

WHITE PAPER

Dynamisk måling og kalibrering

Udarbejdet af Aykurt Altintas, Kim Jacobi



Resumé

Statistiske metoder til kalibrering er godt beskrevet og udbredt.

Den statistiske kalibrering svarer dog ikke altid til, hvordan en transducer anvendes. Hvis en transducer anvendes under ændrende forhold (dynamisk) kan den statistiske kalibrering være utilstrækkelig.

Med øgede krav til en grønnere drift, mindre spild i produktion og øget kvalitet, spiller pålidelige målinger i dynamiske processer en voksende rolle.

Indledning

I dette whitepaper vil vi belyse teori og relevans for dynamisk kalibrering. Formålet er at give et indblik i, hvor dynamiske kalibreringsmetoder har relevans samt beskrive nogle af de metoder og systemer, der på nuværende tidspunkt anvendes.

Desuden giver dette whitepaper indsigt i udviklingen af dynamisk kalibrering ved at undersøge europæiske udviklingsprojekter igennem EURAMET og deres udviklingsplan for dynamisk kalibrering.

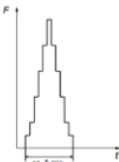
Definition af statisk og dynamisk kalibrering

En mængde kaldes dynamisk, når dens værdi på et givent tidspunkt afhænger af dens værdier på tidligere tidspunkter. I modsætning til statiske målinger, hvor en enkelt værdi eller et (lille) sæt værdier måles, betragter dynamiske målinger kontinuerlige tidsfunktioner.

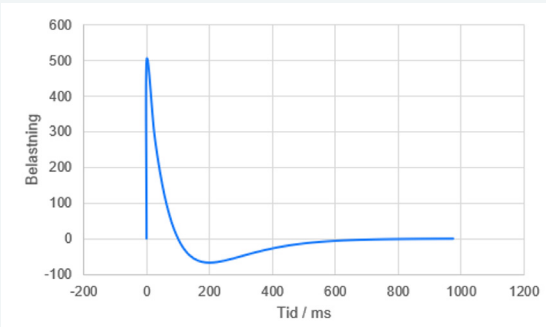
Typiske eksempler er mængder med hurtigt skiftende værdier, hvor dynamikken forekommer periodisk eller som et stød (impuls).

I figur 1 ses øverst, at varigheden af en typisk måleserie for statisk kalibrering af materialeprøve-maskiner er i minutter. Nederst i figur 1 vises en sinusformet kraftamplitude, hvor frekvensen er i størrelsesordenen 0,001 til 0,1 sekunder.

I figur 2 er kurveformen for et dynamisk stød (impuls) fra en eksplosionsbølge illustreret. Den viser, at der i løbet af få millisekunder opstår en høj amplitude (belastning).

Procedure	Schematic sequence of the calibration	Expected measurement uncertainty
DIN EN ISO 7500-1		Class 1: 0.24 % Class 0.5: 0.12 %
Dynamic calibration		Approx. > 2 %

Figur 1 Statisk vs. Dynamisk kalibrering (kilde: DKD-R 3-10 (tabel 2))



Figur 2 Dynamisk stød (impuls) i f.eks. eksplosionsbølge.

Hvorfor tale om dynamisk kalibrering?

Industrien bruger i stigende omfang dynamiske målinger af kraft, drejningsmoment og tryk til test, udvikling, kvalitetssikring af produkter og optimering af sikkerhed.

Statisk kalibrering af dynamiske måleinstrumenter er uegnet, idet kalibreringen ikke tager hensyn til resonans, træghed, reaktionstid, inerti m.m. Under statisk og kvasistatisk kalibrering forbliver eller varier belastningen langsomt, hvorimod under dynamiske forhold ændrer den målte mængde sig hurtigt. De eksisterende målemetoder kan hovedsageligt anvendes til statiske og kvasi-statiske forhold.

Potentielt kan manglende viden om dynamiske effekter medvirke til forkerte konklusioner ved overensstemmelsesvurdering af specifikationer i f.eks. produktion og processer.

Sikkerhedsmæssigt kan det også have en betydning, hvis den maksimale belastning ikke kendes.

Gældende standarder for kalibrering af kraft, drejningsmoment og tryk gælder primært for statisk kalibrering. I ISO 376:2011 "Calibration of force proving instruments used for the uniaxial testing machines", som er den mest anvendte kalibreringsstandard til kraftmålere, står der, at "Denne internationale standard vedrører kun målinger af statisk kraft".

Ligeledes gør EURAMET Cg 4 vers. 2 "Uncertainty of Force Measurements" opmærksom på, at dokumentet alene gælder for statisk kalibrering, hvorimod et betydeligt antal applikationer til måling af industriel kraft, såsom udmattelse og stødttest, er dynamiske.

Derfor er der et stigende krav fra industrien om dynamiske målinger med sporbarhed til SI-enheder i overensstemmelse med internationalt accepterede standarder.

Hvor er der behov for dynamisk kalibrering?

Typiske anvendelsesområder af dynamisk kraftmåling findes bl.a. indenfor produktionsteknik (fx bearbejdningsprocesser), udmattelsestest, automatisering og håndteringsteknik, vibrationstest af mekaniske og elektroniske enheder eller komponenter (fx til satellitter i rumfartsindustrien), kollisionstest og komponenttest for sikkerhedsstandarder.

Eksempler på anvendelsen af dynamisk drejningsmoment er primært til skrueforbindelser i automatiseret produktion og ved mekaniske målinger af udgangseffekt i testrigge for forbrændingsmotorer eller elektriske drev.

Dynamisk trykmåling er påkrævet ved bl.a. udvikling af forbrændingsmotorer, turbomaskiner, maskinkontrol, dannelse af materialer (sprøjtestøbning) samt eksplosioner og ballistisk test.

Virksomheder i Danmark udvikler og tester forbrændingsmotorer til skibsindustrien. Kendskab til cylindertrykket gennem forbrændingscyklussen, gør det muligt at optimere brændstofindsprøjtning og timingparametre for at maksimere effektiviteten og minimere emissioner.

Turbomaskiner

Kompressor, turbiner, pumper og blæsere er vigtige komponenter i damp- og gasturbiner, og de anvendes fx i kraftværker og i jetmotorer. For at finde tabskilder og beregne effektiviteten af turbomaskiner er det vigtigt at måle det dynamiske tryk. Ved konstruktion af turbinemotorer og systemer til at fremdrive raketter anvendes dynamiske trykmålinger til aktiv kontrol, trykmåling og overtryksindikation.

Maskinkontrol

Hydrauliske og pneumatiske komponenter, såsom motorer, pumper, transmissioner, aktuatorer og ventiler bruges ofte til at kontrollere bevægelsen af industrielt udstyr. Derfor er det vigtigt at måle det dynamiske væsketryk, når virksomheder udvikler sådanne komponenter og overvåger deres ydeevne.

Formning af materialer

Plastindustrien udfører dynamiske trykmålinger for at optimere produktionsprocesserne ved fx sprøjtestøbning, ekstrudering og trykstøbning.

Forbedrede dynamiske trykmålinger vil resultere i bedre kvalitet af slutprodukterne og forbedre proceseffektiviteten med reduceret skrot ved sprøjtestøbning, som er den principielle metode til plastfremstilling.

Eksplodingsbølge og ballistik

Et primært resultat af detonationen af sprængstoffer er en eksplosionsbølge i form af et dynamisk tryk. Målingen af dette dynamiske tryk er vigtig ud fra to forskellige synsvinkler. På den ene side ønsker de, der udvikler eksplosiver, at opnå maksimal og målrettet destruktiv kapacitet. På den anden side ønsker udviklere af militært beskyttelsesudstyr, at konstruktioner kan modstå eksplosioner. Dynamisk tryk måles også, når der udvikles våbensystemer som pistoler, kanoner, missiler og ammunition.

Teori om dynamisk kalibrering

Metoderne til dynamisk kalibrering kan deles op i to hovedgrupper.

1. De periodiske der genererer et kontinuerligt kurveforløb.
2. De stødformede der genererer en impuls.

Et **periodisk system** udsætter en transducer for en sinusformet påvirkning ved forskellige frekvenser, hvorved man kan evaluere amplitude og frekvensrespons.

Ved et **stødgenererende system** dannes der en impuls med en given højde og længde. Amplituden bliver målt og sammenlignet med indgangen eller en reference.

Afhængigt af anvendelsen er karakteren af den tidsafhængige belastning meget forskellig.

Eksempler på impulssystemer er shock tube, fast opening device (FOD) eller drop weight systemer. Af periodiske systemer kan bl.a. nævnes piezoelektrisk pulse generator og shaker systemer. Systemerne har forskellige tilgange til oprettelse af målesystemer.

I dette afsnit giver vi en beskrivelse af shock tube, drop weight og shaker systemerne.

Arbejder man med en ændring over tid, hvor variationen ikke har indflydelse på måleresultatet, drejer det sig om kvasi-statiske forhold. Her kan man anvende statiske metoder.



Systemer til dynamisk tryk
Shocktube
Dropweight



Systemer til dynamisk kraft
Shaker system



Måleinstrumenter til dynamisk kraft, tryk og moment
Transducere

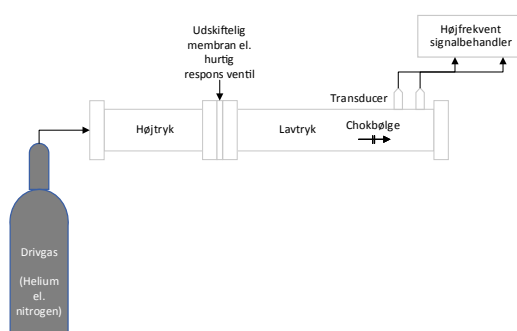
Arbejdsnormaler



Shock tube (Impuls-Stød trykkalibrering)

Et shock tube består af to lige rør med samme cirkulære tværsnit, der er adskilt af en membran eller af en hurtigresponsventil. I det ene rør påfyldes gas indtil membranen brister, eller hurtigresponsventilen åbner. En chokbølge formes langs røret, der når arbejdsnormalen, og transduceren der skal kalibreres.

Målerne kan monteres på rør væggen eller på bagsiden af røret. Membraner kan fås i forskellige materialer og størrelser og for at opnå forskellige belastningstrin.

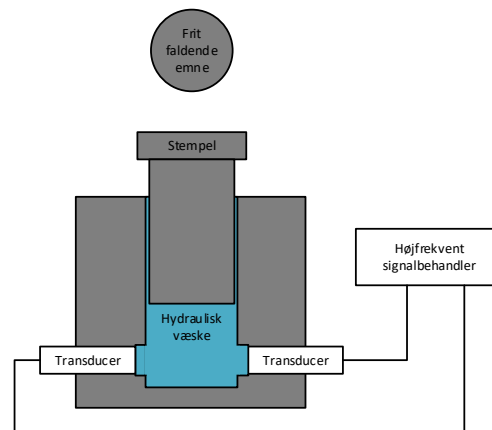


Figur 3 Shock tube princip



Drop weight (Impuls-Stød)

Et emne i frit fald lander på et stempel via et styresystem. Stempellet er placeret øverst i et kammer fuld af hydraulisk væske. Kraften, der transmitteres gennem stempellet, øger væske-trykket, som påvirker det kalibrerede emne (transduceren), der er monteret på kammeret.



Figur 4 Drop weight princip

Størrelsen og varigheden af trykimpulsen varieres ved hjælp af forskellige masser frigivet fra forskellige højder.

Tager man udgangspunkt i et drop weight system til tryk, kan en primærstandard sporbart til SI-enheder etableres igennem en kendt masse, arealet af et stempelcylindersæt og en laser interferometer der måler massens acceleration.

Fordele

Høj frekvens / hurtig respons (> 1 MHz)
(Mulighed for anvendelsen af forskellige gasarter)

Ulemper

Lav amplitude (behov for højere tryk)
Usikkerhed $> 3\%$ af MV
Udskifning af membran
Begrænset testtid

Fordele

Høj amplitude (500 MPa)
Primærstandard

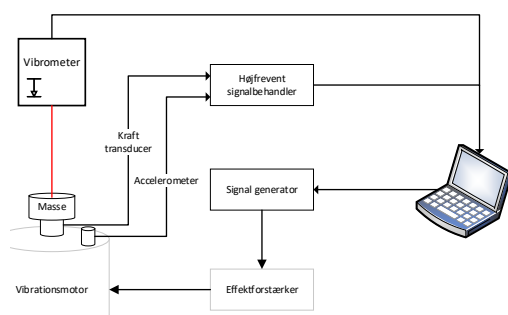
Ulemper

Frekvens < 1 kHz



Shaker-system [Periodisk sinusformet kraftkalibrering]

På et shaker-system, se figur 5, der består af en vibrationsmotor og en effektforstærker påmonteres transducer under kalibrering sammen med et emne med en kendt masse. En signalgenerator styrer vibrationsmotoren, der frembringer sinusformede kræfter og enten vha. en accelerometer eller en vibrometer bestemmes accelerationen og dermed den dynamiske kraft.



Figur 5 Shaker-system

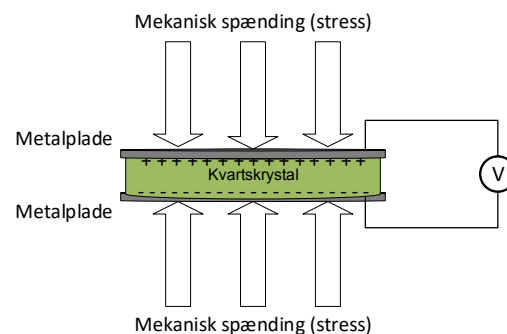


Transducere

Til måling af dynamisk belastning vil man typisk anvende piezoelektriske transducere.

En piezoelektrisk transducer består af en kvartskrystal, som påvirkes af en mekanisk spænding (stress), hvorved der genereres elektriske ladninger på vedhæftede metalplader, som måles med et elektrisk måleinstrument, se figur 6.

En piezoelektrisk transducer måler variationer i acceleration, belastning, tryk, kraft eller temperatur.



Figur 6 Piezoelektrisk transducer

Fordele

Variabel frekvensområde og kraft.

Ulemper

Systemer til dynamisk tryk

- Shocktube
- Dropweight

Systemer til dynamisk kraft

- Shaker system

Måleinstrumenter til dynamisk kraft, tryk og moment.

- Transducere

Fordele

Robust
Hurtig respons
Kompakt
Bred måleområde
(Kvasi-statisk tryk)

Ulemper

Uegnet til statiske målinger
Nødvendigt med eksternt elektronisk kredsløb
Høj temperaturfølsomhed
Nogle krystaller er vandopløselige og opløses i meget fugtige omgivelser

Behov for standardisering er stigende

Med fokus på dynamisk kraft kalibrering er behovet for standardisering af dynamisk kalibrering steget. I 2019 har DKD i Tyskland (Deutscher Kalibrierdienst) frigivet en serie af standarder til kalibrering af dynamisk kraft:

- DKD-R 3-10 ark 1, "Dynamic calibration of force measuring units and testing machines with single-axis loads (fundamentals)"
- DKD-R 3-10 ark 2, "Dynamic calibration of force transducers using the sine method"
- DKD-R 3-10 ark 3, "Dynamic verification of materials testing machines using applied samples".

Der findes ligeledes en ISO-standard til kalibrering af dynamisk kraft kalibrering til uniaksiale udmattelsestest: ISO 4965-1:2012 "Metallic materials – Dynamic force calibration for uniaxial fatigue testing – Part 1: Testing systems".

De mest anvendelige eksisterende dokumenter til dynamisk trykkalibrering er ISA - 37.16.01-2002 "A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers".

Fælles europæisk køreplan

Der er pt. ingen måleevne¹ (Calibration and Measurement Capability, CMC) tilgængelig, og de veletablerede metoder til statisk kalibrering kan ikke anvendes til dynamiske applikationer, da dynamiske målinger er afhængig af accelerationen.

Oprettelsen af CMC'ere kræver udvikling af nationale standarder og overførselsstandarder, der muliggør sammenligningen af systemer.

I teknisk komite (TC-M) for kraft, tryk og moment under EURAMET blev der udarbejdet en køreplan for dynamisk kalibrering [1]. Køreplanen blev opdelt i grundlæggende videnskab, udfordringer og innovation.

Målet er at få defineret dynamiske målinger til industrien med sporbarhed til primærnormaler igennem transfer-standarder.

Igennem fokus på den grundlæggende videnskab skal der udvikles nye metoder, faciliteter og overførselsstandarder.

Forudsætningerne og de nødvendige trin er sammenlignelige for alle tre parametre. Ikke desto mindre har hver parameter brug for forskellige primære standarder og overførselsstandarder for at dække hele amplitude- og frekvensområdet.

Første trin til sporbare dynamiske målinger er en detaljeret analyse af de dynamiske effekter af opstillingerne og sensorerne. Disse skal dække hele målekæden bestående af mekaniske, optiske og elektroniske dele.

Andet trin bliver udviklingen af opstillinger, der igennem undersøgelser og forbedringer bliver optimeret til dynamiske målinger for hele amplitude- og frekvensområdet.

Resultaterne og erfaringen vil blive indarbejdet i fremtidige internationale standarder.

1 Kalibrering og målekapacitet (CMC) er en værdi, der udtrykker, hvor godt et laboratorium kan måle.

Internationale projekter

Den europæiske køreplan bliver realiseret igennem EMPIR projekter, og følgende resultater er indtil videre opnået:

I EMPIR-projektet IND09 (EURAMET, Traceable Dynamic Measurement of Mechanical Quantities, 2021) bestod problemstillingen i at opnå præcise målinger af transducere, der blev anvendt i dynamiske processer. Sporbarheden var hidtil givet til statiske metoder. Et af de vigtige output fra projektet var etablering af primær og sekundær sporbarhed til NMIs for dynamisk kraft, dynamisk moment og dynamisk tryk. (EMPIR project site, 2021)

I periodisk kraftmåling blev det muligt at kalibrere sporbart op til 1 kHz med en amplitude på 10 kN. Til måling af kraftimpulser blev det forsøgt at generere en primærstandard med amplituder op til 250 kN. Her kunne man konstatere, at impulserne introducerede resonans, der havde signifikant indflydelse på måleresultatet, og at yderligere forskning var nødvendig. Desuden undersøgte man primærsystemer til generering af trykimpulser op til 500 MPa igennem drop weight og shock-tubemetoderne. Disse mål blev til dels nået.

For dynamisk moment blev et primærsystem valideret til kalibrering af sinusformet moment

med en frekvens op til 1 kHz og amplituder op til 20 Nm (EURAMET, Traceable Dynamic Measurement of Mechanical Quantities, 2021).

EMPIR-projekt 17IND07 (DynPT, 2018-2021) arbejder videre på grundlaget fra IND09 men har fokus på dynamisk tryk og temperatur, hvilket er særlig relevant for forbrændingsprocesser, sprøjtetøbning og sikkerhedskritiske applikationer som dynamisk materiale tests.

Projektet fokuserede på sporbart dynamisk tryk fra 0,1 til 400 MPa og dynamisk temperatur op til 3000 °C. Der skulle skabes et overlap mellem forskellige systemer for at sammenligne på tværs deraf og dermed reducere usikkerheden og imødegå et industrikrav på 1 % (EURAMET, Development of measurement and calibration techniques for dynamic pressures and temperatures, 2021).

Til dynamisk kraft kalibrering blev der i 2019 igangsat **EMPIR projekt 18SIB08** (ComTraForce 2019-2023). Projektet skal afhjælpe manglende metrologiske services og sporbarhed til dynamisk kraft kalibrering. Målet er bl.a. at etablere nye metoder og transfer standarder til dynamisk kraftkalibrering med sporbarhed til SI i området 1 N til 1 MN (EURAMET, Comprehensive traceability for force metrology services, 2021).

Konklusion

Behovet for kalibrering af dynamiske sensorer, transducere eller måleinstrumenter er stigende, og med udbredelsen af kendskabet til dynamisk kalibrering, forventer vi, at efterspørgslen vil tage fart.

Det er begrænset med kommercielle løsninger, og det kræver en stor investering at dække hele måleskalaen for de enkelte parametre. I et europæisk fællesskab vil det være muligt at løfte udfordringerne med udvikling af standarder,

metoder og tilføje CMC linjer til KCDB. Hvorimod til kalibrering af kvasi-statiske måleinstrumenter, hvor frekvensen er lav, er det muligt at foretage en kalibrering nationalt med eksisterende måleinstrumenter ved at ændre kalibreringsproceduren.

På nationalt plan er det muligt at blive akkrediteret til kalibrering af kvasi-statiske måleinstrumenter.

Referencer

[1] https://www.euramet.org/Media/docs/Publications/roadmaps/TC_M_dynamic_Roadmap_2012_text.pdf

EURAMET. (2021, 05 17). Development of measurement and calibration techniques for dynamic pressures and temperatures. Retrieved from https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/project/development-of-measurement-and-calibration-techniques-for-dynamic-pressures-and-temperatures/?L=0&tx_eurametctcp_project%5Baction%5D=show&tx_eurametctcp_project%5Bcontrol

EURAMET. (2021, 05 03). Traceable Dynamic Measurement of Mechanical Quantities. Retrieved from https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/project/traceable-dynamic-measurement-of-mechanical-quantities/?L=0&tx_eurametctcp_project%5Baction%5D=show&tx_eurametctcp_project%5Bcontroller%5D=Project&cHash=9b2402057205a673e

EURAMET. (2021, 05 17). Traceable Dynamic Measurement of Mechanical Quantities. Retrieved from <https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/project/traceable-dynamic-measurement-of-mechanical-quantities/>

<https://www.ptb.de/emrp/ind09-home.html>

Udarbejdet af Aykurt Altintas, Kim Jacobi

56981

FORCE Technology
Park Allé 345
2605 Brøndby
Danmark
+45 43 25 00 00
info@forcetechnology.com
forcetechnology.com

