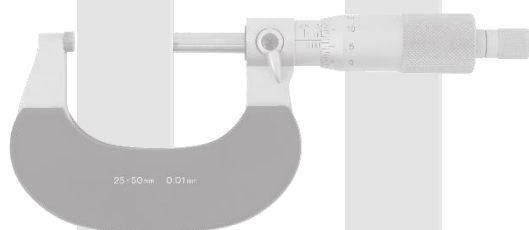


MÅLING AF ELEKTRISK EF- FEKT

UNDERVISNINGSELEMENT

E4

—
UNDERVISNING
I MÅLETEKNIK



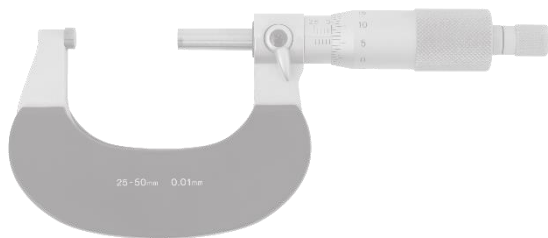
metrologi.dk



MÅLING AF ELEKTRISK EFFEKT

Knud A. Baltzen, FORCE Technology

2. udgave – August 2018, redigeret september 2019



Copyright © 2017 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.

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, medmindre andet følger af dansk rets almindelige regler.

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

Indholdsfortegnelse

1 Indledning	2	5.6 Simpel grafisk effektberegning.	18
2 Elforbrugsmålere	2	5.7 Betragtninger gældende for dataopsamling.....	20
3 Måleudstyrsdirektivet (MID) 2014/32/EU	7	5.8 Elmålerundersøgelse fra Holland.....	22
4 Bilag V til MID	8	6 Afslutning.....	27
4.1 Eksempler for Kamstrup 382M	8	7 Referencer og standarder.....	28
4.2 Eksempel for Sartano EMD-3	10	7.1 Referencer	28
4.3 Eksempler for Hioki CM3286	11	7.2 Udvalgte standarder for elmålere	28
5 Brugssituationer	13	8 Generelt vedr. dette undervisningsmateriale, læringsudbytte og forudsætninger.	29
5.1 Generelt om måling af spænding, strøm og effekt.....	13	8.1 Om dette undervisningselement (UE)	29
5.2 Måling af spænding og strøm	13	8.2 Læringsudbytte	29
5.3 Beregning af effekt	14	8.3 Forudsætninger	29
5.4 Måling og beregning af elektrisk effekt	15	Appendiks A: Omtale af andre CE- mærkningsdirektiver ud over MID.	30
5.5 Effektberegning baseret på sinusform.....	17		

1 Indledning

Måling af elektrisk effekt er særdeles udbredt. Den absolut mest betydende grund til at foretage disse målinger er at få afregnet det elektriske forbrug, som finder sted f.eks. i private beboelser, forretninger og industrier. Denne type af målinger karakteriseres som legal metrologi. Dvs. at de anvendte måleinstrumenter er underkastet lovbestemt metrologisk kontrol. Denne kontrol er iværksat, da der her indgår økonomiske transaktioner mellem to parter. Begge parter skal være sikret en retfærdig afregning.

En anden, knapt så udbredt type af elektrisk forbrugsmåling foregår, hvor der kun er tale om én og samme part. Det kunne f.eks. være, at man ønskede at følge med i det løbende elforbrug eller man ønsker at optimere ens forbrug for at opnå energibesparelser. Her er der økonomisk afregningsmæssigt kun tale om en og samme part. Derfor kræves der for disse måleinstrumenter ikke den lovbestemte metrologiske kontrol.

Der er intet til hinder for at måleinstrumenterne til de to typer af målingsformål kan være lige nøjagtige og pålidelige, eller endog bedre til den ikke-lovbestemte målingstype.

2 Elforbrugsmålere

Et elektrisk forbrug kan måles med mange metoder. Ved ref. [1] omtales det historiske forløb for kemiske og elektromekaniske elektriske forbrugsmålere, som i det følgende materiale kort vil blive betegnet elmålere.

Den formelle danske betegnelse er elforbrugsmålere, og den tilsvarende engelske er "Active electrical energy meters". Begge disse betegnelser er hentet henholdsvis fra den danske og fra den engelske udgave af Måleinstrumentdirektivet (MID)/Measuring Instruments Directive (MID). Meget praktisk gælder altså samme akronym, MID, for begge sprog. MID omtales nærmere i kapitel 3.

De to mest almindelige elmålere til legale målinger er den elektromekaniske elmåler (Ferraris måler) og den statiske elmåler. Benævnelsen "statisk" på dansk stammer fra engelske betegnelse "static meter". Denne lidt kryptiske betegnelse er opstået for at sondre mellem den elektromekaniske elmåler og en elmåler udelukkende baseret på elektronik. Den elektromekaniske måler har bevægelige elementer bestående af en metalskive, som kan dreje om en akse og tilhørende ophængningslejer og gearudveksling i modsætning til den fuldelektroniske, som er helt befriet for de bevægelige mekaniske elementer, - heraf betegnelsen statisk. Der eksisterer elmålere, hvor en elektronisk aftastning er tilbygget en elektromekanisk elmåler (se f.eks. afsnittet "Remote metering" i ref. [1]). En sådan elmåler vil dog stadig kategoriseres som elektromekanisk, da selve måleenheden er elektromekanisk.

Ferraris opdagelse (ikke dén Ferrari med bilen!)

I ref. [1] omtales italieneren Galileo Ferraris (1847-1897), som i 1885 opdagede, at en metalskive vil blive påvirket af en kraft, hvis den inden for samme område påvirkes af to faseforskudte vekslende magnetfelter. Kraftpåvirkningen kan få en metalskive, som er ophængt i et leje, til at dreje. Ved at den elektriske strøm genererer det ene vekslende magnetfelt og den tilhørende elektriske spænding genererer det andet, kan denne omdrejning repræsentere den elektriske effekt, som passerer gennem måleren.

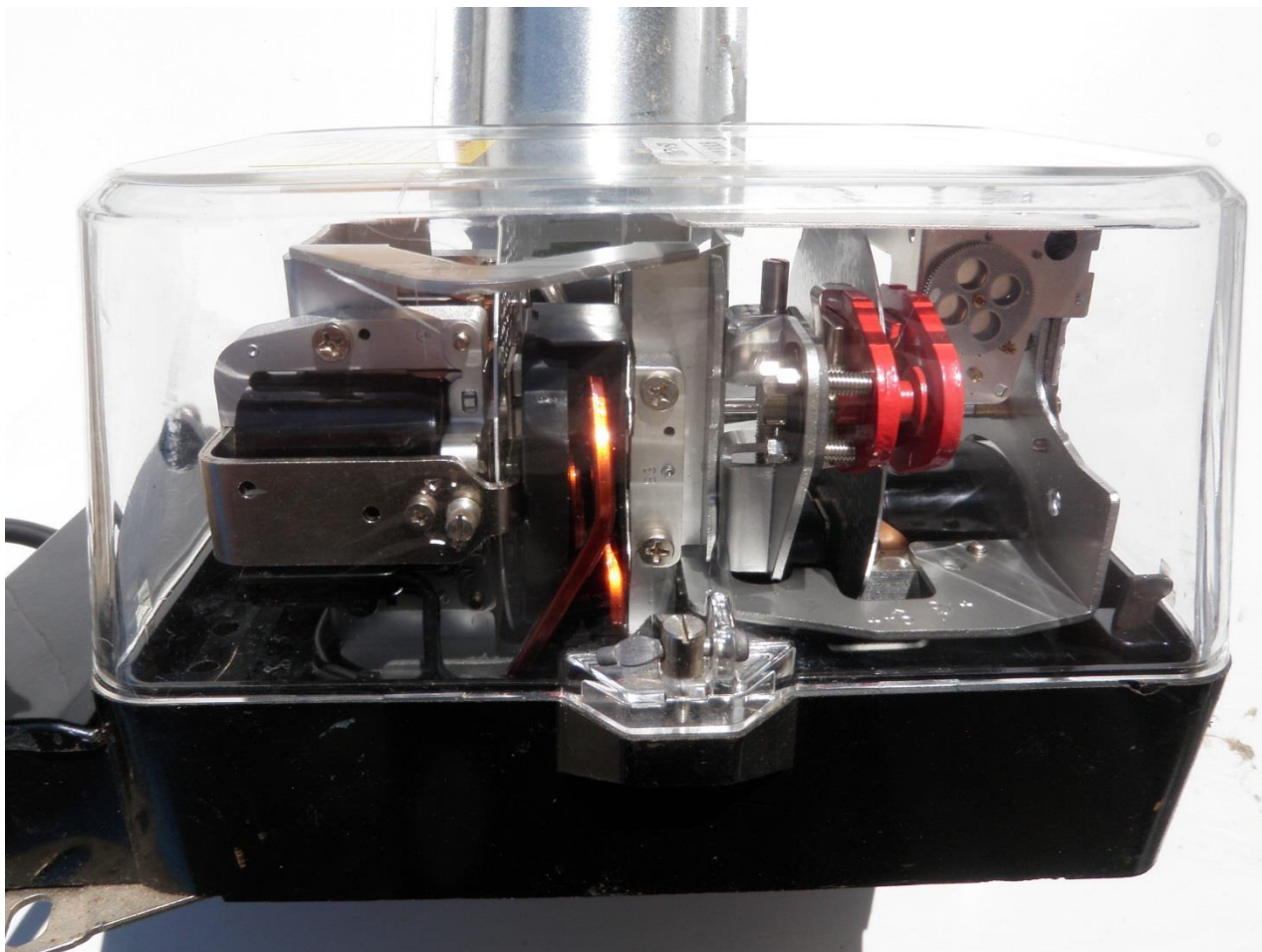
Ved figurerne 1 og 2 er vist et eksempel på den stadig anvendte elektromekaniske elmåler af Ferraris typen.



Figur 1. Elektromekanisk elmåler af Ferraris typen (fabrikat Landis & Gyr), set mod fronten. Lige over det gule mærkat ses den cirkulære metalskive, som bringes til at rotere, når den påvirkes af vekselfelterne fra to spoler. Igennem den ene spole (strømspolen) passerer strømmen, og over den anden spole (spændingsspolen) påtrykkes spændingen. Spolerne er arrangeret således, at skiven påvirkes samtidigt af de to vekslende magnetfelter stammende henholdsvis fra strømmen og fra spændingen. De to magnetfelter er naturligt faseforskudt 90°.

Øverst ses tælleren, hvis tal afspejler metalskivens omdrejninger, og dermed den forbrugte elektriske energi. På mærkeskiltet (lige over de hvide mærkater) ses til venstre omsætningsfaktoren, som fortæller, at 60 omdrejninger af metalpladen svarer til et energiforbrug på 1 kWh.

Elmålerens dimensioner er: Højde ca. 21 cm, bredde ca. 15 cm og dybde ca. 13 cm.



Figur 2. Elektromekanisk elmåler af Ferraris typen, set mod siden. Længst til venstre er spændingsspolen (det sorte hylster) placeret. Denne spole har mange vindinger i modsætning til strømspolen. Dernæst ses den drejelige cirkulære metalskive, og lige til højre for den er strømspolen placeret (man ser den kraftige kobberfarvede strømleder). Længst til højre befinder geardelen sig, som omsætter skivens omdrejninger til en voksende talrække i tælleren. (Elmåleren er venligst stillet til rådighed for fotografering af Ølby El-Service K/S v. Jes Stokholm)

Spændingsspolen, er opbygget med virkelig mange vindinger. Derved optræder spolen nærmest som en ideel spole. For en sådan gælder, at strømmen gennem den er faseforskudt 90° i forhold til spændingen over den. Denne strøm frembringer et magnetfelt med samme fase som strømmen (og dermed faseforskudt 90° i forhold til spændingen). Dette magnetfelt frembringer hvirvelstrømme i én retning i metalskiven, og da spændingen normalt altid er til stede vil disse hvirvelstrømme altid være til stede.

For strømspolen gælder derimod, at denne består af så få viklinger, at den faktisk ikke yder nogen spolevirkning. Dermed gælder, at strømmen gennem spolen og magnetfeltet fra strømspolen er i samme fase som strømmen i den belastning, som måleren er tilsluttet.

Hvis belastningen er rent resistiv opnås således, at magnetfeltet fra strømspolen er faseforskudt 90° i forhold til magnetfeltet fra spændingsspolen. Dermed er retningen af magnetfeltet fra strømspolen vinkelret på hvirvelstrømmene fra spændingsspolen. Metalskiven påvirkes derved mekanisk, og skiven drejer rundt.

Hvis belastningen også består af en reaktiv del, fås en magnetisk faseforskydning, som vil have en mindre vinkelret komponent, og skiven vil blive påvirket mindre selv for samme størrelse af belastningsstrømmen. Derved kan dette arrangement anvendes som en elektrisk effektmåler.

Et eksempel på en statisk (fuldelektronisk) elmåler er vist ved figur 3.



Figur 3. Statisk (fuldelektronisk) elmåler (fabrikat Kamstrup, model 382M). Ved at påvirke den venstre af knapperne under displayets højre side, kan man skifte mellem flere forskellige informationer på displayet. Nogle af displayvisningerne er opsummeret elforbrug fra tidspunktet for målertilslutning, aktuel effekt, triptæller for elforbrug og (som det faktisk vises her) opsummeret elproduktion. Denne elmåler befinder sig i kompendieforfatterens elinstallation, og i displayet vises den opsummerede elproduktion, som forfatterens husstandsvindmølle har leveret ud på elnettet siden tilslutningen. Alle data, som måleren registrerer, sendes via radioforbindelse (af samme type som mobiltelefonkommunikation) til elektricitetsselskabet til brug for afregningen.

Elmålerens dimensioner er: Højde ca. 21 cm, bredde ca. 17 cm og dybde ca. 8 cm.

Datablad er givet ved ref. [2].

Et eksempel på en den ikke-lovbestemte målings-type er vist ved figur 4. Det er en billig og intuitiv nem anvendelig statisk (fuldelektronisk) elmåler.

Det skal understreges, at det ikke-lovbestemte kun går på, at elmåleren ikke falder ind under EU's Måleinstrumentdirektiv (MID). Der gælder stadig flere andre direktiver for EU. Dette er nærmere omtalt i kapitel 3.



Figur 4. Statisk elmåler (fabrikat Sartano, model EMD-3). Denne type elmåler sættes direkte i lysnetkontakten, og belastningen tilsluttes ved kontakten foran på energimåleren. Herefter kan f.eks. effekten og efter et stykke tid også energien aflæses. Der kan også indkodes en kostpris for hver forbrugt energienhed (kWh), således at en pris for anvendelsen af belastningen kan aflæses.

Elmålerens dimensioner er: Højde ca. 12 cm, bredde ca. 6,5 cm og dybde ca. 6,5 cm.

Brugervejledning er givet ved ref. [3].

En bærbar elmåler beregnet til målinger i installationer er vist ved figur 5.



Figur 5. Håndholdt statisk elmåler (fabrikat Hioki, model CM3286). Elmåleren har nederst indgangstilslutninger til at måle spænding og øverst strømtang til at måle strøm. Instrumentet kan måle flere parametre og dette i et større område end den simple elmåler vist ved figur 4, bl.a. spænding, strøm og effekt. Den gule strømtang øverst åbnes ved at påvirke den gule knap til venstre. Den åbne strømtang anbringes rundt om den ledning, i hvilken man vil måle strømmen. Målingen af strømmen foretages, når strømtangen igen er lukket om ledningen.

Elmålerens dimensioner er: Højde ca. 24 cm, bredde ca. 8 cm og dybde ca. 4 cm.

Brugervejledning er givet ved ref. [4].

Virkemåden for og konstruktion af en strømtang er nærmere beskrevet i Metrologi.dk – kompendiet: E3 – Konstruktion og udmåling af højfrekvensstrømtang, ref. [5]. De beskrevne principper kan også anvendes for lysnetfrekvenser på 50 Hz eller 60 Hz.

3 Måleudstyrsdirektivet (MID) 2014/32/EU

I dette kapitel omtales MID, da der i dette kvit og frit kan findes krav til elmålere, herunder krav til nøjagtigheder. De samme krav kan findes i relevante standarder (se kapitel 8), men disse standarder skal købes. Hovedberettigelsen for MID er som tidligere nævnt kravene til legal metrologi, men da dette skrift omhandler elmålere generelt, vil det legale måleaspekt ikke blive omtalt yderligere.

Den danske tekst for MID kan findes ved ref. [6]. Dette er EU-kommissionens hjemmeside "GROWTH – Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs". På denne hjemmeside anvendes drop-down menuen "European Standards" (placeret nederst, midtfor). Her vælges "Measuring instruments (MID)". Derved fremkommer siden for MID. Her klikkes på "Directive 2014/32/EU". Herved ledes man til en side, som bl.a. viser alle de oversatte direktivtekster. Her kan man så under "DA" få den danske PDF-udgave.

I de indledende betragtninger til MID er som nummer (5) anført:

"Korrekte og kontrollerbare måleinstrumenter kan anvendes til en række forskellige måleopgaver. De måleopgaver, der udføres i offentlighedens interesse og af hensyn til den offentlige sundhed, sikkerhed og orden, miljø- og forbrugerbeskyttelse, opkrævning af skatter og afgifter samt fair handelsvilkår, som både direkte og indirekte på mange måder påvirker borgernes dagligdag, kan forudsætte, at der anvendes måleinstrumenter, som er underkastet lovbestemt metrologisk kontrol."

Ovenstående definerer direktivets formål, og i direktivteksten er bl.a. oplistet anvendelsesområde, definitioner, erhvervsdrivendes forpligtigelser, krav til teknisk dokumentation, CE-mærkning og bestemmelser for, hvordan reguleringen overvåges.

De tekniske krav følger i bilagene, og her gælder bilag V (V for romertallet 5) for "Elforbrugsmålere".

Alt efter krav til nøjagtighed opdeles elmålere i tre klasser: A, B og C. Her er C den mest nøjagtige klasse (intuitivt ville man forvente, at A ville beskrive den mest nøjagtige klasse, men det er altså ikke tilfældet).

Opdelingen i klasserne A, B og C er gældende for EU. De betegnelser, som anvendes i andre lande, er:

Klasse 2, som er sammenlignelig med klasse A

Klasse 1, som er sammenlignelig med klasse B

Klasse 0,5, som er sammenlignelig med klasse C.

I det følgende kapitel 5 uddybes kravene til nøjagtighedsklasserne.

4 Bilag V til MID

I dette kapitel opstilles eksempler baseret på databladet for Kamstrup 382M, ref.[2], kombineret med oplysninger fra bilag V til MID. Ved den følgende tabel 1 fra MID's Bilag V defineres de nogle af de fysiske størrelser, som har relevans for fastlæggelsen af elmåleres nøjagtighed.

DEFINITIONER

En elforbrugsmåler er en anordning, som måler den elektriske energi, som er forbrugt i en strømkreds.

I	=	elektrisk strømstyrke gennem måleren
I_n	=	den specificerede referencestrøm, som den transformerdrevne måler er konstrueret til
I_{st}	=	den laveste angivne værdi af I , ved hvilken måleren registrerer elforbruget ved en enhedseffektfaktor (flerfasemålere med symmetrisk belastning)
I_{min}	=	den værdi af I , over hvilken fejlen ligger inden for de maksimalt tilladelige fejl (flerfasemålere med symmetrisk belastning)
I_{tr}	=	den størrelse af I , over hvilken fejlen ligger inden for de mindste maksimalt tilladelige fejl, som svarer til målerens klasseindeks
I_{max}	=	den maksimale værdi af I , hvor fejlen ligger inden for de maksimalt tilladelige fejl
U	=	tilført elektrisk spænding til måleren
U_n	=	den specificerede referencespænding
f	=	frekvensen af den strøm, der tilføres måleren
f_n	=	den specificerede referencefrekvens
PF	=	effektfaktor = $\cos \varphi$ = cosinus af faseforskellen φ mellem I og U .

Tabel 1. Definitioner af fysiske størrelser, som har relevans for fastlæggelsen af elmåleres nøjagtighed. Ved flerfasemålere med symmetrisk belastninger løber der en strøm af samme størrelse og med samme faseforskydningsvinkel i alle faserne (højst op til tre faser). Det betyder f.eks., at hvis der er en nulleder, vil der ikke løbe en strøm i denne.

Følgende kan uddybes for nogle af de størrelser, som indgår i tabel 1:

I_n er defineret i forbindelse med transformerdrevne målere, altså målere, som specifikt anvender strømtransformere ved målingerne. Denne størrelse kan faktisk også gælde for elmålere, som måler strømmen ved direkte forbindelse, men af en uransagelig grund er dette ikke specificeret i MID's Bilag V. I standarden EN 62053-21 er der f.eks. sket en opdeling, hvor I_n bibeholdes for anvendelse med strømtransformere, mens I_b bliver betegnelsen for elmålere med direkte forbindelse.

4.1 Eksempler for Kamstrup 382M

Eksempel 1: Den statiske elmåler Kamstrup 382M, som er vist ved figur 3, er en direkte forbundet elmåler. Det er oplyst i databladet, ref. [2], at shuntprincippet anvendes til strømmålingen. Derved er Kamstrup elmåleren af typen direkte forbindelse, og derfor er betegnelsen I_b anvendt i databladet.

Eksempel 2: Forskellen mellem betydningen af I_{min} og I_{tr} fremgår ikke særlig klart i definitionerne, men ved de relationer, som følger i MID's bilag V, vil det fremgå, at I_{st} er mindre end I_{min} . Det vil også fremgå, at der tillades større fejlvisning, når målestrømmen I befinder sig i intervallet $I_{min} \leq I < I_{tr}$, og der kræves lidt mindre fejlvisning, når $I_{tr} \leq I \leq I_{max}$.

Eksempel 3: Fra databladet for Kamstrup elmåleren er oplyst ca. midt på side 6, at $I_{tr} = 0,25 \text{ A}$, $I_b = 5 \text{ A}$ og $I_{max} = 100 \text{ A}$. Fra MID's Bilag V, tabel 1, kan f.eks. for en Klasse B elmåler ses, at der skal gælde $I_{st} \leq 0,04 \cdot I_{tr} = 0,04 \cdot 0,25 \text{ A} = 0,01 \text{ A} = 10 \text{ mA}$. Dvs. at der for elmåleren kræves, at når strømmen I overstiger 10 mA , så skal elmåleren registrere forbruget. Er strømmen under 10 mA kan elmåleren undlade at registrere forbruget. Ved en forsynings-spænding på 230 V svarer de 10 mA til en effekt på $2,5 \text{ W}$. Holder man sig under dette forbrug, kan man altså måske gøre det gratis!

Eksempel 4: Fra MID's bilag V, tabel 1, kan man også beregne, at for Kamstrup elmåleren skal $I_{min} \leq 0,5 \cdot I_{tr} = 0,5 \cdot 0,25 \text{ A} = 0,125 \text{ A}$. Endvidere skal $I_{max} \geq 50 \cdot I_{tr} = 50 \cdot 0,25 \text{ A} = 12,5 \text{ A}$. Dette krav opfylder Kamstrup åbenbart, idet de oplyser (eksempel 3), at $I_{max} = 100 \text{ A}$.

I MID's bilag V er følgende tabel 2 vist.

	Driftstemperaturer			Driftstemperaturer			Driftstemperaturer			Driftstemperaturer		
	+ 5 °C ... + 30 °C			- 10 °C ... + 5 °C eller + 30 °C ... + 40 °C			- 25 °C ... - 10 °C eller + 40 °C ... + 55 °C			- 40 °C ... - 25 °C eller + 55 °C ... + 70 °C		
Målerklasse	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C

Enkeltfasemåler; flerfasemåler, hvis den arbejder med symmetrisk belastning

$I_{min} \leq I < I_{tr}$	3,5	2	1	5	2,5	1,3	7	3,5	1,7	9	4	2
$I_{tr} \leq I \leq I_{max}$	3,5	2	0,7	4,5	2,5	1	7	3,5	1,3	9	4	1,5

Tabel 2: Den maksimalt tilladelige fejlvisning i procent ved de tilladte driftsbetingelser og de fastlagte strømbelastningsniveauer og driftstemperaturen. Den maksimale usikkerhed bliver $\pm$ den absolutte fejlvisning.

I de maksimalt tilladelige absolutte fejlvisninger i tabel 2 er også inkluderet at forsynings-spændingen U skal kunne variere over intervallet

$$0,9 \cdot U_n \leq U \leq 1,1 \cdot U_n \quad \text{Ligning (1)}$$

(altså 10 % over- og underspænding), samt at forsyningsfrekvensen f skal kunne variere over intervallet

$$0,98 \cdot f_n \leq f \leq 1,02 \cdot f_n \quad \text{Ligning (2)}$$

(altså ± 2 % variation).

Ovenstående er ikke klart oplyst i MID's bilag V, men det fremgår klart af standarderne, som er oplyste i kapitel 8.

Eksempel 5: Fra tabel 2 fremgår også, der i flere tilfælde gælder, at den maksimale absolutte fejlvisning må være større for strømintervallet $I_{min} \leq I < I_{tr}$ end for strømintervallet $I_{tr} \leq I \leq I_{max}$. Dette omtales også i eksempel 2 ovenfor.

Standarderne, som er anførte i kapitel 8, er betydeligt mere detaljerede mht. beskrivelsen af alle de forhold, som fører frem til værdierne i ovenstående tabel 2. Hvis man ønsker at gå dybere ind i dette, må standarderne derfor anskaffes og studeres nærmere.

Eksempel 6: Fra ovenstående tabel 2 kan man altså se, at den maksimalt tilladelige usikkerhed er ± 2 % for en Klasse B elmåler i hele strømområdet I_{min} til I_{max} og i driftstemperaturintervallet $+ 5$ °C til $+ 30$ °C. Kamstrup viser i databladet på side 9, at deres typiske maksimale fejlvisning (MPE) er mindre end $0,1$ % gældende for samme betingelser. Beregningen af MPE er beskrevet i detaljer i standarden EN 50470-3.

4.2 Eksempel for Sartano EMD-3

Databladet for den statiske elmåler fra Sartano (vist ved figur 4), er vist nedenfor som tabel 3.

Strømforsyning	230V AC 50 Hz
Max. belastninger	10 A – 2300 W
Målbart spændingsområde	190-276V AC
Målingsnøjagtighed, spænding	± 1%
Målbart strømområde	0,01 – 10 A
Målingsnøjagtighed, strøm	± 1% eller ±0,01 A
Målbart effektområde	0,2 – 2760 W
Målingsnøjagtighed, effekt	± 1% eller ±0,2 W
Målbart akkumuleret elforbrug	0,0 – 9999,9 kWh
Målbart frekvensområde	45-65 Hz
Tidsnøjagtighed	± 1 minut per måned
Strømforbrug	<0,5 W
Driftstemperatur	-10 °C - +40 °C
Batterier	3 stk. 1,5 V LR44/AG13
Batterilevetid	Ca. 3 mdr. uden netstrøm

Tabel 3: Datablad for den statiske elmåler Sartano EMD-3.

Eksempel 7: Selv om de i tabel 3 viste værdier ikke henviser til nogen klasse og er angivet på en anden måde end de i MID's bilag V viste, opfyldes brugskravene faktisk ($I_{\min}$ til $I_{\max}$, + 5 °C til + 30 °C, $0,9 \cdot U_n \leq U \leq 1,1 \cdot U_n$ og $0,98 \cdot f_n \leq f \leq 1,02 \cdot f_n$) til en Klasse B elmåler.

4.3 Eksempler for Hioki CM3286

I brugervejledningen for Hioki elmåleren, ref. [4] findes på side 83 følgende tabel 4 for usikkerheden (Hioki anvender her betegnelsen "Accuracy"), når der bl.a. måles effekt på enkelt-fase (live og neutral) udstyr. Som for Sartano elmåleren omtales klasse-begrebet ikke.

Single-phase active power/ Balanced 3-phase/4-wire active power ($P/P_{(3P4W)}$)	Range configuration (minimum resolution)			Current range		
				6.000 A	60.00 A	600.0 A
	Voltage range	600.0 V	Single-phase	3.600 kW (0.001 kW)	36.00 kW (0.01 kW)	360.0 kW (0.1 kW)
			3-Phase 4-Wire	10.80 kW (0.01 kW)	108.0 kW (0.1 kW)	1080 kW (1 kW)
	Accuracy (Power factor =1)		Single-phase	±2.0% rdg. ±7 dgt.		
			3-Phase 4-Wire	±2.0% rdg. ±3 dgt.		

Tabel 4: Beregning af fejlvisning fra brugervejledningen side 83 for Hioki CM3286 for effektmåling på enkelt-fase udstyr.

Forudsætningen for at man kan overholde disse usikkerheder er givet ved tabel 5, som findes i brugervejledningen side 82.

Effective measuring range	Current RMS value (I_{RMS})	0.060 A to 600.0 A Value must fall within the current measurement range's guaranteed accuracy range.
	Voltage RMS value (U_{RMS})	80.0 V to 600.0 V
	Frequency	50 Hz/60 Hz

Tabel 5: Forudsætningerne fra brugervejledningen side 82 for overholdelse af usikkerhederne ved tabel 4.

Eksempel 8:

Der måles ved en spænding $U = 230,0$ V, strøm $I = 1,000$ A og frekvens $f = 50$ Hz. Displayet forudsættes at vise en effekt $P = U \cdot I = 230$ W (altså en ren resistiv belastning). Først bemærkes, at forudsætningerne i tabel 5 er overholdte, idet

$$0,060 \text{ A} \leq I \leq 600,0 \text{ A}$$

$$80,0 \text{ V} \leq U \leq 600,0 \text{ V}$$

$$f = 50 \text{ Hz.}$$

Opgivelsen rdg. er forkortelse for "reading", altså den udlæste værdi på displayet (i dette tilfælde 230 W).

Opgivelsen ± 7 dgt. (forkortelse for "digit") skal tolkes som $\pm 7 \cdot$ mindst betydende ciffer i displayets udlæsning (least significant bit, LSB) eller "minimum resolution". I dette tilfælde er LSB opgivet til at være $0,001 \text{ kW} = 1 \text{ W}$.

Fra tabel 4 fås for usikkerheden ΔP , idet der måles i 6,000 A strømområdet:

$$\Delta P = \pm (2,0 \% \text{ af } 230 \text{ W}) \pm (7 \cdot 1 \text{ W})$$

$$= \pm 4,6 \text{ W} \pm 7 \text{ W} = + 11,6 \text{ W til } - 2,4 \text{ W!}$$

De + 11,6 W svarer til en relativ usikkerhed $\Delta P (\%) = + (11,6 \text{ W}/230\text{W}) \cdot 100 \% = 5,0 \%$. Man må nødvendigvis se bort fra værdien – 2,4 W, da en negativ usikkerhed ikke giver mening. For denne målte effekt på 230 W er der altså tale om en betydelig usikkerhed på 5,0 % af den aflæste værdi ("reading"). Det bemærkes, at det største bidrag til usikkerheden stammer fra det faste led " ± 7 dtg.". Denne betydelige usikkerhed understreger, at det er vigtigt at vælge måleinstrumenter, som måler med den ønskede (lille) usikkerhed i de måleområder, hvor man vil anvende dem.

Eksempel 8 slut.

Eksempel 9:

Måles nu $I = 0,052 \text{ A}$ (og stadig $U = 230 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$ og ren resistiv belastning), forudsættes displayet at vise $P = 230 \text{ V} \cdot 0,052 \text{ A} = 12,0 \text{ W}$.

Man kunne her gennemføre beregningerne for usikkerheden $\Delta P = \pm (2,0 \% \text{ af } 12 \text{ W}) \pm (7 \cdot 1 \text{ W})$, men det vil være en fejl. I er nu mindre end de 0,060 A, som er forudsætningen for at udtrykkene ved tabel 4 holder, og man kan ikke fra elmålerens specifikationer afgøre noget om, hvad nøjagtigheden vil være for denne lave værdi af I .

5 Brugssituationer

5.1 Generelt om måling af spænding, strøm og effekt

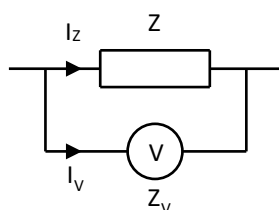
I dette afsnit gennemgås det fundamentale ved at måle spænding, strøm og effekt. Først omtales principforskellene mellem måling af spænding og strøm, dernæst betragtes effektmåling.

5.2 Måling af spænding og strøm

Ved måling af spænding er der tale om en forskel (i spænding) mellem to punkter. Ved måling af strøm er der tale om et flow (af strøm) fra et punkt til et andet. Dette betyder, at måleprincipperne for spænding og strøm er væsentligt forskellige.

Et andet, også meget væsentligt forhold er, at når målingerne foretages, må tilføjelsen af måleinstrumenterne ikke forstyrre de oprindelige spændinger og strømme, som er til stede, når måleinstrumenterne ikke er der. Der vil dog altid være tale om en forstyrrelse, men enten skal denne forstyrrelse være meget mindre end den måle-
unøjagtighed man ønsker at have, eller også skal man beregningsmæssigt kunne kompensere for den forstyrrelse, som måleinstrumentet indfører. Denne sidste beregningsmæssige kompensering kan være særdeles vanskelig, måske umulig at udføre, så langt det nemmeste er at tilstræbe, at måleinstrumenternes forstyrrelse kan negligeres.

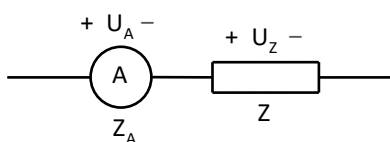
Ved figur 6 er princippet for spændingsmålingen med et voltmeter V vist.



Figur 6. Måling af spænding ved anvendelse af et voltmeter V .

Voltmeterets indflydelse på den oprindelige spænding kan negligeres ved at sørge for, at strømmen I_V gennem voltmeteret er meget mindre end strømmen I_Z , som flyder gennem måleimpedansen Z . Det kan også udtrykkes ved at sige, at voltmeterets indgangsimpedans Z_V skal være meget større end måleimpedansen Z . Tit udtrykkes denne tilstand ved at sige, at måleimpedansen ikke kan "se" voltmeteret.

Ved figur 7 er princippet for strømmålingen med et amperemeter A vist.



Figur 7. Måling af strøm ved anvendelse af et amperemeter A .

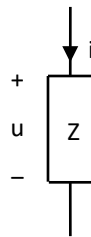
Amperemeterets indflydelse på den oprindelige strøm kan negligeres ved at sørge for at spændingen U_A over amperemeteret er meget mindre end spændingen U_Z over måleimpedansen Z . Det kan også udtrykkes ved at sige, at amperemeterets indre impedans Z_A (indsætningsimpedansen) skal være meget mindre end måleobjektets impedans Z . Tit udtrykkes denne tilstand ved at sige, at måleimpedansen ikke kan "mærke" amperemeteret.

5.3 Beregning af effekt

De to foregående målingsprincipper er begge eksempler på faktiske fysiske målinger, idet en spændingsforskel vil opstå, hvis man flytter elektroner fra et objekt til et andet objekt. Tilsvarende vil denne strøm af elektroner også kunne registreres som en elektrisk strøm, altså noget der fysisk sker.

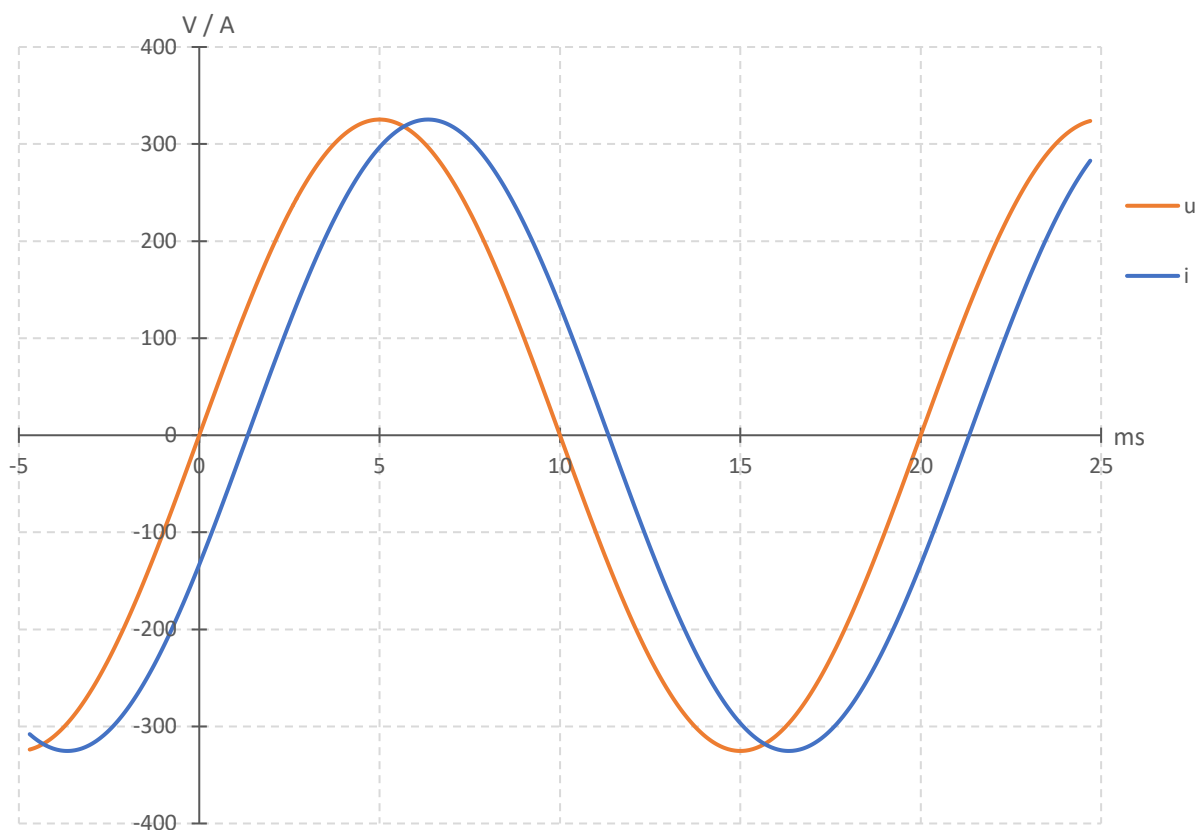
En effektmåling er ikke en tilsvarende fysisk måling, effekten opstår udelukkende ved at man foretager en matematisk beregning, idet man multiplicerer spænding og strøm. Man kan ikke finde et instrument, som kan måle effekten direkte. Man er nødt til at måle de separate størrelser spænding og strøm. Man kan indirekte registrere en effektafsættelse f.eks. i en modstand ved at måle temperaturstigningen af modstanden.

Til brug for effektdefinitionen viser figur 8 det som betegnes forbrugerfortegn for øjebliksværdierne af spændingen u og strømmen i . Z er en generel impedans.



Figur 8. Definitionen af forbrugerfortegn til brug for effektdefinitionen.

Både spænding u og strøm i er størrelser, som varierer med tiden t . Typisk er både u og i sinusformede, dog kan der være en faseforskel φ (det græske bogstav phi, udtales "fi") mellem dem, som vist ved figur 9.



Figur 9. Det sinusformede forløb af spændingen u og strømmen i gennem belastningen Z . Spændingen u har effektivværdien $U = 230$ V. Derved bliver ved sinusform amplitudeværdien $\hat{u} = \sqrt{2} \cdot U = 325$ V. Belastningen er sat til værdien $Z = 1 \Omega$, som given (den meget store) strømamplitude $\hat{i} = 325$ A. Mellem spændingen u og strømmen i er der en faseforskydning $\varphi = 24^\circ$ (positiv faseforskydning). Spændingen u passerer nul gennemgangen fra negativ til positiv før strømmen i , hvilket indikerer, at belastningen Z består af et induktivt element (en spole) optrædende sammen med et tabselement (en modstand). Periodeiden T er 20 ms, svarende til at frekvensen $f = 1/T = 50$ Hz.

Effekten P , som afsættes i Z , kan matematisk defineres som

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \cdot dt \quad \text{Ligning (3)}$$

Størrelsen $\int_0^T u \cdot i \cdot dt$ i ligning (3) er et integrale. Det kan praktisk tolkes som en summation af mange små led, hver af størrelsen $u \cdot i \cdot dt$.

I det følgende afsnit 6.4 gives den praktiske betydning af ligning (3).

Først bemærkes dog, at ligning (3) kan skrives som

$$P \cdot T = E = \int_0^T u \cdot i \cdot dt, \quad \text{Ligning (4),}$$

hvor E bliver den overførte energi til belastningen Z i løbet af tidsintervallet 0 til T .

5.4 Måling og beregning af elektrisk effekt

Periodetiden T opdeles i (mange) mindre tidsintervaller $dt_1, dt_2, dt_3, \dots$. De enkelte dt 'er er sædvanligvis lige lange (men behøver ikke at være det). Der startes lige efter $T = 0$ med dt_1 . I tidsintervallet 0 til dt_1 , måles u_1 og i_1 . Både u_1 og i_1 måles med fortegn. De tre størrelser u_1, i_1 og dt_1 multipliceres. Hermed haves det første (lille)

bidrag e_1 til energimålingen. For det følgende tidsinterval dt_2 udføres samme procedure. Derved fås det næste bidrag til energimålingen e_2 .

e_1 og e_2 adderes, herved fås energimålingen for tidsintervallet 0 til $dt_1 + dt_2$.

Det samme gentages for alle de følgende tidsintervaller $dt_3, dt_4, dt_5, \dots$, indtil summen af alle dt_n 'er bliver lig med periodetiden T .

Ligning (4) er et analytisk udtryk, som kan løses ved at opskrive ligninger og evt. reducere disse. Den computer-mæssige løsning af ligning (4) kaldes numerisk løsning, og ovenstående forklaring er et eksempel på en numerisk metode til løsning af ligning (3).

Enheder for forbrugt elektrisk energi

I det internationale enhedssystem (SI-systemet, med SI-akronymet efter det franske "Système International d'Unités") er enheden for energi Joule [J].

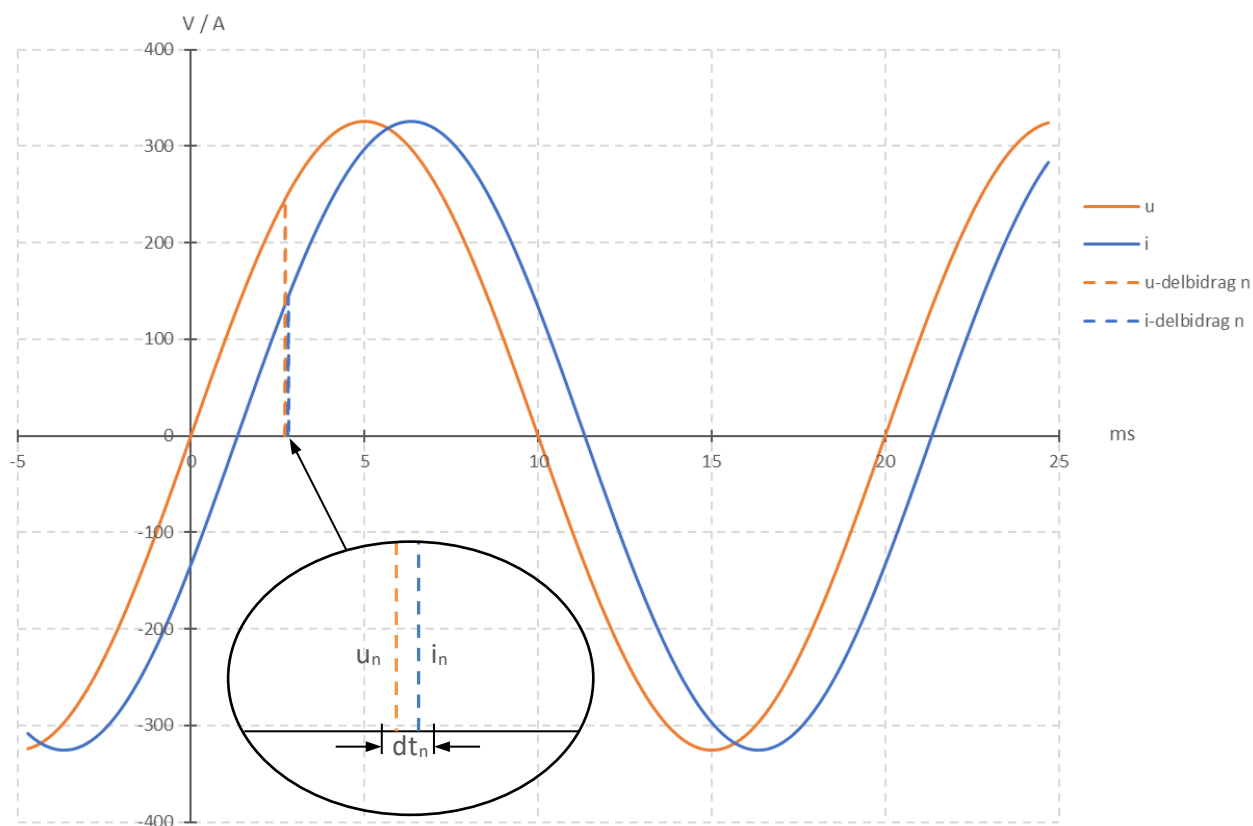
Joule-enheden bruges dog næsten aldrig, når der er tale om elektrisk energi. Her anvendes enheden kWh (kW·time).

Omsætningen mellem kWh og J findes ved

$$\text{kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{s} =$$

$$3,6 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot \text{s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Ved figur 10 er princippet vist for, hvorledes det ovenfor beskrevne delbidrag, benævnt n , opstår ved den numeriske løsning.



Figur 10. Et enkelt numerisk delbidrag $e_n = u_n \cdot i_n \cdot dt_n$ til den totale energi $E = e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_n + \dots$.

Summen af alle bidragene $e_1, e_2, e_3, \dots$ giver nu den samlede energitransport E gældende for tidsintervallet 0 til T , altså for en hel periodetid. Dette er en numerisk løsning til ligning (4).

Den numeriske løsning af ligning (3) opnås ved at dividere E med T , og nu haves effekten P . P er altså middelværdien af effekten hen over periodetiden T .

De enkelte "tidsbidder" dt skal være så små, at både u og i kan antages at være konstante i løbet af denne "tidsbid". Det er selvfølgelig formelt ikke korrekt, da både u og i varierer med tiden, men man skal blot sørge for at dt er så kort, at variationen af u og i i løbet af dt er så lille, at den krævede nøjagtighed opnås. Det kunne f.eks. være tilstrækkeligt, at dt er ca. en $1/1000$ af T .

Hele den ovenfor beskrevne procedure udføres elektronisk, og med de processorhastigheder man råder over for nuværende, kan man nemt opnå, at man kan gennemføre de flere tusinde beregninger i løbet af en periodetid på 20 ms (frekvens = 50 Hz), som kræves for at opnå den ønskede nøjagtighed.

Ovenstående kræver en del computerkraft, men en mere simpel procedure for effektberegningen kan opnås ved at udføre trigonometriske beregninger på de sinusformede udtryk for spændingen u og strømmen i .

5.5 Effektberegning baseret på sinusform

For spændingen u er det sinusformede udtryk

$$u = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t), \quad \text{Ligning (5)}$$

hvor U er spændingens effektivværdi, f er frekvensen og t er tiden.

For strømmen i fås tilsvarende

$$i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - \varphi), \quad \text{Ligning (6)}$$

hvor I tilsvarende er strømmens effektivværdi, f er frekvensen og t er tiden. φ er faseforskydningen mellem spændingen u og strømmen i .

Indsættes ligning (5) og ligning (6) i ligning (3), og de tilhørende trigonometriske og middelværdimæssige beregninger gennemføres, fås ligning (7), som udtrykker effekten P .

De trigonometriske og middelværdimæssige beregninger er gennemførlige, men plads- og tidskrævende. De er rent matematiske øvelser, og vil derfor ikke blive behandlet nærmere her.

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad \text{Ligning (7)}$$

Da $\cos \varphi = \cos(-\varphi)$ bliver ligning (7) positiv ligegyldigt om faseforskydningen er positiv (belastningen består både af en induktiv og resistiv del) eller negativ (belastningen består både af en kapacitiv og resistiv del). Den positive størrelse gælder dog kun, hvis φ er numerisk mindre end 90° .

Power-faktor PF

Ofte omtales power-faktoren (PF) for en belastning.

PF er en anden, men betydningsmæssigt den samme, betegnelse for $\cos \varphi$ i ligning (7).

Udtrykket givet ved ligning (7) for effekten P kræver, at både spændingen u og strømmen i er perfekt sinusformede. Dette er sjældent tilfældet for selv gode og stabile forsyningsnet, idet den meget store anvendelse af Switch Mode strømforsyninger, som gør sig gældende i nuværende installationer, forvrænger forsyningsnettet. Dette emne behandles nærmere i afsnit 6.8.

Hvis udtrykket givet ved ligning (7) anvendes til at beregne effekten P , behøves en elmåler ikke at foretage de mange beregninger, som er beskrevet i afsnit 6.4. Hvis ligning (7) anvendes, behøves kun måling af effektivvær-

dierne U og I og faseforskydningen φ at udføres. Faseforskydningen kan f.eks. foretages ved at bestemme periodetiden T og tiden t_φ , som forløber mellem nulgennemgang for spændingen u og den tilsvarende for strømmen i .

Hvis faseforskydningen φ ønskes i grader ($^\circ$), kan dette udtrykkes ved ligning (8).

$$\varphi = \frac{t_\varphi}{T} \cdot 360^\circ \quad \text{Ligning (8)}$$

En elmåler, som udnytter ligning (7) og ligning (8) kan derved udføres elektronisk mere simpel.

Som belyst i afsnit 6.8 kan dette dog, ved utilstrækkelige elektroniske løsninger, give store udlæsningsfejl.

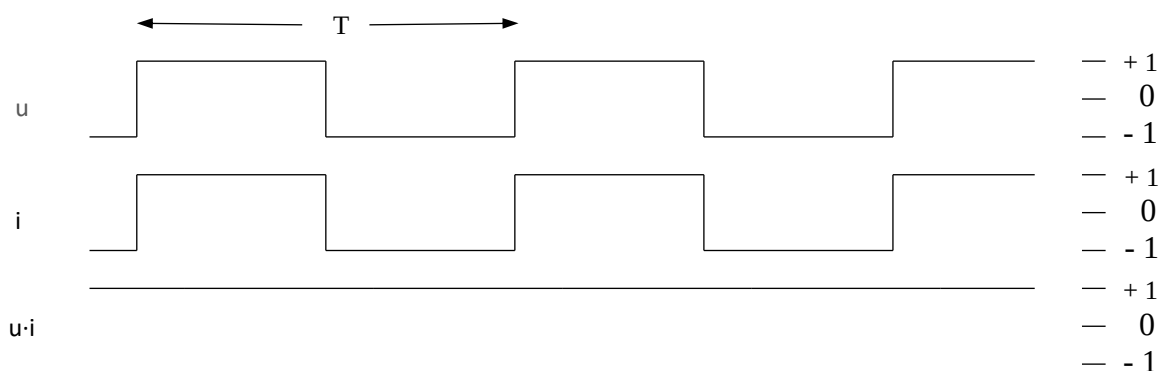
5.6 Simpel grafisk effektberegning.

I dette afsnit vises en simpel grafisk effektberegning, når det tidsmæssige forløb af spændingen u og strømmen i er forsimplet meget. Denne grafiske løsning viser dog, til trods for forsimplingen, vigtige observationer.

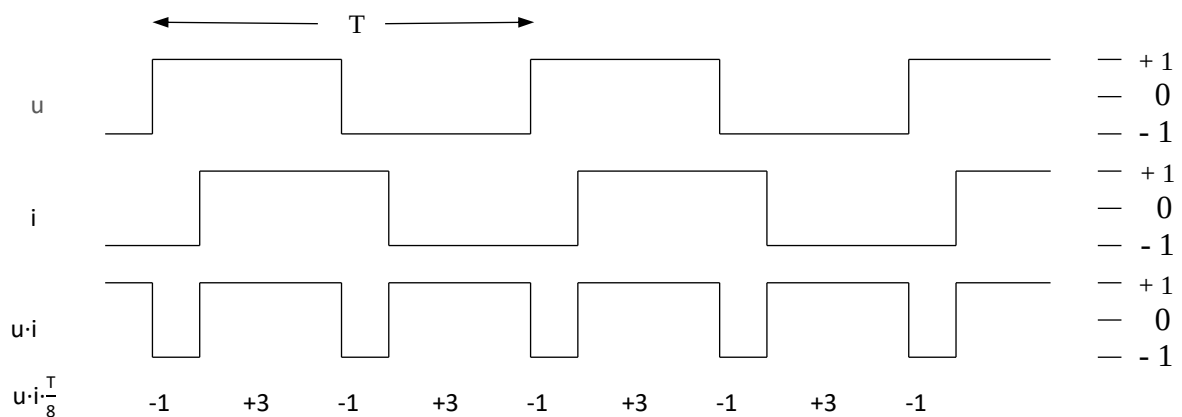
For både spænding u og strøm i antages nu, at de tidsmæssigt er firkantformede som vist ved figurerne 11, 12, 13 og 14. Forskellen mellem figurerne viser betydningen af faseforskellen mellem spændingen u og strømmen i .

For at forenkle det grafiske billede har både spændingen u og strømmen i amplitudeværdien 1.

Figur 11 viser den grafiske beregning, når faseforskellen mellem spændingen u og strømmen i er 0° .

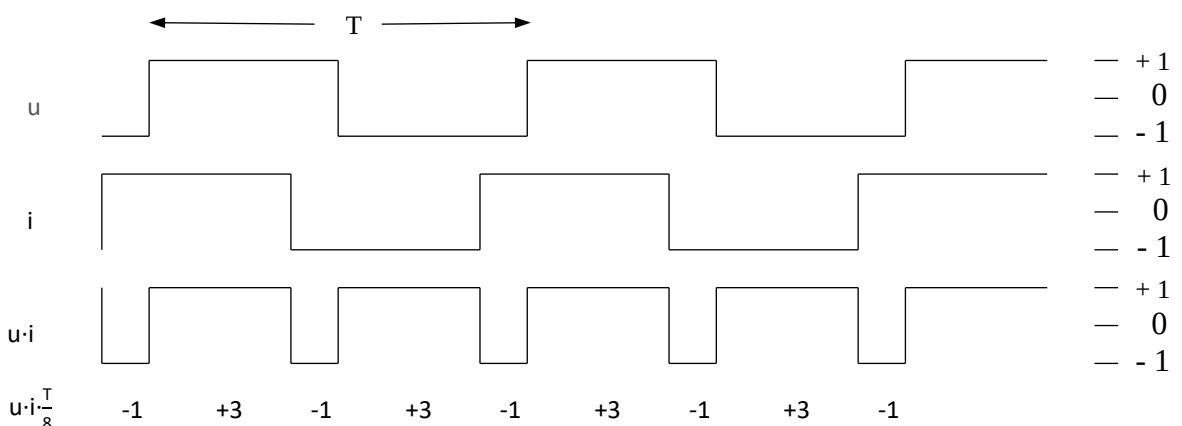


Figur 11. Grafisk beregning af effekten P for firkantformet spænding u og strøm i , hver med amplitudeværdien 1. Faseforskellen mellem u og i er 0° (ren resistiv belastning). Det ses, at effekten P under disse forhold altid er $P = u \cdot i = 1$.



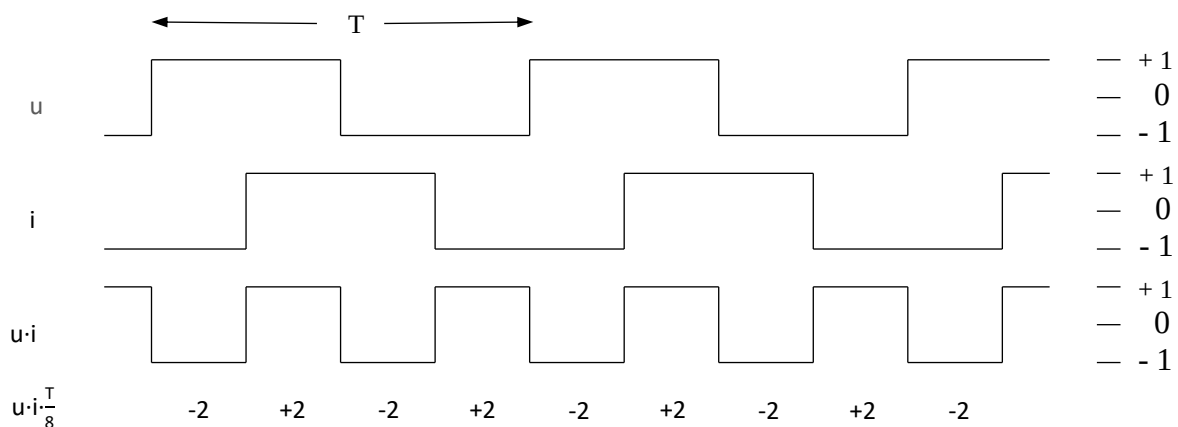
Figur 12. Grafisk beregning af effekten P for firkantformet spænding u og strøm i , hver med amplitudeværdien 1. Faseforskellen mellem u og i er $+45^\circ$ (belastningen består både af en induktiv og resistiv del). En faseforskydning på 45° svarer til en tidsmæssig forskydning på $T/8$, hvor T er periodetiden. Tallene med fortegn i nederste linje angiver, hvor mange energibidrag af størrelsen $u \cdot i \cdot T/8$, som indgår i den totale energi E over en periodetid T .

For figur 12 bliver ligning (4): $E = u \cdot i \cdot T/8 \cdot (-1 + 3 - 1 + 3) = u \cdot i \cdot T/2$, og dermed fås effekten P fra ligning (3): $P = 1/T \cdot E = \frac{1}{2} \cdot u \cdot i = \frac{1}{2}$.



Figur 13. Grafisk beregning af effekten P for firkantformet spænding u og strøm i , hver med amplitudeværdien 1. Faseforskellen mellem u og i er -45° (belastningen består både af en kapacitiv og resistiv del). En faseforskydning på 45° svarer til en tidsmæssig forskydning på $T/8$, hvor T er periodetiden. Tallene med fortegn i nederste linje angiver, hvor mange energibidrag af størrelsen $u \cdot i \cdot T/8$, som indgår i den totale energi E over en periodetid T .

For figur 13 bliver ligning (4): $E = u \cdot i \cdot T/8 \cdot (+3 - 1 + 3 - 1) = u \cdot i \cdot T/2$, og dermed fås effekten P fra ligning (3): $P = 1/T \cdot E = \frac{1}{2} \cdot u \cdot i = \frac{1}{2}$.



Figur 14. Grafisk beregning af effekten P for firkantformet spænding u og strøm i , hver med amplitudeværdien 1. Faseforskellen mellem u og i er $+90^\circ$ (belastningen er rent induktiv). En faseforskydning på 45° svarer til en tidsmæssig forskydning på $T/8$, hvor T er periodetiden. Tallene med fortegn i nederste linje angiver, hvor mange energibidrag af størrelsen $u \cdot i \cdot T/8$, som indgår i den totale energi E over en periodetid T .

For figur 14 bliver ligning (4): $E = u \cdot i \cdot T/8 \cdot (-2 + 2 - 2 + 2) = 0$, og dermed fås effekten P fra ligning (3): $P = 0$

For figurerne 11 – 14 kan følgende fremdrages:

- Den grafiske den grafiske effektberegning viser, at effekten er uafhængig af om faseforskydningen er $+45^\circ$ eller -45° . I afsnit 6.5 indgår $\cos \varphi$, som også giver samme resultat.
- I figurerne 12 – 14 viser den grafiske effektberegning, at der ved multiplikationen $u \cdot i$ opstår et signal, som gentager sig selv to gange i løbet af periodetiden T . Der opstår altså et signal med den dobbelte frekvens. Hvis man som beskrevet i afsnit 6.5 indsætter ligning (5) og ligning (6) i ligning (3), og udfører de tilhørende trigonometriske og middelværdimæssige beregninger, vil man også undervejs i beregningerne observere, at frekvensen $2 \cdot f$ fremkommer i udtrykket for effekten P .

Selv om ovenstående grafiske effektberegninger slet ikke er tilstrækkelige beviser, så kan man nok indse, at den grafiske fremgangsmåde på simpel og effektiv vis viser ting, som man så kan lede efter og udforske på mere formel korrekt vis. Hvor den analytiske beregningsmæssige metode er den formelt korrekte, bevirker den også tit, at man kan "drukne" i information, og derved kan overse ting. Her viser en grafisk metode sin overlegenhed mht. at lede én på sporet af væsentlige detaljer.

5.7 Betragtninger gældende for dataopsamling

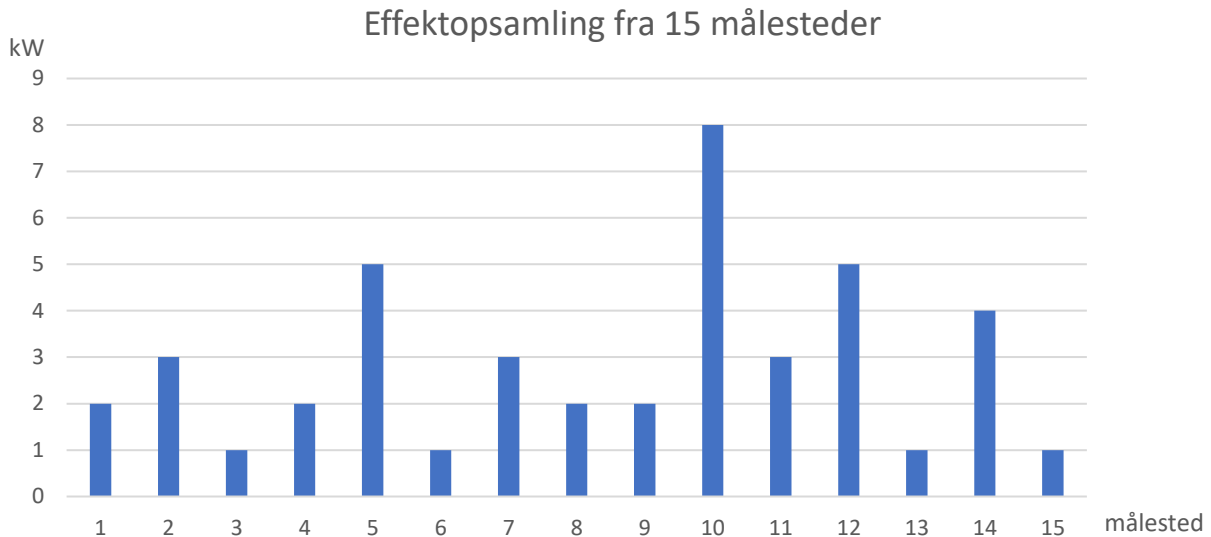
I de foregående afsnit har vi overvejende beskæftiget os med effekten P . Økonomisk er det dog energien E , som har betydning, idet det er den forbrugte energi, som man skal betale for. I elektrisk sammenhæng er det derfor antal kWh timer, som man skal betale for. Den engelske betegnelse kWh (for kW-hours) benyttes også tit i dansk sammenhæng. Som nævnt i afsnit 6.5 og vist grafisk i afsnit 6.6 indebærer effekt- og energiberegningerne at en middelværdiberegning skal udføres for at finde effekten P eller energien E . Ved middelværdiberegningerne "udfiltreres" de led i effekt/energi-beregningerne, som skyldes, at der er energi, som "skvulper" frem og tilbage i form af positive og negative bidrag til energien i løbet af en periodetid T . I et instrument, som direkte viser forbrugte kWh er denne midling T foretaget.

Man kan sagtens forestille sig tilfælde, hvor midlingen ikke foretages pga. en ukorrekt måde at opsamle data på. Følgende eksempel belyser dette.

Eksempel 10:

En virksomhed ønsker med god rettidig omhu at effektivisere/minimere sit elektriske energiforbrug.

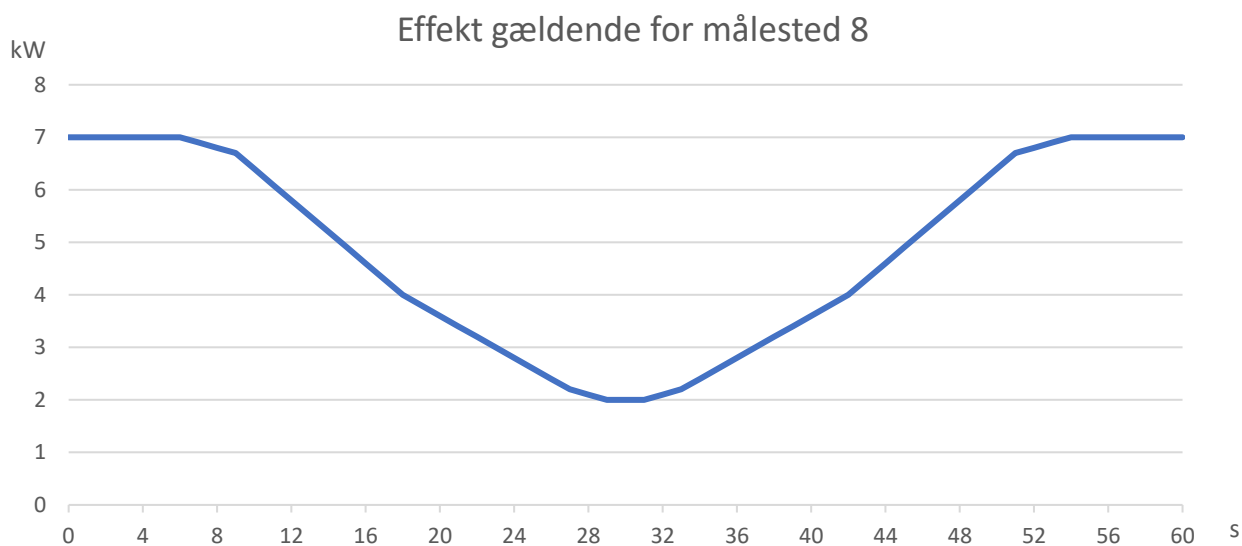
Her er valgt at opsætte 15 elektriske effektmålere relevante steder. Disse 15 effektmålere melder efter tur effekten ind til dataopsamling, da alle målerne er forbundet i et netværk. Gennemløbstiden for de 15 målesteder er ét minut, hvorefter cyklussen starter forfra. For én cyklus fås grafisk følgende opsamling, figur 15.



Figur 15. Effektmåling fra 15 målesteder. De 15 målesteder gennemløbes i løbet af ét minut, hvorefter cyklussen gentages. Hvert målested betragtes således i 4 s, og der registreres én effektværdi for dette interval, f.eks. tidsmæssigt midt i intervallet.

Summen af effekterne fra de 15 målesteder repræsenterer den totale effekt, som er forbrugt i løbet af ét minut. Sammentælles alle 15 målesteder fås totaleffekten $P = 43 \text{ kW}$ for det forløbne minut. For energien E fås således $E = 43 \text{ kW} \cdot \text{minut} = 2580 \text{ kWh}$. Man kan således på simpel måde finde et udtryk for den forbrugte elektriske energi i kWh ved at summere effekten fra alle 15 målesteder og multiplicere med 60.

Betragtes f.eks. målested 8 er værdien herfra $P_8 = 2 \text{ kW}$. Den næste aflæsning for målested 8 vil ske efter 60 s. Man kan nemt forestille sig, at effekten for målested 8 varierer i løbet af disse 60 s. Effekten for målested 8 kunne f.eks. se ud som ved figur 16.



Figur 16. Effektmåling i løbet af ét minut fra målested 8. Effektværdien på 2 kW til tiden 30 s er her det valgte eksempel på den værdi, som det netopkoblede målesystem med 15 målesteder lige præcis registrerer som gældende for målested 8.

Her fremgår klart, at man ikke vil få et retvisende billede af energiforbruget, idet det her uheldigvis er sådan, at det netopkoblede målesystem registrerer effekten gældende for målested 8, netop hvor målestedets effekt er minimum.

Eksempel 10 slut.

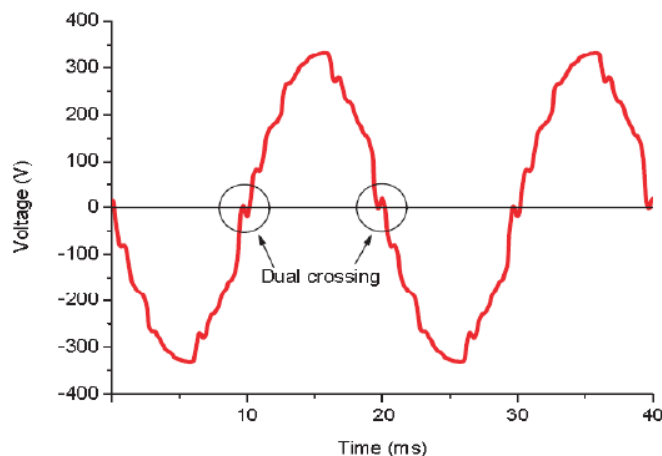
Ovenstående eksempel 10 er konstrueret, men dets formål er at vise, at det er af afgørende betydning, at man kender både, hvorledes anlægget, man opsamler data fra, opfører sig og at man véd, hvorledes det opbyggede målesystem faktisk opsamler måleværdier og behandler disse.

Hvis man negligerer at sætte sig ind i disse detaljer, risikerer man nemt at kunne drage helt misvisende konklusioner.

5.8 Elmålerundersøgelse fra Holland

Ved ref. [7] er fremlagt nogle, næsten skræmmende, eksempler på elmålere som, pga. elektromagnetiske forstyrrelser, udviser store afvigelser i forbrugt energi. Det skal bemærkes, at disse elmålere formodes at overholde de relevante standarder (se f.eks. de opførte standarder i kapitel 8).

I ref. [7] omtales først test af fire statiske elmålere, af type lignende Sartano elmåleren fra figur 4. **Det skal understreges, at der findes et hav af denne type elmåler på markedet, så om Sartano elmåleren faktisk er en af de fire typer, kan der ikke siges noget om.** Hver af de fire elmålere udsættes for en lysnetspænding, som er en nøjagtig gengivelse af en faktisk målt lysnetspænding forekommende i en moderne Hollandsk bebyggelse. Spændingens kurveform er givet ved figur 17.



Figur 17. Kurveformen for lysnetsspændingen målt i en moderne Hollandsk bebyggelse. Bemærk specielt forstyrrelserne i nulgennemgangen betegnet som "Dual crossing".

Elmålerne måler på en belastning bestående af en parallelkobling af 30 lavenergylsstofrør (Compact Fluorescent Lamp, CFL) og 20 LED lavenergipærer.

En kalibreret elmåler (type og fabrikat er dog ikke oplyst) viser et effektforbrug på 360 W.

De fire elmåleres visning er vist ved figur 18.



Figur 18. Displayudvisningen fra hver af de fire elmålere. Effekten bestemt af den kalibrerede elmåler er 360 W.

Det ses at

- Den ene elmåler (øverst til venstre) viser en effekt på 361,35 W, altså god overensstemmelse med den kalibrerede elmåler.
- Den anden elmåler (øverst til højre) viser en effekt på 349,3 W, altså 3 % mindre end den kalibrerede elmåler.
- Den tredje elmåler (nederst til venstre) viser 0,0 W! Altså en særdeles stor afvigelse!
- Og den fjerde elmåler (nederst til højre) viser 8 W, og en frekvensudlæsning på 107 Hz (de 107 Hz oplyses i teksten til ref. [7], umiddelbart kunne man ud fra billedet tro det også kunne være 187 Hz). Igen som for måler tre, en særdeles stor afvigelse!

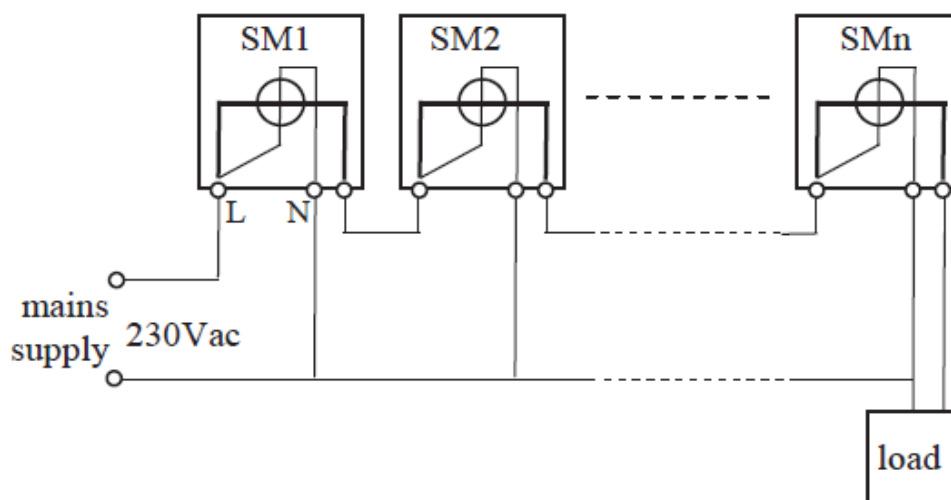
I ref. [7] teksten anføres, at dette understøtter, at effektmålingen baserer sig på en fasebestemmelse ud fra måling af nulgennemgangene. I ovenstående afsnit 6.5 beskrives anvendelse af nulgennemgangene til at fastlægge effektfaktoren $\cos\phi$.

Man kan tydeligt forestille sig, at hvis der optræder elektriske forstyrrelser lige netop i nulgennemgangene (som vist ved figur 17) kan dette fuldstændig forrykke måleresultatet. Hvis denne forstyrrelse er årsagen til de særdeles kraftigt afvigende målinger, så er der ikke foretaget den nødvendige elektroniske filtrering, som skulle fjerne de forstyrrelser, som åbenbart har en meget højere frekvens end lysnetfrekvensen på 50 Hz.

Det skal nævnes, at ingen af de foreskrevne standarder (oplistede i kapitel 8) omhandler test med forstyrrende signaler, af den type, som kan ses optræde på figur 17. En forudseende elmålerfabrikant vil dog selvfølgelig anvende testsignaler lignende dette forstyrrende signal. Der eksisterer teststandarder, som efterligner det forstyrrende signal fra figur 17, men det er ikke foreskrevet f.eks. som grundlag for at opfylde MID. Dette illustrerer til fulde, at en forudseende og ansvarlig elmålerfabrikant vil ikke kun nøjes med at teste efter de absolut nødvendige standarder. En sådan fabrikant vil udføre en risikovurdering, og derfra fastlægge og udføre test efter alle relevante standarder.

Der er flere undersøgelser beskrevet i ref. [7]. Ovenstående omhandler simple enfasede elmålere, hvorimod de følgende er trefasede elmålere, som også overholder kravene i MID. Eksperimenterne på målerne er dog kun udført enfasede. Varigheden af hvert eksperiment er opgivet til at være mindst en uge.

Ni elmålere er testede i følgende opstilling, figur 19.



Figur 19. Testopstilling med 10 elmålere, alle MID godkendte, forbundet i serie. De 9 af målerne er statiske (fuldelektroniske) og en er en elektromekanisk måler af Ferraris typen. Den elektromekaniske måler bruges som reference. Forsyningen (mains supply) er laboratoriets lysnet uden nogen form for filtrering. Belastningen (load) varierer som beskrevet ved tabel 6.

For hver af belastningerne aflæses energiforbruget på de statiske målere E_{SM} , og den procentuelle afvigelse (deviation%) beregnes ud fra den elektromekaniske målers visning $E_{ferraris}$ ved ligning 9.

$$deviation_{\%} = \frac{E_{SM} - E_{ferraris}}{E_{ferraris}} 100\% \quad \text{Ligning (9).}$$

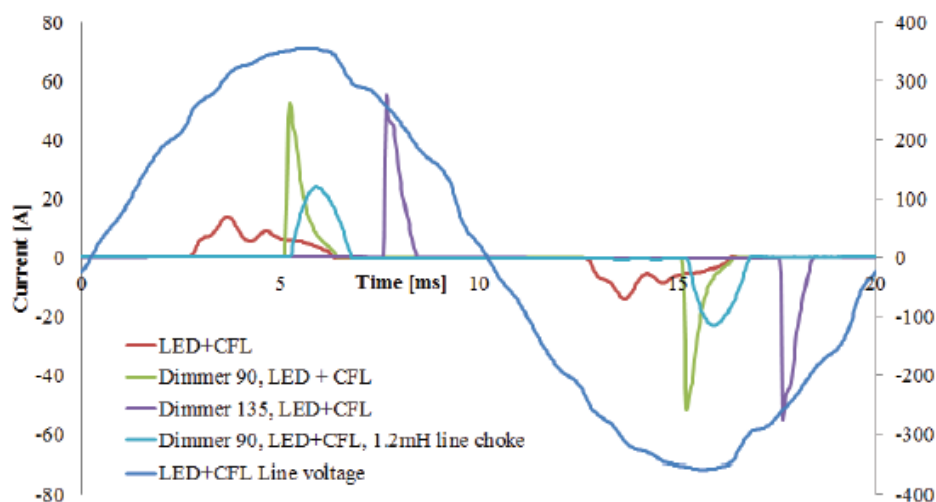
Tabel 6 viser de forskellige belastninger med tilhørende fejlvisning på effektmålingen dækkende alle måleres udlæsning.

Resistive load 1800 W	<3%
20 LED + 30 CFL	<3%
20 LED + 30 CFL + C_x	<3%
Dimmer 90°, LED+CFL	-28%, +64%
Dimmer 90°, LED+CFL + line choke	<3%
Dimmer 135°, LED+CFL	-32%, +575%
Dimmer 135°, LED+CFL repeated	-32%, +582%

Tabel 6. Kolonnen til venstre viser hvad belastningen (load) i figur 19 består af. Kolonnen til højre viser de konstaterede maksimale fejlvisninger for målerne som de tilhørende belastninger bevirkede. Afvigelse er beregnet efter ligning (9). Det ses, at de konstaterede fejlvisninger for nogle målere kan blive meget store, så snart en elektronisk regulator (dimmer) indføres. Gradangivelserne efter "dimmer" angiver hvornår regulatoren fase-mæssigt lader tænde for strømmen. Dette belyses ved figur 20.

Det bemærkes også, at indførelsen af en spole (line choke) med selvinduktionen $L = 1,2 \text{ mH}$ begrænser afvigelse meget.

Figur 20 viser strømforløbene og spændingen over en hel periode for nogle af belastningerne.



Figur 20. Forløb af lysnetspændingen og strømmene gennem forskellige belastninger i løbet af en hel periode. For LED+CFL (uden regulator) ses at strømoptaget først starter et stykke efter spændingen (line voltage) har passeret gennem 0 fra negativ til positiv værdi. Denne betegnes som startfasen 0°.

Med både Dimmer 90, LED+CFL og Dimmer 135, LED+CFL belastningerne ses de kraftige strømhopp, som finder sted til henholdsvis faserne 90° og 135°. Det er disse kraftige strømhopp, som forstyrrer elektronikken i elmålerne så meget, at de meget store afvigelser konstateres i tabel 6.

Det ses også både ved figur 20 og tabel 6, at indsættelsen af spolen med selvinduktionen 1,2 mH (1,2 mH line choke) begrænser strømhoppet så meget, at afvigelse bliver på niveau med afvigelse som for den rene resistive belastning.

En meget interessant iagttagelse var, at selv for eksperimentet med belastningen Dimmer 135, LED+CFL udviste nogle typer målere meget lille afvigelse (i størrelsen af nogle få procent). Det kunne også konstateres, at de målere, som målte for lidt, konsekvent gjorde det for alle belastninger (i større eller mindre grad afhængigt af belastningen). Ligeledes for de målere, som målte alt for meget, konsekvent gjorde det for alle belastninger.

Ved at åbne målerne kunne strømtransducerprincippet kædes sammen med, om målerne målte for lidt, målte tilstrækkeligt præcist eller målte alt for meget. Hertil må man dog konkludere, at der er ikke tale om, at ét strøm-

transducerprincip er dårligere egnet end et andet. Man må i stedet konkludere, at den elektroniske signalbehandling, som efterfølger strømtransducere ikke har været udført tilstrækkelig immun overfor de konstaterede strømhopp som optræder f.eks. i forbindelse med brug af elektronisk regulering.

Da den Hollandske undersøgelse, ref. [7], kom frem i 2016, blev der bl.a. fremført, at belastningen, bestående af de 30 lavenergilystofrør og 20 LED lavenergipærer, var for ekstrem. Hvis man tæller efter i nutidige beboelser, vil man formodentlig dog komme tæt på eller endog komme over dette antal, specielt hvad angår antallet af LED pærer. Forstyrrelsesmæssigt er der ingen væsentlig forskel på bidragene fra de to typer lavenergipærer, LED eller CFL. Som figur 20 viser, repræsenterer begge typer belastninger af lysnettet, som slet ikke ligner en rent resistiv og jævn belastning hen over lysnetperioden på 20 ms, svarende til frekvensen 50 Hz. Anvendelsen af elektroniske regulatorer er også ofte forekommende i nutidige beboelser. Virkningsprincippet i form af faseåbning af strømmen for disse regulatorer, kan give store problemer for visse typer af statiske elmålere med at måle korrekt.

Den type elmåler, som er mest robust over for elektriske forstyrrelser, er den velkendte elektromekaniske elmåler baseret på Ferraris opdagelse (se ovenstående kapitel 2). Her udnyttes, at det elektromekaniske system er langsomt reagerende. Det bevirker, at spændingsmæssige forstyrrelser (som dem vist ved figur 17) og store strømhopp (som dem vist ved figur 20) ikke vil påvirke effektmålingerne. Til gengæld er den elektromekaniske elmåler ikke robust overfor mekaniske påvirkninger som slag, mekaniske stød og vibrationer.

6 Afslutning

I det foregående er mange aspekter ved elektrisk effekt- og energimåling gennemgået.

Man vil i de fleste tilfælde kunne opnå tilstrækkelig målenøjagtighed ved selve målingerne.

Dér, hvor man vil kunne få endog store problemer med at få tingene afstemningsmæssigt til at høre sammen, er f.eks. ved manglende tidsmæssig sammenhæng ved dataopsamling som illustreret i afsnit 6, 7, og ved at forstyrrelser i forsyningsspændingen eller -strømmen kan bevirke store afvigelser i måleresultaterne, som vist i afsnit 6.8.

Man kan kun imødegå problemerne i forbindelse med dataopsamling ved f.eks. systematisk og grundigt at gennemgå de tidsmæssige sammenhænge i hele systemet. Det kræver, at man skal skaffe sig et godt kendskab til hele systemet, man skal måle på. Det siger sig selv, at bare denne del af opgaven kan være voldsomt tidskrævende. Ikke desto mindre kan dette være påkrævet for at kunne opnå et pålideligt og reproducerbart måltal for energiforbruget.

For at få et elektrisk effekt- og energimålesystem, som er robust over for elektriske forstyrrelser, må man ty til anvendelse af den elektromekaniske elmåler som referencemåler. Selve dens måleprincip bevirker, at den er "født" særdeles robust overfor de elektriske forstyrrelser, som moderne elektronik påfører lysnettet. Til gengæld må man så beskytte den elektromekaniske elmåler rimeligt mod mekaniske og klimatiske påvirkninger. Det siger sig selv, at f.eks. de fine mekaniske lejer i denne målertype er meget mere sårbare over for mekaniske og klimatiske påvirkninger end de tilsvarende elektroniske løsninger.

Igen gælder det (som ved alt i livet), at jo mere viden, man har om et system, jo bedre kan man gennemskue dets opførsel. Derved kan man mere målrettet modvirke de u hensigtsmæssige ting, som også altid vil være til stede.

7 Referencer og standarder

7.1 Referencer

- [1] The history of the electricity meter <https://www.metering.com/top-stories/the-history-of-the-electricity-meter/>
- [2] Datablad for Kamstrup 382M elmåler: På Kamstrups hjemmeside <https://www.kamstrup.com/da-dk> , vælg: (placeret øverst) "Teknisk dokumentation" – (til venstre) "Elektricitet" - "1. Meters" - "Kamstrup 382M" – "Datablad" – (vælg sprog) "DK" eller "GB".
- [3] Brugervejledning for Sartano EMD-3 elmåler, Harald Nyborg nr.: 1054 https://www.harald-nyborg.dk/media/attachments/1054_309069.pdf
- [4] Instruction Manual HIOKI CM3286 <https://www.hioki.com/file/cmw/hdInstructionManual/93581/pdf/?action=browser>
- [5] Metrologi.dk download <https://metrologi.dk/Download>
- [6] EU-kommissionens hjemmeside "GROWTH – Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs" <http://ec.europa.eu/growth/>
- [7] Static Energy Meter Errors Caused by Conducted Electromagnetic Interference, 2016 IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine – Volume 5 – Quarter 4 <https://ieeexplore.ieee.org/document/7866234/> (betaling kræves for at tilgå artiklen).
- [8] FORCE Technology <https://forcetechnology.com/da/ydelser/produktgodkendelse-vejledning>

7.2 Udvalgte standarder for elmålere

Alle følgende standarder er specialiserede i deres dækningsområde, og vil som helhed formodentlig kun have interesse for fabrikanten af elmålere, testlaboratorier, elforsyningsselskaber og andre med behov for denne specialviden. I ovenstående kompendie er der derfor kun udvalgt relevante emner fra standarderne. Det skal endelig bemærkes, at der kræves betaling, hvis man vil erhverve standarderne. I givet fald kan de f.eks. købes hos Dansk Standard <https://webshop.ds.dk/da-dk/forside>.

EN 50470-1:2006

EN 50470-2:2006

EN 50470-3:2006

EN 62052-11:2003 (identisk med IEC 62052-11:2003)

EN 62053-11:2003 (identisk med IEC 62053-11:2003)

EN 62053-21:2003 (identisk med IEC 62053-21:2003)

EN 62053-22:2003 (identisk med IEC 62053-22:2003)

EN 62053-23:2003 (identisk med IEC 62053-23:2003)

8 Generelt vedr. dette undervisningsmateriale, læringsudbytte og forudsætninger.

8.1 Om dette undervisningselement (UE)

Strukturen af dette UE er således, at først bringes illustrationer og omtaler af forskellige elmålere. Dernæst bringes i rækkefølge: Omtale af det lovmæssige grundlag, - eksempler på beregninger af nøjagtigheder ud fra de respektive datablade, - generelle og specielle brugssituationer for elmålere for at opnå de bedste måleresultater og afslutningsvis opstilling af referencer og standarder.

UE'et prøver at dække bredt hvad angår elmålerbrug. Læserne kan derfor forhåbentlig finde relevante og interessante emner, og "plukke" det, som findes brugbart.

Matematiske udredninger er undgået, i stedet er der f.eks. benyttet grafiske fremstillinger (såsom afsnit 6.6).

De sikkerhedsmæssige aspekter vedrørende effektmåling på lysnetsspændinger, omtales ikke. Det skal dog kraftigt understreges, at der skal tages hensyn til disse aspekter.

8.2 Læringsudbytte

Efter tilegnelse af det foregående materiale vil læseren have opnået følgende læringsudbytte:

- Kendskab til forskellige typer af elmålere.
- Introduktion til det lovmæssige grundlag for elmålere beregnet til afregning i EU.
- Beregning af forskellige elmåleres nøjagtigheder ud fra tilhørende datablade. Herunder belyses også de forskellige måder at få præsenteret nøjagtighedsdata.
- Kendskab til generel praktisk måling af spænding, strøm og effekt for at opnå bedste målenøjagtighed.
- Kendskab til metoder, hvormed elmålere kan beregne effekt- og energiforbrug.
- Introduktion til dataopsamling i forbindelse med effekt- og energimålinger i form af et opstillet eksempel. Eksemplet belyser hvorledes målefejl kan opstå ved mangelfuldt kendskab til virkemåden af det system, man dataopsamler på.
- Introduktion til, hvad et konkret sæt af eksperimenter viser mht. målefejl af effekten.

8.3 Forudsætninger

Det forudsættes, at

- Læseren er bekendt med begreberne elektrisk vekselspænding og -strøm, herunder effektivværdi.
- Læseren er bekendt med fundamentale kredsløbsteoretiske begreber såsom resistiv og reaktiv belastning og de tilhørende faseforhold for spænding og strøm.

Appendiks A: Omtale af andre CE-mærkningsdirektiver ud over MID.

I dette appendiks gennemgås i hovedtræk det som generelt gælder for CE-mærkning i EU. Grunden til at EU-krav fremhæves på bekostning af den lovgivning og de krav, som gælder for andre lande, er at EU-kravene er de mest gennemførte og omfattende. Hvis man derfor overholder disse krav, overholder man som oftest også kravene gældende for andre lande.

EU-kravene gælder, så snart der udføres det, som benævnes "gøre tilgængelig på markedet". Med det forstås "enhver levering af en vare med henblik på distribution, forbrug eller anvendelse på EU-markedet som led i erhvervsvirksomhed mod eller uden vederlag". I dén sammenhæng kan følgende oplistes:

- Der skal altså være tale om erhvervsvirksomhed, - levering mellem private er altså ikke omfattet af de direktiver, som anførtes nedenfor.
- Dog gælder ét direktiv altid, - også ved private handler, nemlig "Det generelle produktsikkerhedsdirektiv", som bl.a. fastslår, at ting ikke må være farlige, når de handles.
- Ligeledes gælder direktiverne, selv om varerne foræres væk!
- Fjernsalg (altså f.eks. via Internettet) er også omfattet. Så internetbutikker skal også CE-mærke korrekt!

Det skal indskydes, at f.eks. ordet lovgivning ikke anvendes i direktivsammenhæng, i stedet anvendes ordet "regulering".

CE-mærkningen er et udtryk for, at dén som gør en vare tilgængelig på markedet, har erklæret at alle relevante direktiver er opfyldte.

Det kan være en ganske stor sag at sikre dette!

Foruden Måleinstrumentdirektivet (MID) (med den specifikke EU-betegnelse 2014/32/EU) kan/vil følgende direktiver være gældende:

- Lavspændingsdirektivet LVD (2014/35/EU), som sikrer, at brugersikkerheden (overfor bl.a. elektrisk stød, forbrænding, ja selv skarpe kanter) er opfyldt.
- EMC-direktivet EMCD (2014/30/EU), som sikrer, at elmåleren ikke udsender for meget elektromagnetisk støj og samtidig er passende immun overfor samme.
- RoHS-direktivet RoHSD (2011/65/EU), som sikrer, at elmåleren ikke indeholder for meget af specifikke skadelige stoffer.
- Hvis der var en radiotransmitter i elmåleren (som f.eks. elmåleren vist ved figur 2), så træder Radioudstørsdirektivet RUD (2014/53/EU) til. Det skal her indskydes, at RUD også omfatter de sikkerhedsmæssige og EMC-mæssige forhold, så hvis RUD skal tages i brug, så udgår LVD og EMCD for produktet.
- Direktivet for elektronisk affald WEEE (2012/19/EU), som foreskriver, hvorledes elektronisk affald skal indsamles.
- Tilsvarende gælder for indsamlingen af batterier Batteridirektivet (2006/66/EC).
- Selv for emballagen gælder Emballagedirektivet (94/62/EC), som bl.a. foreskriver, at emballagen skal optimeres, så der ikke bruges for meget af det, og at det skal sikres, at emballagen kan destrueres på forsvarelig måde.
- Der kunne også være tale om krav til energiforbrug og energimærkning (Ecodesigndirektivet 2009/125/EC og Energimærkningsdirektivet 2010/30/EU).

Opremsningen stoppes nu, - det fremgår forhåbentlig, at den tilsyneladende simple CE-mærkning virkelig kræver sit, og der skal overvejes mange ting før mærkningen kan udføres!

På EU-kommissionens hjemmeside GROWTH (ref. [6]) under rubrikken "Legislation and standards" kan man i drop-down menuen "European Standards" se, hvilke CE-mærkningsdirektiver som eksisterer. Her kan man bl.a. frit hente direktivteksterne, som er oversatte til de respektive sprog i EU, herunder også dansk.

Hele denne omtalte regulering har det formål, at EU's indre marked kan fungere uden hindringer.

Ønsker man at markedsføre uden for EU gælder der mere eller mindre lignende reguleringer, som skal overholdes. Disse reguleringer vil ikke blive omtalt nærmere her. Ønsker man oplysninger om disse krav kan man få hjælp ved f.eks. at henvende sig hos FORCE Technology, afdelingen for Approval Management, ref. [8].