



UNDERVISNINGSELEMENT E3

metrologi.dk

KONSTRUKTION OG UDMÅLING AF HØJFRE-KVENSSTRØMTANG

Knud A. Baltsen, FORCE Technology

3. udgave – December 2017, 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 <u>www.metrologi.dk</u>.

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

metrologi.dk

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

UNDERVISNINGSELEMENT E3

UNDERVISNINGSELEMENT E3

metrologi.dk

Indholdsfortegnelse

1	Indledning 1			
2	Indledning, læringsudbytte og forudsætninger			
	2.1 Om dette undervisningselement2			
	2.2 Læringsudbytte2			
	2.3 Forudsætninger2			
3	Konstruktion af selvbygget strømtang 3			
	3.1 Den magnetiske del af strømtangen3			
	3.2 Sekundærviklingen5			
	3.3 Termineringsmodstande6			
	3.4 Målekabel7			
4	Generelle betragtninger vedrørende måling af			
sp	ænding og strøm9			
	4.1 Måling af spænding og måling af strøm9			
	4.2 Ønskelige egenskaber for et praktisk anvendeligt amperemeter9			
5 hj	Teori som basis for målinger foretaget på de emmelavede strømtænger11			
	5.1 Strømtangen som transformator11			

	5.2	Impedanstransformering11
	5.3	$\label{eq:constraint} \begin{array}{l} \text{Definition af strømtangens overføringsimpedans} \\ Z_T \dots \dots 12 \end{array}$
	5.4	Teoretisk værdi af overføringsimpedansen ZT13
	5.5	Målingsopstilling for Z_{T} 14
6	Må	linger foretaget på de hjemmelavede
stı	rømt	ænger15
	6.1	Måling af coaxialkablets transmissionskarakteristik17
	6.2	Måling af coaxialkablets og testfiksturens transmissionskarakteristikker20
	6.3	Normalisering af testopstillingen uden strømtang21
	6.4	Normalisering af testopstillingen med strømtang 21
	6.5	Måling af strømtængernes overføringsimpedans Z _T 24
7	For	hold til opfølgning29
8	Ref	erencer og litteraturhenvisning

metrologi.dk

1 Indledning

Måling af elektrisk spænding U og strøm I er de fundamentale og mest forekommende elektriske målinger. I det efterfølgende undlades specifikationen "elektrisk", således at der fremover kun omtales spænding og strøm. Ligeledes vil der i det følgende altid være tale om vekselspændinger/-strømme (AC).

Hvorfor betegnelsen AC?

AC er egentlig akronymet for Alternating Current (vekselstrøm), men i teknisk gængs brug anvendes AC også for betydningen vekselspænding.

For at supplere begreberne op, anvendes DC, som er akronymet for Direct Current (jævnstrøm), ligeledes også for betydningen jævnspænding.

Dette undervisningselement beskæftiger sig med konstruktion og udmåling af en højfrekvens (HF) strømtang. Strømtangen er en strømsensor som omslutter lederen/de ledere, som man ønsker at måle på. Ved højfrekvens forstås i det følgende frekvenser fra ca. 100 kHz op til ca. 100 MHz. Figur 1 viser et eksempel på en HF strømtang.



Figur 1. HF-strømtang fra firmaet Pearson Electronics. Strømtangen kan åbnes og lukkes over et kabel ved hjælp af låsen til højre. I lukket tilstand har tangen sidemålene 50 mm x 54 mm, og højden er 25 mm. Tangen kan spænde over kabler, som er op til 13,5 mm i diameter. Strømtangen forbindes ved hjælp af et coaxialkabel til en HF-spændingsmåler. Nærmere information ved ref [1].

(Illustrationen er bragt med tilladelse fra Pearson Electronics, Inc.) Et andet eksempel er vist ved figur 2, som viser en lavfrekvens (LF) strømtang, hvor strømtangen er integreret med en signalbehandlingsenhed og display i ét instrument. Ved LF forstås her frekvensområdet fra 50 Hz op til nogle kHz.



Figur 2. Instrument til måling af elektrisk strøm ved hjælp af en strømtang. Den gule dråbeformede tang kan åbnes i toppen ved at påvirke den gule/orange knap med tommelfingeren.

2 Indledning, læringsudbytte og forudsætninger

2.1 Om dette undervisningselement

Strukturen er sat op således, at der i kapitel 3 startes med den praktiske del, der består i fremstilling af hjemmelavede strømtænger af dele, som umiddelbart kan fremskaffes fra distributører af elektroniske komponenter. Dermed haves noget håndgribeligt, som der præsenteres teori for i kapitel 5, og som der udføres målinger på i kapitel 6.

2.2 Læringsudbytte

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

- Hvad en strømtang kan anvendes til
- Hvorledes en praktisk og billig selvbygget strømtang kan fremstilles
- Generel teori om spændings- og strømmålinger
- En teoretisk beskrivelse af, hvorledes en strømtang indvirker på det kredsløb, den indsættes i
- En teoretisk beskrivelse af, hvorledes strømtangen omsætter den målte strøm til en udgangsspænding fra strømtangen
- Eksempler på forhold, som influerer på egnede måleopstillinger
- Eksempler på faktorer, som influerer på måleusikkerheden ved udmålingerne af de fremstillede strømtænger

2.3 Forudsætninger

Det forudsættes, at

- Læseren har anskaffet og sat sig ind kapitlerne 7, 9, 10 og 11 fra kompendiet "E1 – Måleteknik og impedansanalyse". Dette kompendie kan, efter registrering, gratis hentes på hjemmesiden <u>www.metrologi.dk</u>
- Læseren har viden om kredsløbsteori

3 Konstruktion af selvbygget strømtang

Det er muligt at fremstille en anvendelig strømtang ved at bruge forholdsvis billige komponenter som kan skaffes fra gængse distributører af elektroniske komponenter. Et eksempel på en sådan selvbygget strømtang er vist ved figur 3.



Figur 3. Selvbygget strømtang i åben tilstand. Man ser ind mod de inderste viklinger bestående af hvid tråd. Via BNC stikket i forgrunden leveres en spænding, som er proportional med den målte strøm.

Strømtangen kan lukkes og klipses omkring det kabel, for hvilket strømmen ønskes målt, som vist ved figur 4.



Figur 4. Selvbygget strømtang i lukket tilstand og påklipset kablet i midten af billedet. Man ser ind mod de yderste viklinger bestående af hvid tråd. Komponenterne midt på strømtangen er 50 Ω 's terminering dels af viklingerne og dels af målekablet, som forlader billedet ovenud.

Strømtangen fungerer som en transformator, hvor primærviklingen består af kablet i midten af billedet

på figur 4. Umiddelbart kunne man forledes til at antage, at primærviklingen kun består af ½ vinding, idet 1 hel vinding kun opnås, når viklingen føres hele vejen rundt om strømtangen. Hvis man gennemfører en analyse af, hvorledes de magnetiske feltlinjer forløber omkring en strømførende leder, vil man kunne indse, at den del af primærviklingen som passerer gennem centerhullet af strømtangen, er dén del, som langt overvejende bidrager til energioverførselen fra primærvikling til sekundærvikling. Denne del giver nemlig mulighed for at de magnetiske feltlinjer kan forløbe optimalt rundt i det fælles magnetiske materiale, som kobler primærviklingen og sekundærviklingen sammen. Den del af viklingen, som føres langs strømtangens to endestykker og på ydersiden bidrager forsvindende lidt til energioverførselen. Visuelt ser primærviklingen således ud til kun at være 1/2 vinding, men elektromagnetisk kan primærviklingen sættes til 1 vinding.

Sekundærviklingen består af de hvide viklinger, som i dette tilfælde er 27 vindinger. Strømmen fra primærsiden transformeres over i sekundærviklingen og går gennem 50 Ω 's termineringen, og den spænding som herved opstår, føres via målekablet til et instrument, som kan måle vekselspændinger. Denne spænding er proportional med strømmen i det kabel om hvilket strømtangen er påklipset.

De enkelte konstruktionsdele og-detaljer vil i det følgende blive gennemgået.

3.1 Den magnetiske del af strømtangen

Den magnetiske kerne er et såkaldt ferrite clamp filter (frem over betegnet som ferritfilter), hvis primære formål er at øge impedansen overfor elektromagnetiske støjstrømme i kabler. Ved ref. [2] omtales denne anvendelse kort.

Figur 5 viser det åbne ferritfilter.



Figur 5. Ferrite clamp filter af fabrikatet TDK, type ZCAT 3035-1330. Til venstre ses klipsene, som ved lukning af kunststofhuset låser sig fast i modhagerne, som lige kan anes i højre side.

Ferritfilteret består af tre dele: To halve ferritcylindre af samme størrelse, som begge fastholdes i et kunststofhus. De plane flader af de halve ferritcylindre er polerede, så når kunststofhuset lukkes, danner de to halve cylindre en hel cylinder uden nogen sprækker eller andre ujævnheder i samlingsfladerne. Hvis ikke de to halvdele passer nøjagtigt sammen forringes filteregenskaberne af ferritfilteret.

Kunststofhusets funktion er at fastholde filteret, når det lukkes om et kabel med et klipse/modhager-system, og sørge for, at de to ferritcylinderhalvdele placeres lige over hinanden. Desuden sørger nogle fjedre i kunststofhuset for at cylinderhalvdelene presses passende og vedvarende mod hinanden.

Ferritfilteret i lukket tilstand og påklipset et kabel er vist ved figur 6.



Figur 6. Ferritfilteret påsat et kabel, og fastlåst på venstre side med en kabelbinder. De to udskæringer midt på kunststofhuset er del af danner et fjedersystem, som sammenpresser ferrithalvdelene med passende og vedvarende kraft.

Hvorfor lige dette fabrikat og denne type ferritfilter?

Der eksisterer rigtig mange fabrikater og typer af ferritfiltre, og typer, som kunne være bedre egnet til formålet som strømtang, kunne formodentlig findes. Forfatteren har i sit industrielle virke haft gode erfaringer netop med TDK/ZCAT ferritfilteret. Et ferrite clamp filter er konstrueret til at blive påklipset et kabel og så sidde pålideligt dér, typisk i hele apparatets levetid. Når et ferrite clamp filter som her anvendes som strømtang, vil det blive på- og afklipset mange gange, og det skal kunststofhusets klipse-og fjederanordning vedvarende kunne holde til. Her har TDK/ZCAT filteret vist sin holdbarhed.

Som nævnt er ferritfilteret primært beregnet som filterkomponent mod elektromagnetiske støjstrømme i kabler. I anvendelsen af ferritfilteret som den magnetiske del af strømtangen benyttes ferritmaterialets rimeligt gode egenskab til at udgøre god magnetisk kobling mellem primærviklingen og sekundærviklingen. Det er en egenskab, som ferrit generelt besidder selv for frekvenser på adskillige hundrede MHz.

3.2 Sekundærviklingen

Til sekundærviklingen er valgt at anvende kunststofisoleret kobbertråd, som er beregnet til anvendelse som wire-wrap tråd. Her er lederen forsølvet specialhærdet kobbertråd med en diameter på 0,25 mm, og isoleringen består af det glatte og robuste Kynar-materiale. Her er farven på isoleringen valgt at være hvid, men der findes flere andre farver, som kan vælges efter behag. Den totale ydre diameter af hele ledningen er 0,5 mm.

Figur 7 viser trådrullen.



Figur 7. Trådrullen med 0,25 mm diameter kobbertråd med hvid Kynar isolering. Rullen rummer 50 m tråd.

Alternativt kunne lakisoleret kobbertråd have været anvendt, men wire-wrap kobbertråden er, på trods af de små dimensioner, særdeles robust, hvad angår trækpåvirkninger og isoleringen er også særdeles robust, hvad angår modstandsdygtighed mod beskadigelser. Til gengæld må det anbefales at anvende specialværktøj for at foretage en sikker afisolering uden at beskadige kobbertråden.

Figur 8 viser et eksempel på det specielle afisoleringsværktøj. Da dette er et ikke almindeligt forekommende stykke værktøj, er datablad givet ved ref. [3].



Figur 8. Afisoleringsværktøj til wire-wrap tråd. Det er specifikt konstrueret til at afisolere kobbertråd med diameter 0,25 mm. Afisoleringslængden sættes med den forskydelige rektangulære sorte afstandsblok i midten af værktøjet. Tråden med isolering føres ind i hullet foran. Der klemmes på de røde håndtag, hvorved isoleringen afskæres, og værktøjet trækkes bort fra tråden.

I de følgende figurer vises detaljer fra arbejdet med sekundærviklingen.



Figur 9. Her er viklingen påført, og wire-wrap tråden er midlertidig fikseret ved at binde den fast på ferritfilterets fastlåsningsøje.



Figur 10. Viklingen fikseres med gummilim. Limen er baseret på opløsningsmidler, og tørrer op i løbet af et døgn. Limen flyder passende ud og fastholder viklingen godt.



Figur 11. Efter optørring udviser limen ingen ledningsevne, hvilket er tilfredsstillende.

3.3 Termineringsmodstande

Med gummilimen pålimes to modstande som vist på figur 12. Der er tale om to 100 Ω 's modstande, som optræder i parallel, hvorved de samlet giver en modstand på 50 Ω . Parallelforbindelsen er den mest præcise måde at opnå de 50 Ω på, idet 100 Ω er en standardværdi.



Figur 12. To 100 Ω 's modstande pålimet oven på sekundærviklingen.

Hvorfor lige en modstandsværdi på 50 Ω ?

De 50 Ω er en værdi, som er valgt til praktisk HFbrug (når signalernes frekvenser er større end flere MHz).

Ved anvendelse af HF-signaler er det meget vanskeligt at opnå tilstandene ren kortslutning (O Ω) og ren åben forbindelse (uendelig høj impedans). Dette skyldes, at selv om man f.eks. kortslutter en forbindelse med en leder, så vil lederen altid udvise en (lille) impedans, idet der jo vil være et magnetisk felt omkring lederen, så snart der løber en strøm. Et magnetisk felt er ensbetydende med en selvinduktion.

l erkendelse heraf har man valgt at operere med en modstandsværdi på 50 Ω , da det er en værdi som er meget mere praktisk realiserbar end en kortslutning eller åben forbindelse.

At det lige blev 50Ω (og f.eks. ikke 1000Ω) skyldes at ledningsforbindelser ved HF-signaler ofte har størrelsen af den såkaldte karakteristiske impedans Z_c liggende i området $50 - 150 \Omega$. Når HFledningsforbindelser fødes med en kilde, hvis udgangsimpedans netop er lig med Z_c, og ledningsforbindelsen ligeledes afsluttes med en impedans lig med Z_c, da undgås resonansfænomener i hele ledningsforbindelsen. Det er relativt nemt at få modstande med tolerance på \pm 1 %, og det vil være tilstrækkeligt i denne sammenhæng.

Modstandene skal have gode højfrekvensegenskaber, dvs. de skal optræde som rene 100 Ω's modstande gerne for frekvenser på flere hundrede MHz. Det er dog desværre en egenskab, som der sjældent oplyses noget om i datablade, men en god ledetråd er at gå efter de fysisk mindste modstande.

Endelig påloddes de to ender af sekundærviklingen hver sin ende af de parallelforbundne modstande som vist ved figur 13. Hermed udgør sekundærviklingen og de parallelforbundne modstande en lukket kreds.



Figur 13. Enderne af de to parallelforbundne 100 Ω 's modstande påloddet hver sin ende af sekundærviklingen, således at der dannes en lukket kreds bestående af sekundærviklingen og de parallelforbundne modstande.

3.4 Målekabel

Til at føre målesignalet fra strømtangen anvendes coaxialkabel af typen RG-174. Denne type er anvendt, da kablet har en lille ydre diameter på 2,7 mm. For at undgå selv at skulle påsætte coaxialstik er valgt at anvende et konfektioneret kabel. Her er en gængs udførelse RG-174 kabel konfektioneret i begge ender med SMA hanstik. Til formålet her anvendtes konfektionerede kabellængder på 1 m, der så deltes i to lige lange stykker.

For at aflaste RG-174 kablet ved strømtangen er der boret et 3 mm hul i fikseringstappen som vist ved figur 14.



Figur 14. Aflastningshul med diameter 3 mm boret i fikseringstappen på ferritfilterets kunststofhus.

Figur 15 viser hvorledes målekablet er ført gennem aflastningshullet og påloddet termineringsmodstandene.



Figur 15. Målekabel påloddet termineringsmodstandene. Bemærk også kabelaflastningen via hullet i fikseringstappen.

For at ende op med et BNC hanstik anvendes en SMA hunstik til BNC hanstik adapter som vist ved figur 16.



Figur 16. Målekablets terminering i form af et SMA hanstik til venstre og SMA hunstik til BNC hanstik adapter til højre.

Der er fremstillet i alt seks forskellige strømtanger, to stk. med 6 vindinger (mærkede 6-1 og 6-2), to stk. med 15 vindinger (mærkede 15-1 og 15-2) og to stk. med 27 vindinger (mærkede 27-1 og 27-2). Alle de fremstillede strømtænger er viste på figur 17.



Figur 17. De til kompendiet fremstillede seks strømtænger med påførte identifikationsnumre. Nummeret angiver vindingstal - serienummer.

4 Generelle betragtninger vedrørende måling af spænding og strøm

Forinden teorien bag strømtangsmålingen behandles skal principforskellene mellem måling af spænding og strøm omtales.

4.1 Måling af spænding og måling af 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 måleunøjagtighed 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 18 er princippet for spændingsmålingen med et voltmeter V vist.



Figur 18. Måling af spænding ved anvendelse af et voltmeter V.

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

Ved figur 19 er princippet for strømmålingen med et amperemeter A vist.



Figur 19. Måling af strøm ved anvendelse af et amperemeter A.

Amperemeterets indflydelsen 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.

4.2 Ønskelige egenskaber for et praktisk anvendeligt amperemeter

Ud over ovennævnte lille indre impedans Z_A i sammenligning med måleobjektets impedans Z, er det i praksis en særdeles god egenskab, at amperemeteret umiddelbart lader sig indsætte i målekredsen. Som figur 19 viser, skal målekredsen brydes for at indsætte amperemeteret i serie med måleimpedansen. Når målekredsen brydes bliver strømmen I_Z nul, og dermed kan f.eks. kommunikationen gennem Z afbrydes eller det efterfølgende apparat, som aktiveres af strømmen I_Z kan slukkes. Den aktive tilstand skal derefter genoprettes. Det kan derved blive en tidsmæssigt krævende affære at indsætte et amperemeter i mange strømkredse.

Når den sjældne fejl lige er konstateret

Endnu værre bliver det, hvis man under fejlfinding har opnået, at fejlen lige præcis er til stede, og man så skal bryde strømkredsen for at indsætte amperemeteret. Det er jo ikke sikkert, at fejlen lader sig genskabe umiddelbart efter strømkredsen igen er blevet etableret, men at man skal bruge lang tid på igen at fremkalde fejlen.

Ovenstående egenskab, at man undgår at bryde en strømkreds når der skal måles, er netop strømtangens væsentligste egenskab. Det fremgår af både figur 1 og figur 2, at strømtængerne kan åbnes, og den åbne strømtang kan føres ind over den/de ledninger man ønsker at måle strømmen igennem. En ekstra feature ved strømtangen er således også, at man umiddelbart kan måle den samlede strøm gennem flere ledninger. At strømtangen ikke kræver galvanisk forbindelse med det kredsløb som måles på, er også en meget god sikkerhedsmæssig egenskab. Man kan derved måle på ledninger, som har påtrykt så store spændinger, at det kunne være forbundet med livsfare at måle på disse.

Andre, måske mere, oplagte og gængse egenskaber er f.eks. passende nøjagtighed, følsomhed og frekvenskarakteristik.

5 Teori som basis for målinger foretaget på de hjemmelavede strømtænger

I dette kapitel betragtes strømtangen indledningsvis som en ideel transformator. For denne ideelle komponent introduceres begreberne impedanstransformering og overføringsimpedans. Endelig analyseres måleopstillingen for bestemmelsen af overføringsimpedansen.

5.1 Strømtangen som transformator

Som nævnt i kapitel 3 fungerer strømtangen som en transformator, hvor strømmen i primærviklingen transformeres over i sekundærviklingen. Strømmen i sekundærviklingen passerer en modstand på 50 Ω , og spændingen over denne modstand er målesignalet. Man kan herved opstille et måltal for omsætningen fra primærstrøm til målt udgangsspænding fra strømproben. Som omtalt i kapitel 5.3 defineres denne omsætningsfaktor som strømtangens overføringsimpedans Z_T.

Indledningsvis vil strømtangens transformatorvirkning blive betragtet, og den behandles som en ideel transformator

Kredsløbssymbolet for en ideel transformator er vist ved figur 20.



Figur 20. Kredsløbssymbolet for en ideel transformator. Indeksene S og P betegner henholdsvis sekundær- og primærsiden. De tilsvarende spændinger og strømme er U_s , U_p , I_s og I_p . Vindingstallene er henholdsvis N_s og N_p . De lodrette stiplede linjer symboliserer det magnetiske kernemateriale.

For den ideelle transformator gælder ligning (1) for sammenhængen mellem spændingerne U_{s} og U_{p}

$$\frac{J_s}{J_p} = \frac{N_s}{N_p}$$
(1)

og ligning (2) for sammenhængen mellem strømmene Is og Ip

 $\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s}$ (2)

5.2 Impedanstransformering

Foruden den umiddelbare funktion at transformere spændinger og strømme, er også impedanstransformeringen væsentlig. Indsættes en modstand R på sekundærsiden vil denne modstand, når der ses ind mod primærsiden, optræde som en modstand Rp som vist ved figur 21.



Figur 21. Transformering af sekundærmodstanden R til den modstandsværdi R_p, som man tilsyneladende vil opleve, hvis man ser ind i primærsiden. I denne forbindelse betegnes R_P indsætningsimpedansen.

For R_p gælder

$$R_p = \frac{U_p}{I_p}$$

Ved indsættelse af (1) og (2) fås ligning (3)

$$R_{p} = \frac{U_{s} \cdot \frac{N_{p}}{N_{s}}}{I_{s} \cdot \frac{N_{s}}{N_{p}}} = \frac{U_{s}}{I_{s}} \cdot \left(\frac{N_{p}}{N_{s}}\right)^{2} = R \cdot \left(\frac{N_{p}}{N_{s}}\right)^{2}$$
(3)

UNDERVISNINGSELEMENT E3

Som tidligere beskrevet i forbindelse med figur 4 sættes N_P til 1 vinding. Med R = 50 Ω og N_s henholdsvis 6, 15 og 21 vindinger fås resultaterne i tabel 1.

Ns	$\frac{N_p}{N_s}$	R _ρ [Ω]		
6	0,17	1,4		
15	0,067	0,22		
27	0,037	0,069		

Tabel 1. Værdier af indsætningsimpedansen R_P for de tre forskellige værdier af N_S : $N_S = 6$, 15 og 27. I alle tre tilfælde er N_P sat til 1 vinding, og $R = 50 \Omega$.

Ved anvendelse af impedanstransformeringen kan man altså opnå at opfylde kriteriet om at strømtangens indsætningsimpedans bliver lille, jævnfør bemærkningerne i forbindelse med figur 19.

5.3 Definition af strømtangens overføringsimpedans Z_T

Den væsentligste parameter for strømtangen er forholdet mellem udgangsspændingen U_{ST} fra strømtangen og målestrømmen IP.

Forholdet mellem en spænding og en strøm leder tankerne hen på en impedans, og det er netop derfor man definerer strømtangens overføringsimpedans Z_T (T for transfer) som ligning (4)

$$Z_{\rm T} = \frac{U_{\rm ST}}{I_{\rm P}} \tag{4}$$

Det er her en forudsætning, at U_{ST} måles med et instrument, f.eks. en spektrumanalysator, med indgangsimpedans på 50 Ω , da strømtangens indre impedans netop også er 50 Ω .

Udvidelse af impedansbegrebet

Bemærk her, at overføringsimpedansen for en strømtang er et forhold mellem en spænding målt ét sted og én strøm målt et andet sted. Der er altså ikke tale om en impedans i traditionel forstand, hvor spænding og strøm er gældende for én og samme komponent. Impedansbegrebet er således blevet udvidet til at være alment gældende for forholdet mellem én given spænding og én given strøm.

Man kan således ikke måle Z_T ved f.eks. at tilslutte strømtangens udgang en impedansmåler på samme måde, som man ville måle en almindelig impedans Z.

5.4 Teoretisk værdi af overføringsimpedansen Z_T

Den teoretiske værdi for Z_T kan udledes ved hjælp af figur 22.



Figur 22. Diagram til beregning af Z_{τ} for strømtangen. Foruden de størrelser, som er definerede ved figur 19 og ligning (4), optræder R som er strømtangens indre impedans og R_{SA} , som er indgangsimpedansen for spektrumanalysatoren. Målekablet er det på figur 14 viste tynde coaxialkabel.

Følgende gælder, da RSA og R optræder i parallel

$$U_{ST} = I_{S} \cdot \frac{R_{SA} \cdot R}{R_{SA} + R} = I_{P} \cdot \frac{N_{P}}{N_{S}} \cdot \frac{R_{SA} \cdot R}{R_{SA} + R}$$

Heraf fås ligning (5) $<=> Z_T = \frac{U_{ST}}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} \cdot \frac{R_{SA} \cdot R}{R_{SA} + R}$ (5)

For størrelserne i figur 22 gælder: N_P = 1 vinding, N_S de tre forskellige vindingsværdier: N_S = 6, 15 og 27, R = 50 Ω og R_{SA} = 50 Ω . Hermed fås $\frac{R_{SA} \cdot R}{R_{SA} + R}$ = 25 Ω .

Tabel 2 viser de tre forskellige teoretiske værdier af $Z_{T,teoretisk}$ gældende henholdsvis for N_s = 6, 15 og 27, alle beregnet fra ligning (5).

Ns	$\frac{N_p}{N_s}$	$Z_{T,teoretisk}$		
6	0,17	4,2		
15	0,067	1,7		
27	0.037	0.93		

Tabel 2. Værdier af overføringsimpedansen Z_T for de tre forskellige værdier af N_S : $N_S = 6$, 15 og 27.

5.5 Målingsopstilling for Z_T

En spektrumanalysator med trackinggenerator er valgt til at bestemme Z_T. Begrundelsen herfor er bl.a. at dette instrument har en kombination af en generatorudgang, hvor der optræder en frekvens, som analysatorindgangen er afstemt til via intern kobling i det samme instrument. Desuden har instrumentet visse normaliseringsegenskaber, som også er meget fordelagtige at anvende, som det vil blive vist i det følgende.

I_P bestemmes ved at måle den spænding U_P som opstår, når spektrumanalysatorens indgangsimpedans R_{SA} = 50 Ω gennemløbes af I_P. Figur 23 viser diagrammet af måleopstillingen. Strømtangen er indsat i testfiksturen og målekablet fra denne er termineret med en impedans, som er lig med R_{SA} = 50 Ω.

 U_{ST} bestemmes ved nu at tilslutte målekablet fra strømtangen til spektrumanalysatorens indgang, mens man terminerer coaxialkablet med en coaxialmodstand på 50 Ω . Derved fastholdes størrelsen af I_P.



Figur 23. Diagram som viser måle
opstillingen for $Z_{\rm T}$

6 Målinger foretaget på de hjemmelavede strømtænger

Testfiksturen uden strømtang er vist ved figurerne 24 og 25.



Figur 24. Testfikstur fremstillet af et vinkelstykke i aluminium, hvorpå BNC-hun chassisstik er monteret. Forbindelsen mellem de to stik er 1,5 kvadrat installationsledning med hvid isolering.



Figur 25. Testfiksturen forsynet med et afstandsstykke i ekspanderet polyethylenskum.

Figur 26 viser den fysiske måleopstilling svarende til diagrammet figur 23.



Figur 26. Den til figur 23 svarende fysiske testopstilling, dog indledningsvis uden strømtang, bestående af spektrumanalysator GSP-810 fra GW Instek, testfikstur og coaxialkabel med længde 50 cm. Det på diagrammet figur 23 viste coaxialstik er skjult bag testfiksturen.

6.1 Måling af coaxialkablets transmissionskarakteristik

For betjening og indstilling af spektrumanalysatoren med trackinggenerator henvises til kapitel 10 af kompendiet ref. [4]. Dette materiale kan efter registrering på hjemmesiden <u>www.metrologi.dk</u> frit kan hentes.

Inden testfiksturen indsættes vises målinger foretaget kun på det anvendte coaxialkabel, dvs. uden testfikstur. Figur 27 viser måleopstillingen til illustration af coaxialkablets transmissionskarakteristik.



Figur 27. Opstilling til illustration af coaxialkablets transmissionskarakteristik. Kablet er forbundet direkte fra trackinggeneratorens udgang til spektrumanalysatorens indgang.

Figur 28 viser grafisk transmissionskarakteristikken for coaxialkablet i frekvensområdet nogle MHz til 1000 MHz. Med "nogle MHz" menes, at den laveste anvendelige målefrekvens for GSP-810 skønnes at være i området ca. 1 til 3 MHz. En spektrumanalysator er karakteriseret ved at have en laveste målefrekvens væsentligt større end 0 Hz.



Figur 28. Illustration af transmissionskarakteristikken for coaxialkablet med længde 50 cm. Det målte niveau falder for stigende frekvens. Dette fald kan skyldes, at niveauet fra trackinggeneratoren og/eller spektrumanalysatorens indgangsrespons falder med stigende frekvens og/eller stigende tab i coaxialkablet.

Den synlige "bølgegang" i karakteristikken er en følge af mistilpasning mellem trackinggeneratorens udgangsimpedans, BNC-stikkenes karakteristiske impedans, coaxialkablets karakteristiske impedans og indgangsimpedansen for spektrumanalysatoren. Alle tre størrelser er altså ikke præcist 50 Ω for alle frekvenser. Det bevirker, at fænomenet "stående bølger" opstår i forbindelsen. Ved stående bølger vil nogle frekvensers amplitude forstærkes, mens for andre frekvenser vil deres amplitude formindskes.

Figur 29 viser grafisk transmissionskarakteristikken for et coaxialkabel med større længde.



Figur 29. Illustration af transmissionskarakteristikken for et coaxialkabel med længde 100 cm. Det målte niveau falder næsten identisk med kablet på 50 cm vist ved figur 28. Dette kunne indikere, at det faldende niveau skyldes, at det er niveauet fra trackinggeneratoren og/eller spektrumanalysatorens indgangsrespons, som falder med stigende frekvens.

6.2 Måling af coaxialkablets og testfiksturens transmissionskarakteristikker

Indsættes testfiksturen som vist på billedet figur 26 fås den grafiske transmissionskarakteristik vist ved figur 30.



Figur 30. Illustration af transmissionskarakteristikken for coaxialstik, testfikstur og coaxialkabel med længde 50 cm. Det målte niveau falder mere end niveauet vist ved figur 28, og effekten af stående bølger er mere markant. Dette skyldes, at testfiksturen har en karakteristisk impedans betydeligt mere afvigende fra 50 Ω . Dette skulle man også forvente, bl.a. fordi testfiksturen ikke har en coaxial opbygning.

6.3 Normalisering af testopstillingen uden strømtang

Ved brug af normaliseringsfunktionen for spektrumanalysatoren opnås et frekvensuafhængigt niveau som vist ved figur 31. Brug af normaliseringsfunktionen er beskrevet i kapitel 10 i ref. [3].



Figur 31. Illustration af den normaliserede transmissionskarakteristik for coaxialstik, testfikstur og coaxialkabel med længde 50 cm for frekvensområdet nogle MHz til 100 MHz. Det målte niveau er på spektrumanalysatorens display aflæst til at være – 44,1 dBm.

Ved figur 31 ændres også det anvendte frekvensområde til at stoppe ved 100 MHz. Dette skyldes, at dette frekvensområde er relevant for anvendelsen af de hjemmelavede strømtænger vist ved figur 17.

Aflæsningerne via spektrumanalysatorens display af de målte niveauer sker i enheden dBm. Denne enhed er behandlet i kapitel 11 i ref. [3].

6.4 Normalisering af testopstillingen med strømtang

Ved målingen vist ved figur 31 er der ingen strømprobe på plads i testfiksturen, som også vist på billedet ved figur 26. For at afgøre om tilføjelsen af strømtangen har nogen betydning udføres en måling tilsvarende den vist ved figur 31, dog med en strømtang tilføjet som vist ved figur 32.



Figur 32. Foto svarende til opstillingen på figur 26, dog med en strømtang indsat. Bemærk, at strømtangen er termineret med en coaxialmodstand på 50 Ω svarende til at strømtangen var tilsluttet spektrumanalysatorens indgang.

Den normaliserede transmissionskarakteristik vist ved figur 33.



Figur 33. Illustration af den normaliserede transmissionskarakteristik for coaxialstik, testfikstur med strømtang 06-1 (termineret med 50 Ω) og coaxialkabel med længde 50 cm for frekvensområdet nogle MHz til 100 MHz. Den fysiske opstilling er vist ved figur 32. Det målte niveau er på spektrumanalysatorens display aflæst til at være – 44,5 dBm. Niveauet falder altså 0,4 dB i forhold til niveauet på figur 31, svarende til at en lille ekstra impedans er blevet tilføjet i form af strømtangen. Dette repræsenterer strømtangens indsætningsimpedans R_P, som teoretisk blev behandlet i kapitel 5.2.

For strømtængerne 15-1 og 27-1 er de tilsvarende normaliserede transmissionskarakteristikker også udført. For begge strømtænger er den målte værdi aflæst til – 44,7 dBm, dvs. for begge et målt fald på 0,6 dB. Faldet burde i henhold til teorien fra kapitel 5.2 være mindre end faldet for strømtang 06-1, som jo iflg. figur 33 er 0,4 dB. Det er ikke muligt af give en forklaring på denne afvigelse, man kan dog konstatere, at alle strømtænger har en forventelig lille/måske negligérbar indflydelse ved indsætning.

6.5 Måling af strømtængernes overføringsimpedans ZT

Ved figur 34 vises måleopstillingen, som anvendes til måling af strømtængernes overføringsimpedans Z_T. Før målingen af den enkelte strøtang (06-1, 15-1 eller 27-1) er normaliseringsfunktionen beskrevet i afsnit 6.4 udført for hver strømtang.



Figur 34. Foto, som viser måleopstillingen, som anvendes til måling af strømtangens overføringsimpedans Z_T som funktion af frekvensen. Bemærk, at nu er strømtangens målekabel tilsluttet spektrumanalysatorens indgang, dermed er strømtangen stadig termineret med 50 Ω . Coaxialkablet fra testfiksturen er nu blevet termineret med en coaxialmodstand på 50 Ω .

En måleteknisk detalje

Fra figur 34 ses, at trackinggeneratorens udgang er tilsluttet følgende forbindelse: Coaxialstik (skjult bag testfiksturen), testfikstur coaxialkabel og 50 Ω coaxial termineringsmodstand. Umiddelbart ville man kunne resonere, at coaxialkablet skulle udelades (dvs. termineringsmodstanden skulle påsættes testfiksturen direkte) for at opnå den simplest mulige måleopstilling.

Her skal man huske, at formålet med opstillingen ved figur 34, er at strømmen I_P som passerer gennem strømtangen skal være den samme som på figur 32. Fjernes coaxialkablet introducerer man en systematisk fejl ved at udelade den ekstra impedans som coaxialkablet repræsenterer, og I_P vil derfor vokse en smule. Man kunne kompensere for denne stigning, hvis man kendte coaxialkablets impedans, som dog ville betyde, at man skulle måle kablets impedans. Ved at beholde coaxialkablet holder man sig altså lettest og tættest til den værdi for I_P, som man finder ved opstillingen på figur 32. Det frekvensafhængige forløb af overføringsimpedanserne Z^T for strømtængerne 06-1, 15-1 og 27-1 er vist henholdsvis ved figurerne 35, 36 og 37.



Figur 35. Illustration af overføringsimpedansen Z_T for strømtangen 06-1. Det ses, at Z_T er frekvensafhængig, men dog nogenlunde frekvensuafhængig op til ca. 80 MHz *). Over de 80 MHz begynder forskellige resonansfænomener for strømtangen at gøre sig gældende.

Det målte niveau repræsenterende Z_T for 06-1 er på spektrumanalysatorens display aflæst til at være – 65,3 dBm ved 25 MHz.

*) Afvigelsen under ca. 4 MHz skyldes ikke strømtangen, men spektrumanalysatorens indstilling af båndbredden til 4 MHz. Denne indstilling er desværre fastlagt, når centerfrekvensen er sat til 50 MHz. For disse indstillinger henvises til kapitel 10 i ref. [3].



Figur 36. Illustration af overføringsimpedansen Z_T for strømtangen 15-1. Det ses, at også her er Z_T er frekvensafhængig, men dog nogenlunde frekvensuafhængig op til ca. 60 MHz *). Over de 60 MHz begynder forskellige resonansfænomener for strømtangen at gøre sig gældende, i dette tilfælde optræder det mere tydeligt end ved figur 35.

Det målte niveau repræsenterende Z_T for 15-1 er på spektrumanalysatorens display aflæst til at være – 71,8 dBm ved 25 MHz.

*) Som ved figur 35, skyldes afvigelsen under ca. 4 MHz ikke strømtangen, men spektrumanalysatorens indstilling af båndbredden til 4 MHz. Denne indstilling er desværre fastlagt, når centerfrekvensen er sat til 50 MHz. For disse indstillinger he nvises til kapitel 10 i ref. [3].



Figur 37. Illustration af overføringsimpedansen Z_T for strømtangen 27-1. Det ses, at også her er Z_T er frekvensafhængig, men dog nogenlunde frekvensuafhængig op til ca. 30 MHz *). Over de 30 MHz begynder forskellige resonansfænomener for strømtangen at gøre sig gældende, også i dette tilfælde optræder det mere tydeligt end ved figur 35.

Det målte niveau repræsenterende Z_{T} for 27-1 er på spektrumanalysatorens display aflæst til at være – 75,6 dBm ved 25 MHz.

*) Som ved figur 35, skyldes afvigelsen under ca. 4 MHz ikke strømtangen, men spektrumanalysatorens indstilling af båndbredden til 4 MHz. Denne indstilling er desværre fastlagt, når centerfrekvensen er sat til 50 MHz. For disse indstillinger he nvises til kapitel 10 i ref. [3].

Ved at anvende ligning (5) fra side 13, kan den målte værdi for Z_T findes.

 U_{ST} for hver strømtang bestemmes fra den effekt P_{ST} , som afsættes i spektrumanalysatorens indgangsimpedans på 50 Ω i forbindelse med målingerne givet ved figurerne 35, 36 og 37.

Sammenhængen mellem U_{ST} og P_{ST} er givet ved: U_{ST} = $\sqrt{P_{ST} \cdot 50 \Omega}$

 P_{ST} bestemmes ud fra de målte dBm-værdier ved at anvende ligning (6) på side 11 af ref. [3]: $\frac{P_1}{P_0} = 10^{\frac{L}{10}}$

I denne forbindelse får udtrykket udseendet $\frac{P_{ST}}{0,001 \text{ W}} = 10^{\frac{L_{ST}}{10}} \Leftrightarrow P_{ST} = 0,001 \cdot 10^{\frac{L_{ST}}{10}} \text{ W},$

idet $P_0 = 1 \text{ mW}$ og L_{ST} er de aflæste dBm-værdier fra figurerne 35, 36 og 37.

I_P for hver strømtang bestemmes fra den effekt P_P, som afsættes i spektrumanalysatorens indgangsimpedans på 50 Ω i forbindelse med målingerne givet ved figur 33 og teksten under figur 33.

UNDERVISNINGSELEMENT	F3
ONDERVISININGSELEIVIENT	23

Sammenhængen mellem I_P og P_P er givet ved: I_P = $\sqrt{\frac{P_P}{50 \Omega}}$

Tilsvarende med det ovenfor anførte bestemmes P_P ud fra udtrykket $\frac{P_P}{0,001 \text{ W}} = 10^{\frac{L_P}{10}} \Leftrightarrow P_P = 0,001 \cdot 10^{\frac{L_P}{10}} \text{ W},$ hvor L_P er de aflæste dBm-værdier fra figur 33 og teksten under figur 33.

Ovenstående sammenfattes i nedenstående tabel 3, hvor de målte værdier af Z_{T, målt} sammenlignes med de teoretiske værdier Z_{T, teoretisk} fra tabel 2 i kapitel 5.4.

Strøm-	Lst	Рѕт	Ust	LP	PP	Iр	ZT,målt	ZT, teoretisk
tang	[dBm]	[W]	[V]	[dBm]	[W]	[A]	[Ω]	[Ω]
06-1	- 65,3	2,95 · 10 ⁻¹⁰	$1,21 \cdot 10^{-4}$	- 44,5	$3,55 \cdot 10^{-8}$	2,66 · 10 ⁻⁵	4,6	4,2
15-1	- 71,8	6,61 · 10 ⁻¹¹	5,75 · 10 ⁻⁵	- 44,7	3,39 · 10 ⁻⁸	2,60 · 10 ⁻⁵	2,2	1,7
27-1	- 75,6	2,75 · 10 ⁻¹¹	$3,71 \cdot 10^{-5}$	- 44,7	3,39 · 10 ⁻⁸	2,60 · 10 ⁻⁵	1,4	0,93

Tabel 3. Sammenfatning af målingerne førende frem til Z_{T,målt} for de tre strømtænger: 06-1, 15-1 og 27-1. For sammenligningens skyld er resultaterne af Z_{T,teoretisk} fra tabel 2 også anført.

De faktorer, som kan give bidrag til afvigelsen mellem målte og teoretisk bestemte værdier, er:

- For den teoretiske udledning skal der tages stilling til primærvindingstallet N_P. Er der her tale om et vindingstal på ½, 1 eller noget midt imellem? I beregningerne er N_P sat til 1, et mindre tal bevirker en mindre værdi af Z_T, så dette bringer faktisk ikke Z_T, teoretisk og Z_T, målt i bedre overensstemmelse.
- For den teoretiske beregning er den simplest mulige teori anvendt ved at lade en ideel transformator indgå. Det er ikke muligt at vurdere, hvilken retning dette trækker beregningerne.
- For spektrumanalysatoren er opgivet en måleusikkerhed for amplitudemålingen på ± 19 %. Dette er belyst i kapitel 9 af ref. [3]. Alle måleresultater aflæses i spektrumanalysatorens display ved enheden dBm. Dette er en effektenhed, men det er ikke den direkte målte størrelse. Fundamentalt måler en spektrumanalysator altid spændingsamplituder, og denne spændingsamplitude omregnes i apparatet til dBm. Derfor gælder måleusikkerheden på de ± 19 % også for dBm-værdierne. Hermed kan værdierne for Z_{T, målt} både blive større eller mindre.
- Det fremgår af figurerne 35, 36 og 37, at værdierne for Z_{T, målt} er frekvensafhængige. Derfor er de opgivne værdier for Z_{T, målt} målte ved 25 MHz. Valgtes en anden frekvens (dog stadig i det rimeligt frekvensuafhængige område), kan Z_{T, målt} ændre sig lidt.

De målte værdier er en faktor ca. 1,1 til 1,5 større end de tilsvarende teoretiske, hvilket vurderes som en rimelig overensstemmelse. Dette dels ud fra ovenstående faktorer, og dels ud fra, at konstruktionen af de hjemmelavede strømtænger jo er ganske simpel.

7 Forhold til opfølgning

Følgende punkter kan være relevante til efterfølgende behandling:

- Den laveste anvendelige frekvens som strømtængerne rimeligt lineært kan anvendes til, er ikke søgt hverken teoretisk bestemt eller målt. Ud fra målingerne fandtes, at et større vindingstal gav lavere øvre anvendelsesfrekvens med en rimelig frekvensuafhængig Z₁. Det forventes til gengæld, at det større vindingstal vil medføre lavere anvendelig nedre anvendelsesfrekvens.
- De resonansforhold for frekvenser over det rimeligt frekvensuafhængige område er der ikke søgt nogen teoretisk redegørelse for. Der er heller ikke på nogen måde praktisk søgt at ændre på disse forhold.
- Ved store strømme kan mætningsfænomener gøre sig gældende, som bevirker store målefejl. Det er ikke søgt teoretisk eller målingsmæssigt at undersøge disse forhold. Det skal bemærkes, at disse mætningsfænomener kan stamme f.eks. fra en stor jævnstrøm (DC), og da strømtangen ikke giver nogen respons for DC, vil mætning fra DC kunne optræde, uden man målingsmæssigt nemt kan erkende det. Man bliver altså ikke på denne måde direkte advaret om, at mætning er indtrådt eller er ved at indtræde.

8 Referencer og litteraturhenvisning

- [1] Datablad for Pearson® Current Monitor Model 8585C: http://www.pearsonelectronics.com/pdf/8585C.pdf
- [2] TDK-note om ferrit: https://product.tdk.com/en/products/emc/guidebook/eemc_basic_06.pdf
- [3] Datablad for afisoleringsværktøj C.K Tools T3756 25: http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/1369/0900766b813693be.pdf
- [4] Kompendie: E1 Måleteknik og impedansanalyse. Kan efter registrering hentes gratis på hjemmesiden <u>www.metrologi.dk</u>