkerheden stammende fra operatøren er undersøgt ved intern at lade de forskellige operatører måle på den samme ruhedsnormal med ruhedsmåleren. De forskellige målingers standard afvigelse,  $s(\overline{R_a})$ , er dernæst beregnet. Herfra er standardusikkerheden,  $u(\overline{R_a})$ , beregnet (ligesom i appendikset).



I dette tilfælde ønsker vi at beregne den relative usikkerhed. Den findes ved at tage forholdet mellem standardusikkerheden og den gennemsnitlige målte værdi

$$\frac{u(\overline{Ra})}{\overline{Ra}}$$

Ved denne undersøgelse finder man en relativ usikkerhed på 3 %. Denne kilde til usikkerhed kunne også betegnes som *reproducerbarhed* (se A1 – Introduktion til målinger [2]).

#### 4.6 Målemetode

Tastspidsens geometri (radius og keglevinkel) påvirker den profil, som ruhedsmåleren måler (omtalt i afsnit 3.1.2). Dette giver anledning til en måleusikkerhed. Men idet profilen filtreres med et  $\lambda$ s filter, som

fjerner de bølger, som er mindre end 2,5  $\mu$ m, så antager vi, at bidraget er så lille, at det kan negligeres. Dette kan dog kun antages, hvis tastspidsen fungerer korrekt og ikke er beskadiget eller beskidt.

Kilderne til usikkerhed, som er beskrevet ovenfor, indføres i usikkerhedsbudgetter ved at opstille en modelfunktion for målingen. Dette gøres i næste afsnit.

#### 4.7 Usikkerhedsbudgettet

På Figur 8 ses usikkerhedsbudgettet for ruhedsmålingen. Til opstilling af usikkerhedsbudgettet og beregningerne er brugt regnearket "A4 - Usikkerhedsbudget regneark" [5].

<b>metrologi.dk - Usikkerhedsbudget</b>					
Felter med blå skrift udfyldes af brugeren					
<b>Måling af Ra med taktil ruhedsmåler</b>					
<i>i</i>	Målestørrelse (enhed)	Fordeling	$x_i$	$u(x_i)$	$u_i(y)$
1	Måleemne - Gennemsnitlig Ra ( $\mu$ m)	Normal	0.625	0.01	0.0102
2	Reference - Kalibreringsfaktor k (relativ)	Normal	1.02	0.0237	0.0148125
3	Måleudstyr - Instrument opløsning ( $\mu$ m)	Rectangular	0	0.0002887	0.000288675
4	Miljø - Baggrundsstøj ( $\mu$ m)	Rectangular	0	0.0025981	0.002598076
5	Måleudstyr - Drift (relativ)	Normal	0	0.01	0.00625
6	Operatør (relativ)	Normal	0	0.03	0.01875
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
<b>y</b>	<b>Ra_korrigeret (<math>\mu</math>m)</b>	Normal	<b>0.6375</b>	<b>0.0268497</b>	

DFM-GUM ver. 2.2a	Conf. level = 95.45%	k = 2.0000
	Result = 0.638	U = 0.054

Model: $Y = (X_2 + X_5 + X_6) * X_1 + X_3 + X_4$
--

Figur 8: Eksempel på et usikkerhedsbudget for en ruhedsmåling udført med en taktil håndholdt ruhedsmåler på en slebet stålplade. Følgende regneark er benyttet: "A4 - Usikkerhedsbudget regneark".  $X_1$ ,  $X_2$  osv. i modellen henviser til række-numrene i første søjle.

Modelfunktionen er følgende:

$$Ra(\text{korrigeret}) = ((k + \text{drift} + \text{operatør}) \cdot \overline{Ra}) + \text{opløsning} + \text{baggrundsstøj}$$

Modelfunktionen er indsat i regnearket, og ses nedst på Figur 8.  $Ra(\text{korrigeret})$  er  $Ra$ -værdien efter den er korrigeret med kalibreringsfaktoren.

De enkelte variable i modelfunktionen gennemgås nedenfor.

**k:**

Kalibreringsfaktoren ganges på den målte  $Ra$ , og er således et relativt bidrag. Dvs. den relative usikkerhed skal findes. Dette gøres ved at beregne, hvor stor en del  $u(k)$  udgør af  $k$ :

$$u(k \text{ relativ}) = \frac{u(k)}{k} = \frac{0,024}{1,02} = 0,0237$$

Dette svarer til en relativ usikkerhed på 2,4 %.

I usikkerhedsbudgettet er indsat  $k = 1,02$  og  $u(k) = 0,047$  (relativ og derfor enhedsløs). Usikkerheden på  $k$  kan behandles statistisk, og er således en type A usikkerhed. Vi antager at  $k$  er normalfordelt, se 3. søjle på Figur 8. En normalfordeling ses på Figur 9 (a).

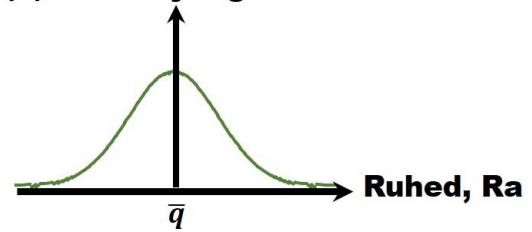
Du kan læse mere om fordelinger i kompendiet "A5 – Måleusikkerhed og overholdelse af tolerance" [6].

**Drift:**

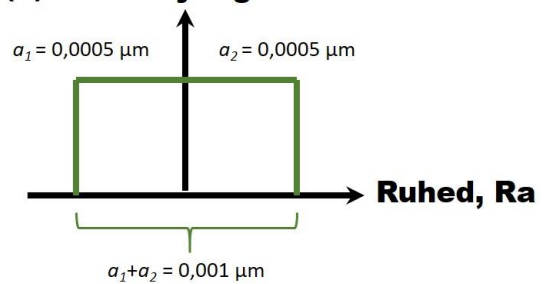
Driften ses som et relativt bidrag og ganges derfor på den gennemsnitlige  $\overline{Ra}$ .

I usikkerhedsbudgettet er indsat  $\text{drift} = 0$  og  $u(\text{drift}) = 0,01$ . Når driften sættes til 0, antager vi at driften ikke påvirker den  $Ra$  som måles, idet der er taget højde for driften ved korrektionen med kalibreringsfaktoren. Driften vil dog stadig give anledning til en usikkerhed på målingen.

**(a) Sandsynlighed**



**(b) Sandsynlighed**



Figur 9: Sandsynlighedsfordelinger for at måle en given talværdi. (a) Normalfordeling, (b) rektangulær fordeling.

**Operatør:**

Operatøren bidrager med en relativ usikkerhed på 3 %, og derfor ganges dette bidrag på den gennemsnitlige  $\overline{Ra}$ .

I usikkerhedsbudgettet er indsat  $\text{operatør} = 0$  og  $u(\text{operatør}) = 0,03$ . Ved den interne undersøgelse af operatør målingerne fandt man at måleværdierne lå både over og under den nominelle  $Ra$  for ruhedsnormalen. Derfor påvirker operatøren ikke den målte  $\overline{Ra}$  i nogen bestemt retning, og sættes  $\text{operatør} = 0$ . Derimod giver operatørbidraget anledning til en usikkerhed på målingen.

**$\overline{Ra}$  :**

Den målte gennemsnitlige  $\overline{Ra}$  indsættes som normalfordelt, idet det er en type A usikkerhed. Talværdi og usikkerhed ses i Tabel 2.

**Opløsning:**

Opløsningens talværdi sættes til 0 da den ikke påvirker den  $Ra$  som ruhedsmåleren måler, men udelukkende bidrager til usikkerheden på ruhedsmålingen.

Dette er en type B usikkerhed, idet vi ikke kan behandle den med statistiske metoder. Som omtalt behandles denne usikkerhed som rektangulært fordelt (Figur 9 (b)), og usikkerheden blev fundet i Ligning 4.

Dog beregner regnearket på Figur 8 automatisk usikkerheden ud fra den fordeling man har valgt. Så man behøver kun sætte grænserne for den rektangulære fordeling ind, og angive at det er en rektangulær fordeling. Grænsen er  $\pm 0,0005 \mu\text{m}$ , idet hele intervallet er  $0,001 \mu\text{m}$ , se Figur 9 (b).

#### **Baggrundsstøj:**

Som beskrevet anses baggrundsstøjen også for at være rektangulær fordelt, derfor indsættes grænserne  $\pm 0,0045 \mu\text{m}$ , og samme usikkerhed som beregnet i Ligning 5 fås.

#### **Måleresultatet**

Måleresultatet for den målte  $Ra$  for stålpladen er:

$$Ra = 0,64 \pm 0,05 \mu\text{m}$$

$Ra$  kan således have en værdi fra mellem  $0,59$  til  $0,69 \mu\text{m}$ . Ud fra disse målinger er det derfor svært præcist at afgøre om  $Ra < 0,65 \mu\text{m}$ , på grund af usikkerheden.

Man kunne derfor vælge at fortsætte med at slibe stålpladen, eller man kunne forsøge at dykke ned i usikkerhedsbudgettet for at identificere de største kilder til usikkerhed.

I 6. søjle, benævnt  $u_i(y)$ , ses de individuelle usikkerhedsbidrag. De fortæller hvor meget den enkelte usikkerhedskilde bidrager til usikkerheden på  $Ra$ . Det ses at kalibreringsfaktoren (2), spredningen i  $Ra$ -målingerne på selve stålpladen (1), og operatøren (6) bidrager mest til usikkerheden.

Bidrag fra selve instrumentet – opløsning og drift – har derimod ikke en lige så stor betydning. Så at købe en ny ruhedsmåler med en bedre opløsning vil ikke nødvendigvis resultere i målinger med en lavere usikkerhed. I stedet kunne man vælge at benytte et

kalibreringslaboratorie, som kan udføre kalibreringen med en mindre usikkerhed. Derved vil usikkerheden på kalibreringsfaktoren mindskes. Eller man kunne sikre sig at de forskellige operatører kender den rette måleprocedure for ruhedsmåling, og derved kunne der opnås en mindre spredning på måleværdierne i næste interne sammenligning.

I dette tilfælde ville man nok for at være på den sikre side slibe stålpladen lidt mere, også måle en gang til for at verificere at  $Ra < 0,65 \mu\text{m}$ .

## **5 Akkrediteret kalibrering af taktil ruhedsmåler og ruhedsnormal**

Den akkrediterede kalibrering af ruhedsmåler og ruhedsnormal sikrer pålidelighed af de målinger, som udføres med udstyret. Derudover sikrer kalibreringen, at der er sporbarhed til meteren. Mere herom i afsnit 5.3.

I de følgende afsnit beskrives et eksempel på, hvordan henholdsvis en ruhedsmåler og en ruhedsnormal kalibreres hos et akkrediteret laboratorium.

### **5.1 Kalibrering af ruhedsnormal**

Når en virksomhed sender sin ruhedsnormal til kalibrering hos et akkrediteret laboratorium, sikres det at ruhedsnormalen er sporbar til SI-enheden for længdemeter. Når denne ruhedsnormal så benyttes til en prøvning/kalibrering af virksomhedens ruhedsmåler, er ruhedsmåleren således også sporbar til meteren.

Ud over at sikre sporbarhed til de målinger, man foretager med ruhedsmåleren, så er en ekstern kalibrering også en god måde at få kontrolleret, at ruhedsnormalen er i god stand, og at den stadig besidder den ruhedsværdi, som man forventer.

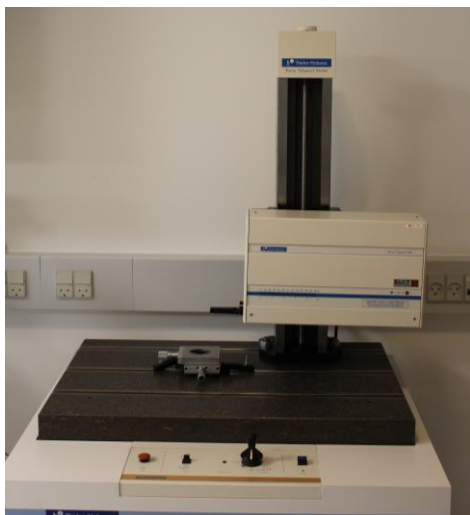
#### Boks 4: Fritastinstrument

Fritastinstrumenter har ingen slæbesko. De har kun en tastpids, som følger overfladens topografi. I stedet for slæbeskoen holdes der hele tiden styr på, hvordan tasten bevæger sig hen over overfladen ved både at måle tastens vertikale (z) og horisontale (x) position. Derved opsamles en række (x,z) punkter, som tilsammen udgør profilen. Tastens bevægelse måles enten med laserinterferometri, glaslineal eller piezo styring. Dette gør, at fritastinstrumentet har en bedre opløsning end håndholdte ruhedsmålere.

Da fritastinstrumentet ikke har en slæbesko, kan det benyttes til både at måle form, bølgethed og ruhed af et måleemne. Derudover kan det benyttes til at måle ruheden af emner, som ikke er plane. F.eks. ruheden af en kugle.



Fritastinstrumenter er sædvanligvis stationære instrumenter, hvilket ofte er en ulempe i produktionen, da det mindsker fleksibiliteten. Derudover er fritastinstrumentet mere vibrationsfølsomt end håndholdte ruhedsmålere. Til gengæld er baggrundsstøjen for fritastinstrumenter ca. 5 gange lavere end for håndholdte ruhedsmålere, hvilket betyder at glattere overflader kan måles [6].



Det akkrediterede laboratorie benytter ikke en håndholdt ruhedsmåler til at kalibrere ruhedsnormalen. I stedet benyttes et såkaldt *fritastinstrument*, også kaldet et *profilometer*. Fritastinstrumenter kan ud over at måle ruheden af overfladen også måle emnets form. Mere om fritastinstrumenter i boks 4.

Før kalibrering af ruhedsnormalen renses den med ikke-fnuggende papir, f.eks. linsepapir, vædet i rensbenzin. Dernæst undersøges ruhedsnormalens tilstand med et optisk mikroskop. I mikroskopet er det muligt at se, om ruhedsnormalen har ridser og huller i ruhedsmønstret. Hvis der er for mange ridser og huller, vil overfladen ikke længere have den ønskede ruhedsværdi, og ruhedsnormalen skal kasseres. Ser ruhedsnormalen derimod ud til at være i god stand, kan selve kalibreringen påbegyndes.

Ruhedsnormalen måles med fritastinstrumentet 12 forskellige steder jævnt fordelt på måleområdet. Ridser og huller i overfladen undgås.

For hver af de 12 profiler beregnes de relevante ruhedsparemetre, f.eks.  $R_a$  og  $R_z$ . Dernæst tages et gennemsnit, og måleusikkerheden på gennemsnittet beregnes via usikkerhedsbudgettet. Resultaterne angives i et kalibreringscertifikat, som virksomheden får retur sammen med ruhedsnormalen.

Virksomheden kan så konstatere om ruhedsnormalens kvalitet stadig er acceptabel, og om ruhedsværdien er intakt.

## 5.2 Kalibrering af håndholdt ruhedsmåler

Sendes en ruhedsmåler til kalibrering hos et akkrediteret laboratorie, vil de normalt kontrollere, at ruhedsmåleren og dens mest kritiske dele fungerer, som de skal.

Derudover vil ruhedsmålerens pålidelighed undersøges ved én eller flere ruhedsværdier. Det vil sige, at ruhedsmåleren måler på én eller flere ruhedsnormaler.

Før kalibrering undersøges tastspidsen i et optisk mikroskop for at kontrollere, at formen er som den skal være. Ydermere kan man se om tastspidsen er beskidd. Viser tastspidsen sig at være beskidd, kan den renses med trykluft.

### Baggrundsstøj

Ruhedsmåleren har en baggrundsstøj, som stammer fra vibrationer i de elektriske og mekaniske dele i ruhedsmåleren. Baggrundsstøjen kan ikke undgås, og alle målte profiler vil være overlejret med denne baggrundsstøj. Derfor er det vigtigt at have en ide om størrelsen af ruhedsmålerens baggrundsstøj, da det er med til at definere, hvor små ruheder man kan måle.

Hvis overfladen er glattere end baggrundsstøjens vibrationer, vil man kun måle denne støj og ikke den faktiske overflades topografi.

Baggrundsstøjen måles typisk ved hjælp af et *planglas*. Et planglas er en tyk glasplade, som er meget plan og glat. Ved at lade ruhedsmåleren måle planglasset f.eks. 10 gange på den samme position får man en ide om baggrundsstøjens størrelse. Baggrundsstøjen kan udtrykkes som f.eks. en *Ra* eller en *Rz* værdi.

Som en tommelfingerregel bør man kun anvende ruhedsmåleren til måling af en overflade, hvis baggrundsstøjen udgør mindre end 20 % af størrelsen af den målte ruhedsparemeter.

**Eksempel:** Du har en ruhedsmåler med en baggrundsstøj på  $Ra = 0,02 \mu\text{m}$ . Ruhedsmåleren benyttes til at måle på et keramisk materiale. Det keramiske materiale måles til at have en  $Ra = 0,08 \mu\text{m}$ . Hvor stor en del af den målte  $Ra$ -værdi udgør baggrundsstøjen?

$$\frac{Ra(\text{baggrundsstøj})}{Ra(\text{målt})} = \frac{0,02}{0,08} \cdot 100\% = 25\%$$

Som det ses af beregningen udgør baggrundsstøjen 25 % af  $Ra$ -værdien. Det er derfor *ikke* en god ide at

benytte denne ruhedsmåler til at måle på den keramiske overflade. Overfladen er relativt glat i forhold til ruhedsmålerens baggrundsstøj.

### Kalibrering

Selve kalibreringen udføres med én eller flere ruhedsnormaler med forskellige ruhedsværdier.

Hver ruhedsnormal måles 12 forskellige steder jævnt fordelt på ruhedsnormalens måleområde. De aflæste ruhedsparemetre noteres og angives sammen med måleusikkerheden i et kalibreringscertifikat.

En ruhedsmåler kan godt måle mere nøjagtigt og præcist i et ruhedsområde frem for et andet. Ruhedsmåleren kunne f.eks. være rigtig nøjagtig og præcis ved  $Ra$  omkring  $0,2 \mu\text{m}$  men ikke lige så god ved  $Ra$  omkring  $2 \mu\text{m}$ . En kalibrering, som udføres med flere ruhedsnormaler, vil give virksomheden viden om dette.

Hvis ruhedsmåleren viser sig ikke at måle med den ønskede nøjagtighed og præcision i det ruhedsområde, som den primært benyttes ved, kan man vælge at justere ruhedsmåleren.

#### 5.2.1 Justering af en ruhedsmåler

Efter en kalibrering kan det vise sig, at ruhedsmåleren ikke måler så nøjagtigt og præcist som ønsket. I så fald kan en justering af ruhedsmåleren være nødvendig. Det kan f.eks. være, at der er en forskel på 20-30 % mellem, hvad ruhedsmåleren viser, og ruhedsnormalens værdi.

Ruhedsmåleren har et program, som kan benyttes til justering. Ved justering måler man først på en ruhedsnormal, som har en  $Ra$ -værdi inden for det område, hvor ruhedsmåleren typisk bruges. I kalibreringscertifikatet for ruhedsnormalen fremgår normalens  $Ra$ -værdi. Denne  $Ra$ -værdi indtastes i ruhedsmålerens program. Efter indtastningen kontrolleres det, at ruhedsmåleren måler ruhedsnormalens værdi som ønsket.

Efter justeringen vil den ruhedsværdi, som vises på displayet, korrigeres i forhold til denne justering. Justeringen ændrer således den ruhedsværdi, som ruhedsmåleren viser. Derfor er det vigtigt at foretage en ny kalibrering af ruhedsmåleren efter justering. Derved bestemmes igen, hvordan ruhedsmåleren måler ved forskellige  $Ra$ -værdier.

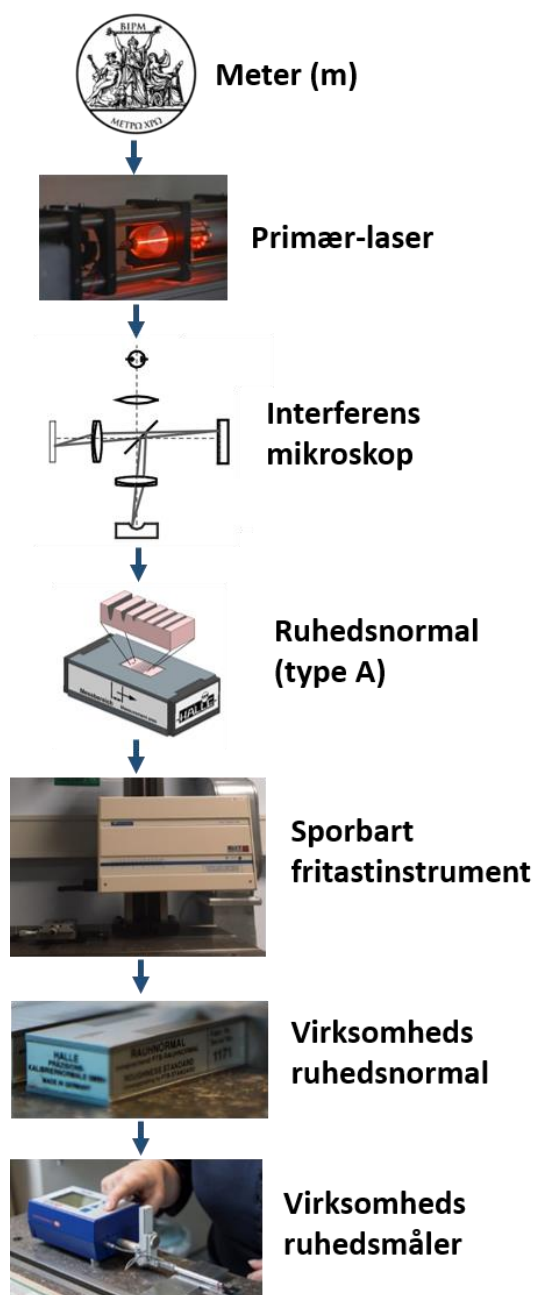
Det er imidlertid vigtigt at understrege, at det oftest er bedst *ikke* at justere sin ruhedsmåler, da man således ændrer hvordan ruhedsmåleren måler. Tidligere kalibreringer og målinger foretaget med ruhedsmåleren kan således ikke længere sammenlignes med nye målinger.

En anden konsekvens af en justering er, at ruhedsmåleren indstilles til at måle korrekt ved lige den  $Ra$ -værdi, som man benyttede til justering. F.eks.  $Ra = 0,2 \mu\text{m}$ . Ønskes det også at ruhedsmåleren f.eks. måler korrekt ved  $1,2 \mu\text{m}$ , så kan justeringen betyde at det ikke er tilfældet længere.

For ikke at miste historikken på ruhedsmåleren, vil det i de fleste tilfælde være bedre at korrigere ruhedsparemetens værdi manuelt ved brug af en kalibreringsfaktor, se afsnit 4.2.

### 5.3 Sporbarhedskæde for ruhedsmåling

En akkrediteret kalibrering sikrer sporbarhed hele vejen tilbage til meteren. Sporbarhedskæden for en ruhedsmåling kan variere alt afhængig af, hvilket udstyr som benyttes i de enkelte led i kæden. På Figur 10 ses et eksempel på en sporbarhedskæde indenfor ruhedsmåling.



Figur 10: Eksempel på en sporbarhedskæde for en ruhedsmåling. De enkelte led er uddybet i teksten.

Sporbarhedskæden starter med definitionen af længde med enheden meter. Meteren er defineret ved den strækning, som 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" [2].

Primær-laseren sammenlignes med en anden sekundær laser. Den sekundære laser benyttes i et *interferensmikroskop (interferometer)*. Interferensmikroskopet kan med nanometer præcision måle længder ved hjælp af *interferens*. Lysinterferens opstår når to lysstråler vekselvirker med hinanden.

I 3. og 4. led benyttes interferensmikroskopet til at måle dybden af rillerne i en type A ruhedsnormal (omtalt i boks 1).

Fritastinstrumentet kalibreres så ved, at det måler dybden af rillerne i type A normalen. Herved sikres sporbarhed til meteren via sammenligningen med interferensmikroskopets dybdemålingerne. Type A ruhedsnormalen har normalt riller af forskellig dybde, så fritastinstrumentets bevægelse kan testes i flere områder. F.eks. kunne type A normalen have seks riller i området fra 0,1 til 10  $\mu\text{m}$ .

Fritastinstrumenter findes både hos kalibreringslaboratorier og hos større virksomheder.

I næste led bruges fritastinstrumentet til at kalibrere virksomhedens ruhedsnormal (arbejdsnormal). Dette er typisk en type C ruhedsnormal.

I sidste led af kæden benyttes type C ruhedsnormalen til at kalibrere virksomhedens ruhedsmåler, så det sikres, at den måler pålideligt og sporbart. Dog skal det bemærkes, at ruhedsmåleren kun vil være kalibreret i området lige omkring den ruhedsværdi, som ruhedsnormalen har.

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

## 6 Opsummering

I dette kompendium introduceres læseren til måling af ruhed ved brug af taktile håndholdte ruhedsmålere. Derudover gennemgås et eksempel på et usikkerhedsbudget.

Måleprincippet bag en håndholdt ruhedsmåler starter med tastspidsens bevægelse hen over prøveoverfladen. Dette resulterer i en profil af overfladens topografi, som efterfølgende filtreres, således at de meget korte og meget lange komponenter af profilen fjernes. Den tilbageværende profil er ruhedsprofilen. Ud fra ruhedsprofilen beregnes ruhedsparametre såsom  $Ra$  og  $Rz$ .

Ruhedsmålere prøves og kalibreres ved brug af ruhedsnormaler, som har en meget veldefineret profil, og derved en veldefineret ruhedsværdi. De hyppigst anvendte ruhedsnormaler er type C og type D. Ud fra kalibreringen kan en kalibreringsfaktor beregnes, så det sikres, at ruhedsmåleren måler pålideligt og sporbart.

Til enhver måling skal udarbejdes et usikkerhedsbudget. Et eksempel på et sådant usikkerhedsbudget er gennemgået ved brug af måleteknikkens sekstakkede stjerne.

Sporbarheden af en ruhedsmåling sikres ved at sende enten ruhedsnormal eller ruhedsmåler til akkrediteret kalibrering hos et akkrediteret laboratorium.



## 7 Ordliste

Begreb	Forklaring	Afsnit
<b>Baggrundsstøj</b>	Ruhedsmåleren har en baggrundsstøj, som stammer fra vibrationer i de elektriske og mekaniske dele i ruhedsmåleren.	5.2, 4.4
<b>Drift</b>	Drift i et instrument er en løbende ændring over tid i den talværdi, som måleudstyret viser. For ruhedsmålere kunne det være en målt <i>Ra</i> værdi af en ruhedsnormal.	4.3
<b>Dynamikområde</b>	Dynamikområdet for en ruhedsmåler angiver det maksimale interval i højden, som ruhedsmåleren kan bevæge sig i.	3.3.1
<b>Forstærkningstrin</b>	Forstærkningstrinnet bestemmer, hvor meget tastspidsen for en ruhedsmåler maksimalt kan bevæge sig op og ned, samt hvor fin opløsningen af profilen er.	3.3.1
<b>Fritastinstrument</b>	Stationær instrument til måling af form, bølgethed og ruhed. Kaldes også for et profilometer. Fritastinstrumenter har ikke slæbesko med datum opretholdes ved at måle tastens bevægelse hen over overfladen med laserinterferometri, glaslineal eller piezo styring.	5.1
<b>GPS</b>	Geometrisk Produkt Specifikation.	1
<b>Justering af ruhedsmåler</b>	Ved en justering ændres den viste værdi på ruhedsmålerens display således så den stemmer bedre overens med den angivne værdi på kalibreringscertifikatet. Bemærk, at historikken derved mistes.	5.2.1
<b>Kalibrering af ruhedsmåler</b>	Ved en akkrediteret kalibrering af en ruhedsmåler kontrolleres dels, at ruhedsmåleren fungerer korrekt. Derudover undersøges pålideligheden af dens målinger.	5
<b>Kalibreringsfaktor</b>	En kalibreringsfaktor for en ruhedsmåler angiver forholdet mellem en værdien for en ruhedsnormal fra certifikatet og den målte værdi med ruhedsmåleren.	3.3.3
<b>Mikrometer, <math>\mu\text{m}</math></b>	1 mikrometer angiver præfikset "mikro" en milliontedel af SI-enheden "meter". Skrives også $\mu\text{m}$ med det græske symbol " $\mu$ " [my] som angivelse af "mikro". Dvs $1 \mu\text{m} = 0,000001 \text{ m}$	1
<b>Primærprofil</b>	Primærprofilen fås efter fjernelse af meget korte bølgelængder fra total profilen ved brug af filtreret $\lambda\text{s}$ .	3.1.1
<b>Prøvning af ruhedsmåler</b>	Ved en prøvning af en ruhedsmåler kontrolleres dels indstillinger og tilstanden af tastspidsen og dels bestemmes kalibreringsfaktoren for ruhedsmåleren.	3.3
<b>Ra</b>	Ruhedsparameteren <i>Ra</i> angiver den numerisk gennemsnitlige højdevariation inden for en referencelængde. Se også "G2 – Ruhed" [1]	2
<b>Referenceprofil</b>	Spor som tastspidsen bevæges langs. Sporet sikrer en korrekt referenceføring af tastspidsen over overflader hvor overfladen fungerer som referencen (datum).	3.1
<b>Ruhed</b>	Ruhed er en beskrivelse af højdevariationer på en overflade set på en skala af mikrometer.	1
<b>Ruhedsnormal</b>	En ruhedsnormal er et referenceemne, som anvendes til kalibrering af ruhedsmålere. Den er kendetegnet ved, at dens overflade har en bestemt ruhedsværdi. Se Boks 1.	3.2

Begreb	Forklaring	Afsnit
<b>Ruhedsprofil</b>	Ruhedsprofilen beskriver ruhedsdelen af profilen. Den fremkommer fra primærprofilen ved at frasortere den mere langbølgede bølgethed ved brug af filteret $\lambda c$ .	3.1.1
<b>Taktil metode</b>	Måling med en tynd spids (tast), der føres hen over prøvens overflade. Spidsen bevæger sig op og ned i takt med overfladens kontur og måler derved ændring i højde.	1
<b>Tastnitinstrument</b>	Betegnelse for en ruhedsmåler ifølge ISO 3274.	3.1
<b>Topografi</b>	Topografi er en overordnet betegnelse for højdevariationer på en overflade.	3
<b>Total profil</b>	Den totale profil er den målte profil i forhold til referenceprofilen (typisk en ret linje).	3.1

## 8 Læringsudbytte

Efter gennemførelse af dette undervisningselement om måling af ruhed er det målet, at den studerende kan

1. Beskrive og forstå en taktil ruhedsmåling
2. Forstå de indstillinger, der har betydning for en taktil ruhedsmåling, såsom valg af filtre og forstærkningstrin.
3. Beskrive og evaluere kalibrering og prøvning af taktile ruhedsmålere
4. Beskrive kalibrering af ruhedsnormaler til taktil måling
5. Identificere og evaluere mulige fejlkilder for en taktil ruhedsmåling
6. Identificere og forstå relevante ISO GPS-standarder omhandlende taktil ruhedsmåling
7. Vurdere et måleresultat og beregne den tilknyttede måleusikkerhed

Forudsætninger:

Det forudsættes at kompendiet "G2 – Ruhed" er læst. Derudover er det en god ide at have læst kompendierne "A1 – Introduktion til målinger" og "A3 – Introduktion til usikkerhedsbudgetter" og være bekendt med "A4 – Usikkerhedsbudget regneark".

## 9 Litteraturliste

- [1] M. S. Nielsen og S. R. Johannsen, G2 - Ruhed, Lyngby: metrologi.dk, 2017.
- [2] S. R. Johannsen og M. H. Madsen, A1 - Introduktion til målinger, Lyngby: metrologi.dk, 2017.
- [3] D. Balslev-Harder, S. R. Johannsen og M. H. Madsen, A3 - Introduktion til usikkerhedsbudgetter, Lyngby: metrologi.dk, 2017.
- [4] G. Schuetz, »<https://www.mahr.com/en/Services/Production-metrology/Know-how/Gaging-Tips/Surface-Measurement-Gaging-Tips/?ContentID=19018&Overview=0>«, Mahr, 2018. [Online].
- [5] D. Balslev-Harder, S. R. Johannsen og L. Nielsen, A4 - Usikkerhedsbudget regneark, Lyngby: metrologi.dk, 2017.
- [6] E. Jensen og J. B. Kondrup, A5 - Målesikkerhed og overholdelse af tolerance, Brøndby: metrologi.dk, 2017.
- [7] L. De Chiffre, H. N. Hansen, J. L. Andreasen, E. Savio og S. Carmignato, Geometrical Metrology and Machine Testing, Lyngby: Polyteknisk forlag, 2015.
- [8] DS/ISO 8503, Klargøring af ståloverflader forud for påføring af maling og lignende produkter - Sandblæste ståloverfladers ruhedsegenskaber, 2012.
- [9] DS/ISO 3274, Tastsnitinstrumenters nominelle karakteristika, 1997.
- [10] DS/ISO 4288, Regler og procedurer for evaluering af overfladebeskaffenhed, 1998.
- [11] DS/ISO 5436-1, Overfladebeskaffenhed: Profilmetode; Målenormaler - Del 1: Materialiserede mål, 2000.

## 10 Appendiks

	Målt $Ra$ ( $\mu\text{m}$ )
	0,620
	0,623
	0,584
	0,619
	0,641
	0,576
	0,680
	0,677
	0,638
	0,574
	0,622
	0,643
Middelværdi, $\overline{Ra}$	<b>0,625</b>
Standard afvigelse, $s(\overline{Ra})$	<b>0,035</b>
Måleusikkerhed, $u(\overline{Ra})$	<b>0,010</b>

Middelværdi,  $\overline{Ra}$ :

$$\overline{Ra} = \frac{(0,620+0,623+0,584+0,619+0,641+0,576+0,680+0,677+0,638+0,574+0,622+0,643)\mu\text{m}}{12} = 0,625 \mu\text{m}$$

Standard afvigelse,  $s(\overline{Ra})$ :

$$s(\overline{Ra}) = \sqrt{\frac{(0,620-0,625)^2+(0,623-0,625)^2+(0,584-0,625)^2+\dots+(0,643-0,625)^2}{12-1}} = 0,035 \mu\text{m}$$

Standardusikkerhed,  $u(\overline{Ra})$ :

$$u(\overline{Ra}) = \frac{0,035 \mu\text{m}}{\sqrt{12}} = 0,010 \mu\text{m}$$

For mere uddybning se kompendiet "A3 – Introduktion til usikkerhedsbudgetter" [3].