

El-teori

Lærebog **1**

Elektrikeruddannelsen Grundforløb 2



El-teori

Lærebog **1**

**Elektrikeruddannelsen
Grundforløb 2**

El-teori, Lærebog 1
Elektrikeruddannelsen, Grundforløb 2
Af Martin Køhler

© 2023 EVU, El- og Vvs-branchens uddannelsessekretariat

Fagkorrektur: Teddy Larsen, adjunkt, Københavns Erhvervsakademi

Omslagsdesign, grafisk tilrettelæggelse: Klahr | Grafisk Design
Omslagsillustration: AI-genereret i Midjourney af EVU
Figurer: Cecilia Sigurdsson/gografic

ISBN: 978-87-7832-001-8

2. udgave 2024

Kan frit kopieres. Ved anvendelse af uddrag af bogen krediteres EVU (2023).
Lærebogen er til fri download på evu.dk

Indhold

Forord	7
Indledning	9
1. Elektriske grundbegreber	11
1.1. Elektricitet	11
1.2. Former for el	11
1.3. Definitioner	13
1.4. Opsummering	27
2. Jævnstrømsteori	29
2.1. Ohms lov	30
2.2. Forbindelsesmuligheder	32
2.3. Effekt	47
2.4. Arbejde	51
2.5. Virkningsgrad	51
2.6. Spændingskilder	52
3. Elektromagnetisme	61
3.1. Magnetisme	61
3.2. Elektromagneter	70
3.3. Induktion	78
3.4. Generatorregel (højre hånd)	81
3.5. Motorregel (venstre hånd)	85
3.6. Transformerprincippet/gensidig induktion	87
3.7. Selvinduktion	89
3.8. Magnetiske tab	93
4. 1-faset vekselstrømsteori	99
4.1. Frembringelse af vekselstrøm	99
4.2. Vekselstrømmens værdier	106
4.3. Effekter i vekselstrøm	109

5. 3-faset vekselstrømsteori	119
5.1. Frembringelse af 3-faset vekselstrøm	119
5.2. Fase- og netværdier	121
5.3. Belastninger og 3-fasede effekter (symmetrisk belastning)	127
5.4. Effekter i 3-fasede systemer	131
5.5. Spændingsfald	133
 6. Transformere	 137
6.1. Transformerprincippet	138
6.2. Transformerens opbygning	139
6.3. Virkemåde	140
6.4. Omsætningsforhold	140
6.5. Viklingsudtag	142
6.6. 3-fasede transformere	143
 7. Ensretning	 145
7.1. Transformerings	145
7.2. Ensretter	146
7.3. Udglatning	149
7.4. Stabilisering	150
 8. Målinger	 151
8.1. Voltmeter/spændingstester	152
8.2. Amperemeter/tangamperemeter	154
8.3. Ohmmeter	158
8.4. Multimeter	160
8.5. Wattmeter	161
8.6. Kilowatt-timemåler	164
8.7. Valg af instrument og målemetode	164
8.8. Installationstester	170

Forord

Velkommen til elektrikeruddannelsen og lærebog 1 (2. udgave) om el-teori.

El-teori er den første af tre udgivelser i en serie, der tilsammen dækker de grundlæggende begreber, teknologier og problemstillinger i el-faget. Lærebogsserien giver dermed dig som elev og lærling på elektrikeruddannelsens grundforløb 2, og senere på hovedforløbets 1. og 2. del, et solidt fundament for den videre specialisering på uddannelsens moduler i den sidste del af uddannelsen.

De efterfølgende lærebøger vil omhandle henholdsvis **installationer** og **automatiske anlæg**. Hver bog bygger videre på den viden, du har opnået i de foregående bøger, og giver dig et stadig dybere indblik i el-faget.

Lærebog 2, Installationer dykker ned i principperne for de elektriske installationer, der er afgørende for korrekt og energieffektiv anvendelse af elektricitet i boliger, erhverv og industri samt den forsyningsmæssige infrastruktur.

Lærebog 3, Automatiske anlæg, fokuserer på automatisering og styring af elektriske systemer. Her ser vi nærmere på sensorer, kontrolsystemer og programmering til at skabe intelligente og effektive elektriske anlæg.

Lærebogsserien er en moderniseret udgave af tidligere lærebøger om samme emner og er tilpasset læringsmålene i den version af elektrikeruddannelsen, som trådte i kraft den 1. august 2023.

Tak til de mange faglærere, der har været med i dialogen undervejs om denne lærebog om el-teori og særligt tak til forfatter Martin Køhler, til faglig korrekturlæser Teddy Larsen og til Fluke Danmark A/S for billeder og data til kapitlet om målinger.

Til dig, som er elev og lærling, skal der lyde et tak for, at du valgte elektrikeruddannelsen. Vi ønsker dig god fornøjelse med din læring!

TEKNIQ
ARBEJDSGIVERNE



El- og Vvs-branchens Uddannelsessekretariat

Indledning

Denne lærebog om el-teori omhandler grundlæggende viden om elektricitet.

Først vil grundbegreberne blive behandlet, og hvorledes man kan forstå og regne på elektricitet i jævnstrøm. Med dette vil der blive skabt en forståelse for blandt andet elementerne i Ohms lov omkring spænding, strøm, modstande og effekter, samt hvorledes de betragtes i spændingskilder og forsyningsnettet til de elektriske installationer.

Med emnet elektromagnetisme gennemgås, hvordan forholdet mellem magnetisme og elektricitet forholder sig. Med dette kan man frembringe vekselstrøm, og der skabes hermed en forståelse for det trefasede netværk.

Med forståelsen for vekselstrøm vil det bagefter blive behandlet, hvordan denne spænding kan transformeres til andre spændinger, samt hvorledes man igen kan frembringe jævnspænding gennem ensretning.

Til slut gennemgås de basale målemetoder som elektrikerens skal forholde sig til.

Af matematik skal der i starten kun benyttes relativt simple formler som ligefrem og omvendt proportionalitet. I afsnittet om vekselstrøm benyttes retvinklede trekanter til at illustrere de beregnede værdier, hvorfor der her benyttes trigonometri, altså Pythagoras' læresætning og enhedscirklen vedrørende cosinus og sinus. Trigonometrien vil dog først for alvor skulle benyttes senere på hovedforløbene. Matematikken er derfor overkommelig, men den benyttes meget til forståelsen af forholdene mellem værdierne.

Sidst skal det bemærkes, at kompendiet blot er en grundlæggende gennemgang af el-teorien og bør understøttes med underviserens yderligere formidling af emnerne i kompendiet.

1. Elektriske grundbegreber

Til at begynde med behandles de forskellige grundbegreber, som benyttes inden for elektricitet. Der er ikke så mange, men det er vigtigt, at man kan adskille forståelserne fra hinanden og kan benytte dem i forhold til hinanden. I næste afsnit, [1.2. Jævnstrøm](#), vil der blive set på forholdet mellem begreberne.

1.1. Elektricitet

Ordet elektricitet stammer fra det græske ord *elektron*. Elektricitet, også forkortet i dagligdagen til el, er et fysisk fænomen, der knytter sig til elektriske ladninger i hvile (elektrostatik) eller i bevægelse (elektrodynamik), og som viser sig ved gensidig frastødning og tiltrækning af partikler, altså i dette tilfælde elektronerne, som er den mindste del af atomet.

Elektrostatik kendes fra statisk elektricitet, hvor et overskud eller underskud af elektroner på en bestemt flade enten tiltrækker eller frastøder. Det bedste eksempel er ballonen, som kan sidde fast på tapetet.

Elektrodynamikken kender vi fra den strøm, der løber i ledninger og modstande, og som ved gnidning i gennemløbet af strømmen frembringer varme.

1.2. Former for el

Elektricitet kan frembringes på forskellige måder, fx:

- Statisk elektricitet (ved gnidning)
- Galvanisk elektricitet (kemisk påvirkning) – *akkumulatorer (batterier)*
- Induceret elektricitet (elektromagnetisme) – *generatorer*

- Foeoelektricitet (lyspåvirkning) – *solceller og solpaneler*
- Piezoelektricitet (mekanisk påvirkning)
- Termoelektricitet (varmepåvirkning).

I dette kompendie behandles primært emnerne galvanisk elektricitet (DC – jævnstrøm) og induceret elektricitet (AC – vekselstrøm).

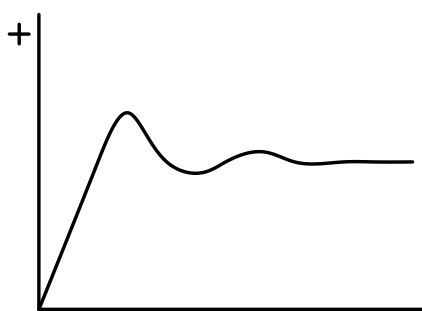
1.2.1 Jævnstrøm – DC

Ved jævnstrøm forstår man en elektrisk strøm, som vedvarende løber i samme retning gennem ledningen, men den behøver ikke at have konstant styrke. Det bedste eksempel er akkumulatorer (batterier).

DC kommer af det engelske begreb *direct current*, som betyder lige strøm.

Energikildens to poler benævnes henholdsvis positiv (+) og negativ (-).

Strømmen løber fra den positive pol mod den negative pol. I virkelighedens verden løber elektronerne den modsatte vej, altså fra den negative mod den positive pol. Dette skyldes, at elektronerne i princippet er negative, men strømmen ansues som noget positivt løbende fra den positive mod den negative pol, altså i den modsatte retning.



Figur 1: Jævnstrøm



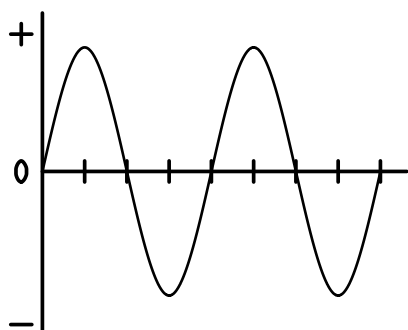
Figur 2: Symbol for jævnstrøm (DC)

1.2.2 Vekselstrøm – AC

Vekselstrøm vil sige en elektrisk strøm, som med små konstante tidsmellemrum skifter retning (+ og - skifter plads).

AC kommer af det engelske begreb *alternating current*, som betyder skiftende strøm.

Det er bl.a. den strøm, som leveres i stikkontakterne derhjemme. Her løber strømmen med 50 Hz, altså 50 perioder i sekundet, hvilket vil sige, at strømmen vender retning 100 gange i sekundet.



Figur 3: Vekselstrøm



Figur 4: Symbol for vekselstrøm (AC)

1.3. Definitioner

I det følgende vil de mest grundlæggende begreber defineres, såsom strøm, spænding, modstand, effekt og arbejde.

For at lette forståelsen for de kræfter, der spiller ind, vil der blive draget sammenligninger med et lukket væskekredsløb, da der her er mange lighedspunkter. Man kan her se pumpen som spændingsgiveren, trykfaldene som spændingsfald, væskeflowet som strømmen, den halvlukkede ventil eller haveslangen som modstanden.

1.3.1 Spænding

Spændinger kan opdeles i to forståelser: elektromotorisk kraft (E) og spændingsfald (ΔU). Nogle gange refererer man dog kun til U .

Man ser også på spændinger som potentialer (U), altså i forhold til et givent niveau.

Spændingen forplanter sig lynhurtigt gennem ledningen med ca. 300.000 km/s, altså med lysets hastighed.

1.3.1.1. Elektromotorisk kraft (E)

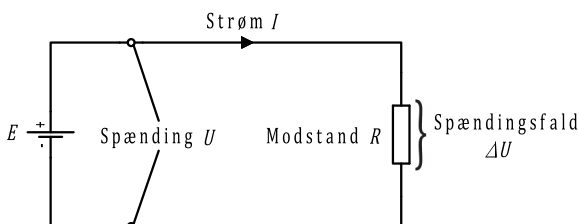
Elektromotorisk kraft måles i volt og er således ikke en kraft, men et arbejde pr. ladningsenhed. Jo større elektromotorisk kraft, jo flere elektroner (strøm) kan drives rundt i et kredsløb. Det er altså denne kraft, som sørger for, at strømmen (elektronerne) løber, når der er et lukket kredsløb.

Til sammenligning kan man bruge pumpen i et væskesløjfe. Det er altså det samme som det pumpetryk, som kan skabes i et væskesløjfe. Der snakkes altså her om givener til systemet.

For eksempel angives et batteri med den elektromotoriske kraft, som det kan bringe til et givent kredsløb, fx 1,5 V, eller et bilbatteri med 12 V. I stikkontakten er der 230 V, som er den spænding, vi kan tilslutte vores kredsløb. Dette er også kaldet den påtrykte spænding.

1.3.1.2. Spændingsfald (U)

Når strøm drives rundt i et kredsløb, vil der forekomme spændingsfald. Tilslutter man derfor en elektrisk brugsgenstand til den påtrykte spænding mellem to klemmer, vil der opleves et spændingsfald over brugsgenstanden, når denne gennemløbes af strømmen. Jo større strøm eller jo større modstand, jo større vil spændingsfaldet være.



Figur 5: Det simple kredsløb

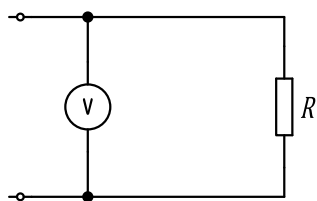
Til sammenligning kan man bruge en komponent eller et vandrør i et væske kredsløb. Jo mere vand der løber, eller jo mere man lukker for en ventil, jo større trykfald vil der være over komponenten. Et spændingsfald kan altså sammenlignes med et trykfald.

1.3.1.3. Måleenhed

Spændinger angives med enheden volt (V), og formelbenævnelsen er U .

For elektromotoriske kræfter er formelbenævnelsen dog E , for at man kan se forskel på den frembragte spænding (E) og de spændingsfald (U), der opleves i kredsløbet.

Ved spændingsmåling benyttes et voltmeter. Instrumentet tilsluttes parallelt over det, som skal måles, som vist på skitsen.



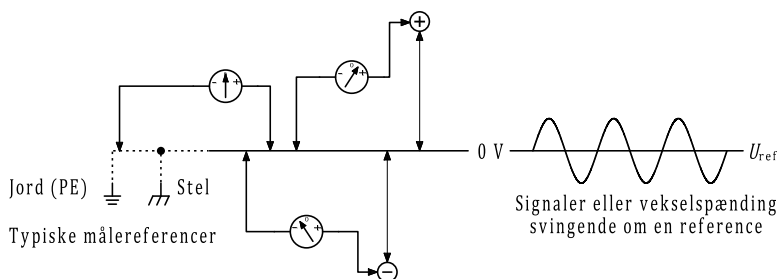
Figur 6: Måling af spænding U

Man vil altså kunne måle forskellen af spænding (se pkt. 1.3.1.4. [Potentiale](#)) før og efter brugsgenstanden. Denne spændingsforskel er det, der kaldes spændingsfald. Spændingsfald eller -forskel kan også benævnes i formler som ΔU (delta U).

Samtidig kan der også måles på den påtrykte spænding E , som er tilsluttet på klemmerne. Man kan derfor udlede ud fra skitsen, at spændingsfaldet U er lig med den tilsluttede spænding E . I afsnit 2.6. [Spændingskilder](#) vil der dog blive redegjort for, at klemspændingen U kan falde i forhold til den elektromotoriske kraft E grundet spændingsfald over forsyningens indre modstand R_i . I et væske kredsløb vil alle trykfaldene også være lig med det pumpetryk, som frembringes.

1.3.1.4. Potentiale

En spænding kan også angives i forhold til et andet niveau. Dette kaldes for et potentiale. Normalt er spændinger angivet i forhold til jord og kan både være negative og positive. Når der måles på spændinger som i 1.3.1.3. *Måleenhed*, er det altså forskellen mellem de to målte potentialer.



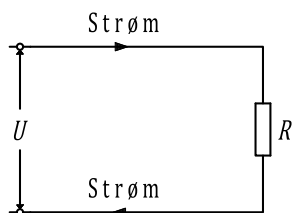
Figur 7: *Potentiale*

1.3.2 Strøm

Strømmen er en måleenhed for den mængde af elektroner, som passerer rundt i kredsløbet eller gennem et givent sted i kredsløbet pr. tidsenhed.

Når der er et lukket kredsløb, og kredsløbet er påtrykt en spænding, så vil der løbe en strøm. På samme måde vil en pumpe kunne få vand til at strømme i vandrør.

Strømmen bevæger sig i forhold til spændingen betydeligt langsommere, i visse tilfælde kun med nogle få cm/s.

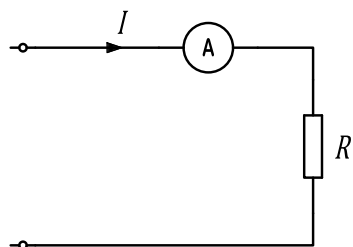


Figur 8: *Strøm i et lukket kredsløb*

1.3.2.1. Måleenhed

Strømmen angives med enheden ampere (A), og formelbenævnelsen er I .

Ved strømmåling benyttes et amperemeter. Instrumentet tilsluttes i serie som vist på skitsen.



Figur 9: Måling af strøm I

Man skal altså forestille sig et tælleapparat, som tæller mængden af elektroner, der passerer.

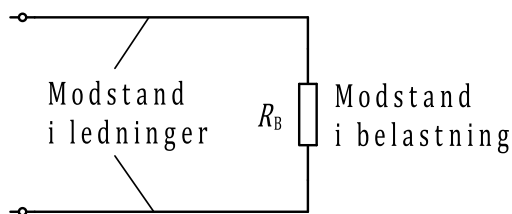
1.3.3 Modstand

En modstand er karakteriseret ved et materiales evne til at modstå gennemløbet af strøm. Alle materialer yder en modstand mod dette gennemløb af strøm og er afhængig af, hvor fast elektronerne er bundet til det stof, som udgør materialet. Jo større modstand, jo mindre strøm vil gennemløbes ved den samme påtrykte spænding.

Modsat kan man også sige, at et materiale har en vis ledningsevne, altså en evne til at lade elektroner "flyde". Jo større modstand, jo mindre ledningsevne.

En modstands størrelse afhænger foruden af materialet (modstandsfylden) også af længden og tværsnittet, og alle stoffer ændrer desuden modstandsværdi ved temperaturændring.

Ser man på et væske kredsløb, så har større rør en mindre modstand eller større ledeevne. Hvis en ventil lukkes, eller hvis man benytter en tyndere haveslange, så vil pumpen have sværere ved at opretholde væskeflow, som derfor vil blive mindre.



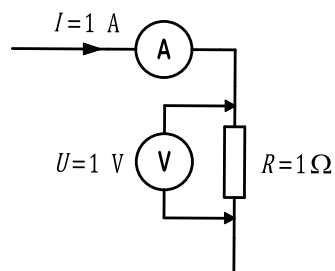
Figur 10: Modstande i et simpelt kredsløb

Figuren viser, at der er en modstand i et hvilket som helst materiale, også ledningerne, ligesom der også er modstand i vandrør og haveslanger. Når man regner på grundlæggende el-teori, ser man dog tit bort fra modstanden i ledningerne, da denne kan ses som ubetydelig. Det er først ved installationer, at man tager modstanden i ledningerne i betragtning.

1.3.3.1. Måleenhed

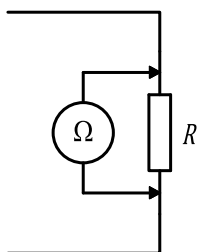
Modstand angives med enheden ohm (Ω), og formelbenævnelsen er R .

Enheden 1Ω kan udledes som den modstand, der ved en strømstyrke på 1 A skaber et spændingsfald på 1 V .



Figur 11: Definition af 1Ω

Ved modstandsmåling benyttes et ohmmeter. Instrumentet tilsluttes parallelt over komponenten som vist på skitsen.



Figur 12: Måling af modstand Ω

Eksempel

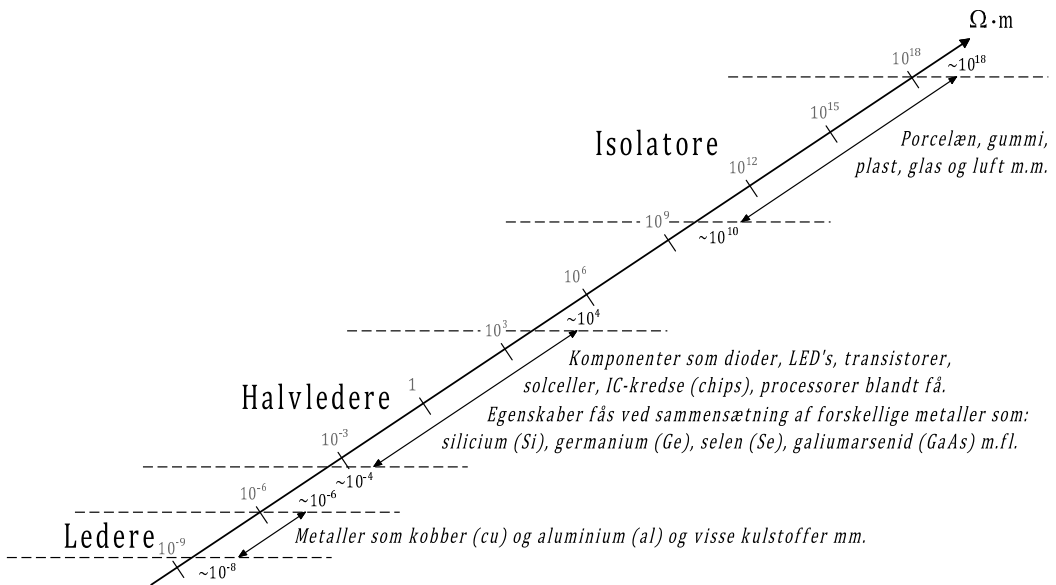
Forsøg viser, at en lang tråd yder en større modstand mod strømmen end en kort tråd.

Ligeledes yder en tynd tråd større modstand end en tyk tråd. Endelig har det anvendte materiale betydning for ledningsmodstanden.

1.3.3.2. Modstandstyper

Modstande er inddelt i tre forskellige typer. Der er de materialer, som er ledende, fx kobberet i en ledning, og isolerende materialer, som isoleringen på en ledning. Imellem disse to begreber ligger halvledere, som ikke kan defineres som det ene eller det andet. Som elektriker koncentrerer man sig ikke så meget om halvlederne.

De tre modstandstyper inddeles, som figuren viser:



Figur 13: Modstandstyper

Er elektronerne fast bundet til kernen (kun få "frie" elektroner), har strømmen svært ved at passere, altså stor modstand – dette er isolatorerne. Er der mange "frie" elektroner, har strømmen lettere ved at passere, altså er modstanden i det pågældende stof mindre – dette er lederne.

De tre modstandstyper kan kort beskrives med følgende:

Ledere

Stoffer med en meget lille modstand kaldes ledere, fx guld, sølv, aluminium og kobber. Kobber og aluminium bruges til elektriske ledninger. Sølv bruges til sikringstråd og belægning på kontaktflader.

Halvledere

Halvledere er en gruppe stoffer, der normalt hører under isolatorer, men som ved ydre påvirkning i form af spænding, varme eller lys kan lede en elektrisk strøm.

Eksempler på sådanne er: germanium, silicium og selen. Dette stof benyttes meget i elektronik for ensrettere og transistorer m.m.

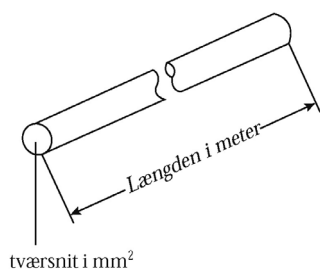
Isolatorer

Stoffer med så stor modstand, at strømmen vanskeligt kan passere, kaldes isolatorer.

Eksempler på sådanne er: plastik, porcelæn, gummi, papir og olie.

1.3.3.3. Ledningsmodstand

Modstanden i en ledning er afhængig af tre faktorer: ledningens tværsnitsareal, ledningens længde og lederens modstandsfylde, altså lederens specifikke modstand. De fire værdier har en samhörighed, som udtrykkes ved nedenstående formel:



$$R_l = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad [\Omega] \quad [1.1]$$

R_l er modstanden i Ω

ρ (rho): Lederens specifikke modstand $[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}]$

l : Installationslængden for brugsgenstanden [m]

S : Forsyningsledernes kvadrat $[\text{mm}^2]$

Figur 14: Ledningsmodstand

I formelen ses det, at ledningsmodstanden øges, hvis ledningens længde forøges, eller ledningsmaterialet har en større modstandsfylde. Til gengæld vil modstanden falde, hvis tværnittet på ledningen forøges.

Materialernes modstandsfylde kan findes i tabel 1 (se side 24).

Af formelen kan yderligere udledes:

$$l = \frac{R_l \cdot S}{\rho} \quad [\text{m}] \quad [1.2]$$

$$S = \frac{\rho \cdot l}{R_l} \quad [\text{m m}^2] \quad [1.3]$$

$$\rho = \frac{R_l \cdot S}{l} \quad \left[\frac{\Omega \cdot \text{m m}^2}{\text{m}} \right] \quad [1.4]$$

1.3.3.4. Modstandsfylde

Ved et stofs modstandsfylde forstås modstanden i 1 m af stoffet med et tværsnitsareal på 1 mm² og ved en temperatur på 20 °C; modstandsfylden kaldes også for den specifikke modstand og vil ved 20 °C angives som ρ_{20} .

Stoffernes specifikke modstandsfylde, ρ_{20} , er angivet i tabel 1 (se side 24).

1.3.3.5. Ledeevne

Ved et stofs ledenevne forstås stoffets evne til at lede strømmen. Man ser altså her på den modsatte evne i forhold til modstand.

Ledeevnen angives med enheden siemens (S), og formelbenævnelsen er G.

Ledeevne og modstand har et reciprok forhold til hinanden og er altså omvendt proportionale. Det vil sige, at når modstanden fordobles, så halveres ledenevnen.

Ledeevnen udtrykkes med følgende formel:

$$G = \frac{1}{R} \text{ [S] eller } [\Omega^{-1}] \quad [1.5]$$

1.3.3.6. Temperaturafhængighed

Alle stoffer ændrer modstandsværdi ved temperaturændring.

Modstandsværdiens ændring med temperaturen angives ved stoffets temperaturkoefficient α med Ω pr. $^{\circ}\text{C}$. Temperaturkoefficient α_{20} (alfa 20) er angivet i tabel 1 (se side 24). Værdien er angivet som de antal $\text{m}\Omega$ ($0,001 \Omega$), stoffet ændrer sig for hver grad celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Modstanden ved en given temperatur (R_T) kan findes ved en af følgende formler:

$$R_T = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (T - 20)) \text{ } [\Omega] \quad [1.6]$$

eller

$$R_T = R_{20} + R_{20} \cdot \alpha_{20} \cdot (T - 20) \text{ } [\Omega] \quad [1.7]$$

R_T er modstandsværdien ved den søgte temperatur

R_{20} er modstanden ved 20°C (den specifikke modstand)

α_{20} er materialets temperaturkoefficient

T er den søgte temperatur

$(T - 20)$ er altså temperaturforskellen mellem den specifikke og den søgte temperaur (Δt)

Stoffers specifikke modstand ρ_{20} og temperaturkoefficient α_{20} kan findes i nedenstående tabel:

Materiale	ρ_{20} $\left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}\right]$	α_{20} $\left[\frac{10^{-3} \Omega}{^\circ\text{C}}\right]$
Kobber	0,0175	3,93
Aluminium	0,0263	4,3
Aluminium, hårdt	0,0284	4,03
Aldrey	0,032	3,6
Sølv	0,0159	4,1
Konstantan	0,50	-0,04
Manganin	0,43	+0,03
Krom-nikkel (80-20)	1,05	0,13
Nikkel	0,072	6
Kanthal	1,45	0,06
Megapyr	1,40	0,04
Kviksølv	0,958	0,89
Wolfram	0,055	4,1
Guld	0,024	3,4
Cadmium	0,07	3,8
Jern	0,0978	6,4
Platin	0,09	4
Zink	0,059	4
Molybdæn	0,05	4
Beryllium	0,1	4
Iridium	0,065	3,6
Bly	0,2	4
Ståltråd	0,105-0,24	5,6- 3,2
Tin	0,10	4,3
Fosforbronze	0,12	0,7
Berylliumbronze	0,06	1,3

Tabel 1: Materialers modstandsfylde og temperaturkoefficient

ρ_{20} er stoffernes specifikke modstandsfylde ved 20 °C

α_{20} er stoffernes temperaturkoefficient angivet som de antal mΩ (0,001 Ω), stoffet ændrer sig for hver grad celsius (°C)

1.3.4 Effekt

Effekt udvikles, når en brugsgenstand, altså en modstand, gennemløbes af strøm. Idet elektronerne gnider sig op ad modstanden, vil der udvikles varme, som oversat er det, der kaldes effekt. Effekt kan også ses som arbejdhastighed, altså arbejds-mængde pr. tidsenhed.

For at strømmen vil løbe, skal der påtrykkes en spænding. I dette tilfælde vil modstanden opleve et spændingsfald, idet den gennemløbes af strømmen.

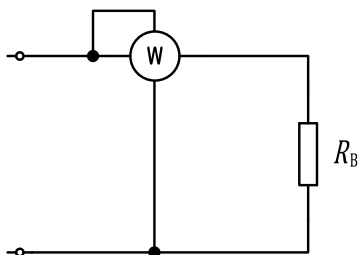
Derfor, når en el-brugsgenstand tilsluttes en spænding, gennemløbes brugsgenstanden af en strøm, og der udvikles effekt/varme.

Ser man på væskekredsløbet, så vil man også kunne levere mere varme, altså effekt, jo mere vand som løber gennem radiatoren.

1.3.4.1. Måleenhed

Effekt angives med enheden watt (W), og formelbenævnelsen er P .

Enheden 1 watt kan udledes som den effekt, som afsættes, når der ved en strømstyrke på 1 A skabes et spændingsfald på 1 V.



Figur 15: Måling af effekt

Effekten måles med et wattmeter. I virkelighedens verden består wattmeteret af både et voltmeter og et amperemeter. På skitsen kan også ses, at der er lavet både en parallel- og en seriemåling. Wattmeteret giver sit udslag ved, at det multiplicerer de to værdier.

Altså: effekt = spænding x strøm:

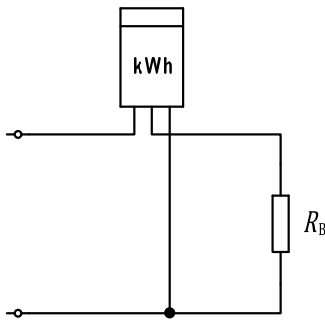
$$P = U \cdot I \text{ [W]} \quad [1.8]$$

1.3.5 Arbejde

Elektrisk arbejde kan udledes som produktet af den elektriske effekt og den tid, effekten afsættes i belastningen.

1.3.5.1. Måleenhed

Elektrisk arbejde angives med enheden wattsekunder (Ws, eller hyppigere kWh (kilowatt-timer)), og formelbenævnelsen er A.



Figur 16: Måling af elektrisk arbejde (kWh)

Effekten er den energi, som bliver afsat på tidspunktet. Det elektriske arbejde er den samlede energi, som er blevet afsat over tid. Ved at se på, hvor lang tid man har afsat en given effekt, kan man altså se, hvor meget arbejde der er udført. Det er denne værdi, kWh, elmåleren registrerer, som danner grundlaget for afregning af elektricitet.

Altså: arbejde = effekt x tid:

$$A = P \cdot t \text{ [Ws] eller [kWh]} \quad [1.9]$$

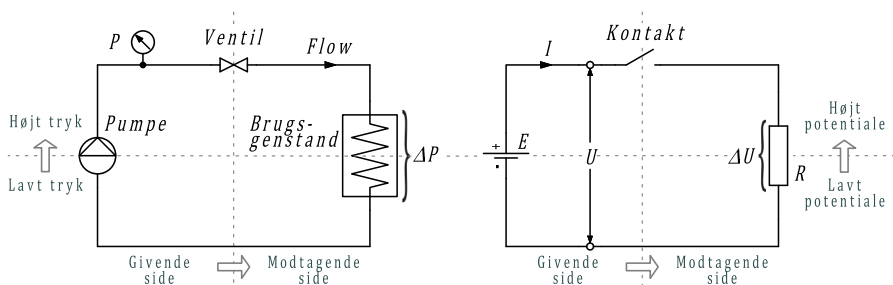
1.4. Opsummering

I det foregående er de vigtigste grundbegreber beskrevet, og i tabel 2 vises de forskellige måleenheder med forkortelser og deres formelbetegnelser. I det næste kapitel vil disse begreber sættes op mod hinanden og blive beskrevet med de forhold, som virker mellem dem. Det er blandt andet vha. Ohms lov, som beskriver forholdet mellem spænding (U), strøm (I) og modstanden (R).

	Måleenhed	Forkortelse	Formelbetegnelse
Strøm	ampere	A	I
Spænding	volt	V	U
Modstand	ohm	Ω	R
Effekt	watt	W	P
Arbejde	kilowatt-timer	kWh	A

Tabel 2: Grundbegrebernes måleenhed, enhedsforkortelse og formelbetegnelse

Som beskrevet tidligere kan man se en masse sammenligninger med et lukket væske kredsløb, fx en pumpe, der forsyner en radiator.



Væske Kredsløb	EL. Kredsløb	EL. Formel - Teori
Pumpe	Spændingskilde	E
P (tryk)	Spænding	U
Flow	Strøm	I
Ventil	Kontakt	
Δp (trykfald)	Spændingsfald	ΔU
Radiator E.lign.	Modstand	R

Figur 17: Det elektriske kredsløb sammenlignet med et lukket væske kredsløb

Begge kredsløb kan inddeles i fire kvadranter med nedenstående opdelinger:

- **Højt/lavt energipotentiale**

Pumpen giver et tryk, som er med til at drive et flow af væske. Ligeledes giver batteriet en forøgelse af spændingspotentialt, som kan drive elektronerne rundt i kredsløbet. Med denne forøgelse er der tilført energi til anlægget, som forsynes til forbrugerne.

Ved brugsgenstanden bliver denne energi brugt, og energiniveauet falder, hvorefter det returneres til pumpen/batteriet, som kan tilføre ny energi til anlægget.

- **Givende/modtagende**

Ved pumpen eller batteriet tilføres der energi til anlægget. Denne energi skal derefter transporteres ud til forbrugeren, som er modtager af denne energi.

Dette er også gældende i det store elektriske system, hvor kul, halm eller gas brændes af og tilfører energi til et dampsystem. Dampen transporteres i et lukket dampsystem til en dampturbine, der driver en generator. I dampturbinen tages energien ud af dampen for at drive generatoren, der tilfører elektrisk energi til vores store ledningsnetværk. Denne energi transporteres derefter ud til forbrugerne gennem store transformere og afleverer til sidst sin energi gennem vores elektriske apparater.

Kredsløbene tilføres altså energi i den givende ende, som transporteres ud til forbrugerne, som modtager energien. Det handler altså om transport af energi.

2. Jævnstrømsteori

Gennem jævnstrømsteorien ses på de forhold, som er gældende for de fem grundbegreber i første kapitel. Dette gøres bl.a. vha. Ohms lov og effektformlen.

Yderligere ses på forbindelsesmulighederne parallel-, serie- og blandede forbindelser, altså hvorledes vi kan anskue spændinger, strømme og modstande, samt de afsatte effekter, når vi blander forskellige forbindelser med flere modstande i kredsløbet. Til dette benytter vi Kirchhoffs love.

Til sidst gennemgås spændingskilder, og hvorledes de kan anskues i forskellige driftsforhold.

Grundlæggende sagt så består al forståelsen af el-teori vha. Ohms lov og Kirchhoffs love. Det er derfor basalt, at man forstår disse love. Er dette tilfældet, vil man kunne forstå langt de fleste situationer, som elektrikerer møder.

2.1. Ohms lov

Mellem spænding, strøm og modstand er der et afhængighedsforhold, som bevirker, at man ikke kan ændre en af delene, uden at mindst en af de andre også ændres.

Denne samhörighed mellem størrelserne U , I og R (se evt. 1.3.3. [Modstand](#)) udtrykkes ved nedenstående formel, kaldet Ohms lov:

Spænding = strøm · modstand:

$$U = I \cdot R \quad [\text{V}] \quad [2.1]$$

Ohms lov kan også omskrives til:

$$I = \frac{U}{R} \text{ [A]} \quad [2.2]$$

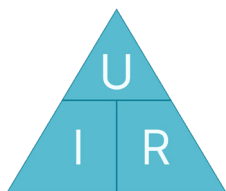
$$R = \frac{U}{I} \text{ [\Omega]} \quad [2.3]$$

Man ser altså, at der er en proportionalitet mellem de forskellige enheder. Ved konstant modstand og stigende spænding stiger strømmen tilsvarende; man siger, at spænding og strøm er ligefrem proportionale.

Ved konstant spænding og stigende modstand falder strømmen tilsvarende; man siger, at strøm og modstand er omvendt proportionale.

Disse tre formler skal en elektriker kunne udenad. Man skal altså have en direkte fornemmelse af forholdet mellem disse tre enheder.

Til en begyndelse kan man benytte nedenstående værktøj til at huske formlerne:



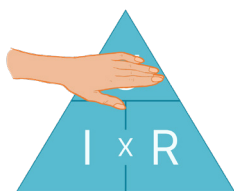
Figur 18: *Trekant til brug for udledning af Ohms lov*

Man skal forestille sig, at man lægger hånden over den enhed, man ønsker at finde. Derved fremstår den ligning, som man skal sætte op i formlen.

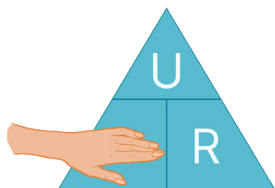
Skal man finde spændingen (U), lægger man altså hånden over U , og man vil have I og R stående ved siden af hinanden som i formlen:

$$U = I \cdot R \quad [\text{V}] \quad [2.4]$$

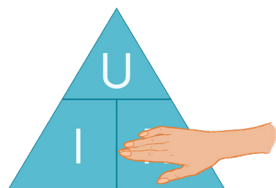
Ligeledes, hvis man lægger hånden over I eller R , vil U stå tilbage over brøkstregen, med enten I eller R stående under brøkstregen. Eksempler på brug af trekanten:



$$U = I \cdot R \quad [\text{V}] \quad [2.5]$$



$$I = \frac{U}{R} \quad [\text{A}] \quad [2.6]$$



$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad [2.7]$$

2.2. Forbindelsesmuligheder

Skal flere komponenter tilsluttes, kan disse tilsluttes enten i serieforbindelse, i parallelforbindelse eller som en blanding af begge dele i et kombineret kredsløb.

For at forstå hvordan strømme og spændinger fordeles sig i sådanne kredsløb, er det nødvendigt at kende et par grundlæggende regler kaldet Kirchhoffs love.

En vigtig ting at forholde sig til, når man regner på disse forbindelser, er, at en given modstand altid forholder sig til den respektive spænding og strøm. Altså:

$$U_{R_3} = I_{R_3} \cdot R_3 \quad [\text{V}] \quad [2.8]$$

2.2.1 Kirchhoffs 1. lov (parallelforbindelser)

Kirchhoffs 1. lov omhandler, hvordan man kan anskue, hvorledes strømmene deler sig i knudepunkterne. Knudepunkter findes bl.a. i parallelforbindelser. Loven er udformet i følgende tekst:

Kirchhoffs 1. lov: parallelforbindelser

Summen af strømme, der løber til et knudepunkt, er lig summen af strømme, der løber fra knudepunktet.

Man ser på, at den samlede strøm, som går til et knudepunkt på et givent tidspunkt, også er lig med de strømme, som går fra knudepunktet. Summen af strømme til og fra knudepunktet er altså altid i balance og vil udligne hinanden.

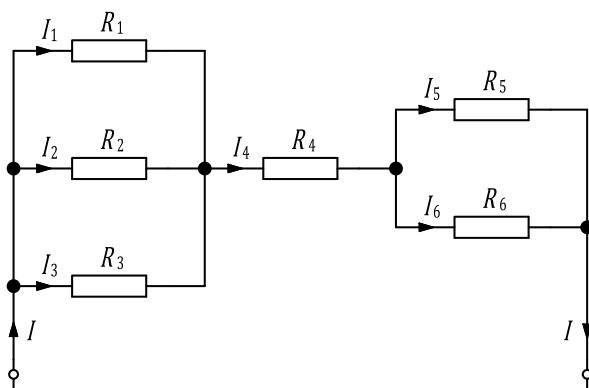
Grundlæggende kan man sige:

$$\Sigma I = 0 \text{ [A]} \quad [2.9]$$

eller

$$I_{\text{ind}} = I_{\text{ud}} \text{ [A]} \quad [2.10]$$

Ser vi på de to knudepunkter i fig. 19, så vil strømmen gennem R_4 bestå af alle strømmene fra R_1 , R_2 og R_3 lagt sammen, som samtidig er den strøm, der løber gennem R_5 og R_6 lagt sammen. Man kan se, at den totale strøm løber gennem R_4 , hvorfor man kan udlede, at den samlede strøm til kredsløbet er lig med I_4 .



Figur 19: *Eksempel på strømme i knudepunkter*

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = I_4 = I_5 + I_6 \text{ [A]} \quad [2.11]$$

På samme måde kan man se på et T-kryds i trafikken. Hvis 10 biler kommer til et T-kryds, så må der også være 10 biler, som forlader T-krydset. Fx 4 til højre og 6 til venstre. Dette forhold er selvfølgelig kun gældende, så længe der ikke er nogen, som kører i grøften.

Man kan også se på en forgrening i et vandrør. Den mængde vand, der kommer til forgreningen, må også være den mængde vand, som forlader forgreningen.

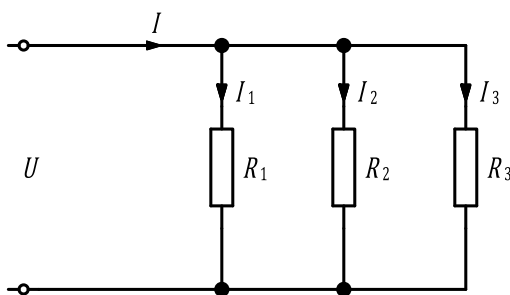
2.2.1.1. Parallelforbindelser

Tilsluttes modstande, så spændingen er fælles, kaldes det en parallelforbindelse. Nogle vil også kalde det en strømdeler.

I nogle kredsløb sættes en modstand parallelt for at justere på forholdene mellem strømmene. En sådan modstand kaldes for en shuntmodstand.

Parallelforbindelse

Spændingen over alle modstande er konstant, altså den samme.



Figur 20: Parallelforbindelse

Ser man på væskekredsløbet, kan man sammenligne det med en radiatorinstallation. Her vil trykket være det samme over alle radiatorerne, og væskestrømmen vil dele sig ud til de respektive radiatorer alt efter deres åbningsgrad på radiatorventilen/termostaten.

2.2.1.1.1. Strømme i parallelforbindelser

Strømmen i tilledningerne (I) er lig med summen af strømmene gennem de enkelte modstande iht. Kirchhoffs 1. lov.

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad [\text{A}] \quad [2.12]$$

Den samlede strøm kan findes vha. Ohms lov, hvis man kender den samlede modstand.

$$I = \frac{U}{R_{\text{parallel}}} \text{ [A]} \quad [2.13]$$

Ligeledes kan strømmen gennem den enkelte modstand findes ved Ohms lov:

$$I_2 = \frac{U}{R_2} \text{ [A]} \quad [2.14]$$

Strømdelingen er altså afhængig af den enkelte modstand, som den skal gennemløbe. Der, hvor der er mindre modstande, vil der også løbe en større strøm.

2.2.1.1.2. Modstande i parallelforbindelser

Den resulterende modstand (ΣR (sigma R)), altså den samlede oplevede modstand for kredsløbet, kan findes vha. Ohms lov ved at dividere den samlede strøm op i spændingen.

$$R_{\text{parallel}} = \frac{U}{I} \text{ [\Omega]} \quad [2.15]$$

Den resulterende modstand er altid mindre end den mindste af enkeltmodstandene. Idet den samlede strøm altid vil være større end de enkelte strømme, viser Ohms lov, at ved større strøm vil den samlede modstand også blive oplevet som mindre.

På samme måde kan man se på alle de mennesker, som forsøger at forlade en stor sal på samme tid. Her skal man se på dørene som modstande. Jo større en dør er, jo mindre modstand vil døren give. Hvis vi åbner flere døre, altså flere modstande, vil strømmen af mennesker stige, og vi kan se, at flere døre har mindsket modstanden mod menneskestrømmen.

Reciprokformlen

For opbygning af formlen for beregning af den samlede parallelle modstand skal man se på modstandenes ledningsevner lagt sammen:

$$G_{\text{parallel}} = G_1 + G_2 + G_3 \quad [\text{S}] \quad [2.16]$$

Da modstanden er omvendt proportional med ledningsevnen ($G = \frac{1}{R}$), kan formelen omskrives til det, man kalder reciprokformlen:

$$\frac{1}{R_{\text{parallel}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad [\Omega] \quad [2.17]$$

Denne formel kan omskrives til:

$$R_{\text{parallel}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \quad [\Omega] \quad [2.18]$$

På lommeregneren kan formelen skrives som:

$$R_{\text{parallel}}^{-1} = R_1^{-1} + R_2^{-1} + R_3^{-1} \quad [\Omega] \quad [2.19]$$

eller

$$R_{\text{parallel}} = (R_1^{-1} + R_2^{-1} + R_3^{-1})^{-1} \quad [\Omega] \quad [2.20]$$

Formlen kan også omskrives, hvis man skal finde en enkelt modstands værdi:

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{\text{parallel}}} - \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_3} \quad [\Omega] \quad [2.21]$$

eller

$$R_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{parallel}}} - \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_3}} \quad [\Omega] \quad [2.22]$$

Et eksempel kan være at se på tre radiatorer forbundet parallelt. Her vil den samlede tilførte mængde vand skulle fordele sig ud på de tre radiatorer. Vandtrykket for at drive vandet gennem alle radiatorerne vil være den samme, da der også lægger sig det samme trykfald over hver radiator. Den samlede modstand vil her være mindre end hver radiators modstand, da flere radiatorer må betyde nemmere gennemløb af den samlede mængde vand. Vi ser altså her på radiatorernes ledningsevne (evnen til at lede vandet) lagt sammen.

Ens modstande

Består kredsløbet af ens modstande, kan den samlede modstand findes ved:

$$R_{\text{parallel}} = \frac{R}{n} \quad [\Omega] \quad [2.23]$$

R er de enkeltes modstandes enkelte værdi

n er antallet af ens modstande

Eksempel

Fem modstande på hver $150 \, \Omega$ tilsluttes parallelt. Den samlede modstand findes ved:

$$R_{\text{parallel}} = \frac{R}{n} = \frac{150}{5} = 30 \, \Omega$$

2.2.2 Kirchhoffs 2. lov (serieforbindelser)

Kirchhoffs 2. lov omhandler serieforbindelser, hvor man kan anskue, hvorledes spændinger deler sig over de respektive modstande. Loven er udformet i følgende tekst:

Kirchhoffs 2. lov: serieforbindelser

I et lukket kredsløb er summen af de elektromotoriske kræfter (E) lig med summen af spændinger (spændingsfald – ΔU) over de enkelte modstande.

Man ser på, at den samlede spænding, som gives til et kredsløb på et givent tidspunkt, er lig med de spændingsfald, som opleves over modstandene i kredsløbet. Summen af elektromotoriske kræfter og de oplevede spændingsfald er altså altid i balance og vil udligne hinanden.

Det er dog vigtigt at se, at dette kun er gældende, når kredsløbet er lukket. Ved det lukkede kredsløb vil den resulterende strøm skabe spændingsfald, når den gennemløber modstandene. Er kredsløbet ikke lukket, vil den påtrykte spænding stadig være til stede, uden at der laves spændingsfald, da der ikke vil løbe nogen strøm. Man vil altså her opleve den elektromotoriske kraft som den påtrykte spænding på klemmerne.

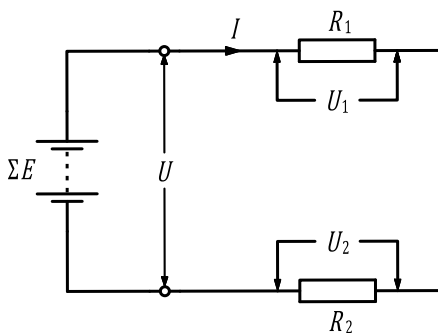
På samme måde kan man se på en vandhane. Selv om vandhanen er lukket, og der ikke løber noget vand, så vil der stadig være et givende tryk på vandhanen, altså en påtrykt spænding.

Grundlæggende kan man sige:

$$\Sigma E - \Sigma U = 0 \quad [\text{V}] \quad [2.24]$$

eller

$$\Sigma E = \Sigma U \quad [\text{V}] \quad [2.25]$$



Figur 21: Eksempel på spændinger i en serieforbindelse

Til en start ser man kun på den påtrykte spænding (U), som kan sammenlignes med det, der bliver givet til et kredsløb, hvorfor man kan se på balancen som:

$$U = U_1 + U_2 \text{ [V]} \quad [2.26]$$

Man kan her se på noget, som giver, og noget, som tager. Dette vil i sidste ende altid være det samme og skabe balance.

På samme måde kan man se på en rutsjebane. Den kan anskues som et lukket kredsløb, hvor alle vogne vil komme tilbage til start. Ligeledes må den højde, som vognene løftes i starten, også være den højde, som vognene skal falde på vej rundt for at komme tilbage til start.

2.2.2.1. Serieforbindelser

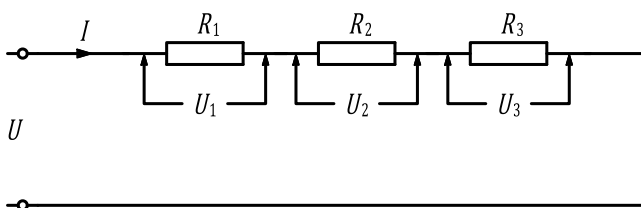
Tilsluttes modstande, så strømmen er fælles, kaldes det en serieforbindelse. Nogle vil også kalde det en spændingsdeler.

At komponenter serieforbindes, vil sige, at de forbindes i forlængelse af hinanden. Ved afbrydelse et sted i kredsen er alt afbrudt.

I nogle kredsløb sættes en modstand foran en anden for at justere på forholdene mellem spændingerne. En sådan modstand kaldes for en seriemodstand.

Serieforbindelse

Strømmen gennem alle modstande er konstant, altså den samme.



Figur 22: Serieforbindelse

2.2.2.1.1. Spændinger i serieforbindelser

Den påtrykte spænding (U) er lig med summen af spændingsfald over de enkelte modstande iht. Kirchhoffs 2. lov.

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad [\text{V}] \quad [2.27]$$

Den samlede spænding kan findes vha. Ohms lov, hvis man kender den samlede modstand.

$$U = I \cdot R_{\text{serie}} \quad [\text{V}] \quad [2.28]$$

Ligeledes kan spændingen over den enkelte modstand findes ved Ohms lov:

$$U_2 = \Delta U_2 = I \cdot R_2 \quad [\text{V}] \quad [2.29]$$

Spændingsdelingen er altså afhængig af den enkelte modstand, som den skal gennemløbe. En større modstand kræver et større spændingsfald for at trykke den samme strøm igennem.

2.2.2.1.2. Modstande i serieforbindelser

Den resulterende modstand (ΣR), altså den samlede oplevede modstand for kredsløbet, kan findes vha. Ohms lov ved at dividere den påtrykte spænding med strømmen.

$$R_{\text{serie}} = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad [2.30]$$

Den resulterende modstand kan også findes ved at lægge alle modstande i serieforbindelsen sammen, hvis man kender alle modstandsværdierne:

$$R_{\text{serie}} = R_1 + R_2 + R_3 \quad [\Omega] \quad [2.31]$$

Den resulterende modstand er altid større end den største af enkeltmodstandene.

Man kan se, at for at den samme strøm skal løbe gennem de samme serieforbundne modstande, må en ekstra modstand resultere i, at strømmen oplever en større modstand.

Et eksempel kan være at se på tre radiatorer forbundet i serie. Her skal den samme mængde vand gennembløbe alle tre radiatorer. Samtidig vil der lægge sig et trykfald over de enkelte radiatorer, som er afhængigt af hver radiators modstand for at drive den samme mængde vand igennem. Samtidig vil den samlede modstand for gennemløb af vandet være modstandene for alle tre radiatorer lagt sammen.

2.2.3 Blandede forbindelser

Med blandede forbindelser forstås sammensatte serie- og parallelkredsløb.

Her er det af stor vigtighed, at beregningerne foretages mellem sammenhørende værdier. Fx:

$$U_{R_3} = I_{R_3} \cdot R_3 \quad [\text{V}] \quad [2.32]$$

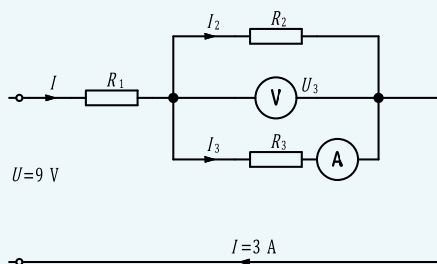
De foregående afsnit har behandlet rene serie- og parallelforbindelser. En blandet forbindelse er altså en kombination af begge. En blandet forbindelse indeholder altså både knudepunkter og modstande sat i forlængelse af hinanden.

Man kan både have serieforbindelser med parallelforbundne modstande og parallelforbindelser med serieforbundne modstande, eller flere kombinationer sat sammen.

Når man skal regne på blandede forbindelser, bliver man nødt til at opdele kredsløbet i de sammensatte serie- og parallelforbindelser ("rene" forbindelser), hvorefter man kan benytte sig af Ohms lov og Kirchhoffs love.

En god tilgang til at opbryde den blandede forbindelse er at opdele kredsløbet i dets knudepunkter.

Eksempel 1



Figur 23: Måling i
blandet forbindelse

Hvis instrumenterne i fig. 23 viser $U_3 = 6 \text{ V}$ og $I_3 = 2 \text{ A}$, kan R_3 beregnes:

$$R_3 = \frac{U_3}{I_3} = \frac{6}{2} = 3 \Omega$$

Herefter findes "rene" serie- eller parallelforbindelser.

Vi ved desuden, at $U = 9 \text{ V}$ og $I = 3 \text{ A}$.

R_2 og R_3 er en "ren" parallelforbindelse, dvs. $U_2 = U_3$ (Kirchhoffs 1. lov).

$$I = I_1 = I_2 + I_3 \text{ [A]} \Leftrightarrow$$

$$I_2 = I - I_3 = 3 - 2 = 1 \text{ A}$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{6}{1} = 6 \Omega$$

Vi har nu alle oplysninger for parallelforbindelsen. Vi kan nu forholde os til spændingen U_1 vha. Kirchhoffs 2. lov og kan nu regne på R_1 .

$$U = U_1 + U_{23} \text{ [V]} \Leftrightarrow$$

$$U_1 = U - U_{23} = 9 - 6 = 3 \text{ V}$$

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_1}{I} = \frac{3}{3} = 1 \Omega$$

Eksempel 2

Ovenstående eksempel kan også tilgås vha. en tabel, hvor man starter med at udfylde de kendte værdier.

Derefter kan man anskue Ohms lov for hver række og reglerne for Kirchhoffs love i kolonnerne.

Nye indsatte værdier står med rød, fed skrift. Tidligere indsatte værdier er i kursiv.

Komponent	Spænding (U)	Strøm (I)	Modstand (R)
R_1			
R_2			
R_3	6 V	2 A	
R_{total}	9 V	3 A	

Med Ohms lov kan vi altid finde en værdi, hvis vi har to kendte værdier. Vha. Ohms lov kan vi altså beregne de manglende værdier, R_{total} og R_3 , i en række, da vi har to kendte tal:

$$R_3 = \frac{U_3}{I_3} = \frac{6}{2} = 3 \, \Omega$$

$$R_{\text{total}} = \frac{U}{I} = \frac{9}{3} = 3 \, \Omega$$

Komponent	Spænding (U)	Strøm (I)	Modstand (R)
R_1			
R_2			
R_3	6 V	2 A	3 Ω
R_{total}	9 V	3 A	3 Ω

Vi kan nu indsætte kendte værdier med vores viden om serie- og parallelforbindelser, hvis vi ser på kolonnerne.

Vi ved, at R_2 og R_3 sidder i en ren parallelforbindelse. Spændingen må derfor være den samme (Kirchhoffs 1. lov):

$$U_2 = U_3 = 6 \text{ V}$$

Ligeledes ved vi, at strømmen gennem R_1 er den samme som den samlede strøm (Kirchhoffs 2. lov):

$$I_1 = \Sigma I = 3 \text{ A}$$

Komponent	Spænding (U)	Strøm (I)	Modstand (R)
R_1		3 A	
R_2	6 V		
R_3	6 V	2 A	3 Ω
R_{total}	9 V	3 A	3 Ω

Strømmen gennem R_2 kan findes ved differensen mellem den samlede strøm og strømmen gennem R_1 (Kirchhoffs 1. lov):

$$I_2 = I - I_3 = 3 - 2 = 1 \text{ A}$$

Ligeledes må spændingsfaldet over R_1 være differensen mellem den påtrykte spænding og spændingen over parallelforbindelsen (Kirchhoffs 2. lov).

$$U_1 = \Sigma U - U_{23} = 9 - 6 = 3 \text{ V}$$

Komponent	Spænding (U)	Strøm (I)	Modstand (R)
R_1	3 V	3 A	
R_2	6 V	1 V	
R_3	6 V	2 A	3 Ω
R_{total}	9 V	3 A	3 Ω

Nu kan de resterende modstandsværdier findes vha. Ohms lov:

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{3}{3} = 1 \, \Omega$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{6}{1} = 6 \, \Omega$$

Komponent	Spænding (U)	Strøm (I)	Modstand (R)
R_1	3 V	3 A	1 Ω
R_2	6 V	1 V	6 Ω
R_3	6 V	2 A	3 Ω
R_{total}	9 V	3 A	3 Ω

Til sidst kan man lave en kontrol af resultatet:

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_{23} = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = 1 + \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{1}{3}} = 1 + 2 = 3 \, \Omega$$

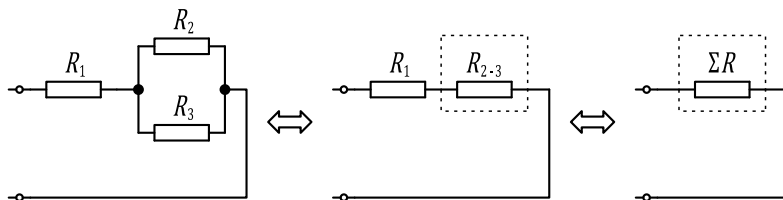
2.2.3.1. Erstatningsdiagram

Til at anskue en blandet forbindelse kan man benytte sig af erstatningsdiagrammer, også kaldet et ækvivalentdiagram.

Man kan erstatte en gruppe modstande med en fælles repræsenterende modstand, som anskuer den respektive fælles strøm og spænding.

Ved nedbrydning af et større kredsløb erstatter man altså de rene serie- eller parallelforbindelser en ad gangen.

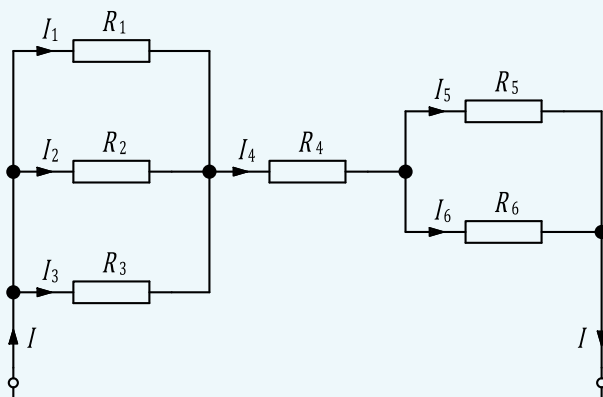
Fig. 24 viser, hvordan den blandede forbindelse i fig. 23 kan omdannes til erstatningsmodstande.



Figur 24: Erstatningsmodstand/ækvivalentdiagram

Eksempel

Vi vil her se på, hvorledes vi kan erstatte parallelforbindelserne med en fælles modstand.



Figur 25: Blandet forbindelse

Fig. 25 viser en blandet forbindelse, som er en serieforbindelse af to parallelle forbindelser med R_4 .

Man kan her ikke blot lægge R_1 , R_4 og R_6 sammen. Man bliver nødt til at anskue opstillingen mellem knudepunkterne, altså de "rene" serie-/parallelforbindelser. Dvs. at foran det første knudepunkt skal vi se på en parallelforbindelse. Det samme skal vi gøre

efter det andet knudepunkt. Når vi har fundet de resulterende modstande for vores to parallelforbindelser, kan vi lægge modstandene sammen som i en serieforbindelse.

$$R_{123} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \quad [\Omega]$$

$$R_{56} = \frac{1}{\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}} \quad [\Omega]$$

$$R_{\text{total}} = R_{123} + R_4 + R_{56} \quad [\Omega]$$

Benytter vi regler for Kirchhoffs love, vil vi kunne se, at modstandene R_1 , R_2 og R_3 har samme spænding. Ligeledes har R_5 og R_6 samme spænding.

$$U = U_{123} + U_4 + U_{56} \quad [\text{V}]$$

2.3. Effekt

Når den elektriske effekt i et jævnstrømsanlæg skal findes, bruges effektformlen:

$$P = U \cdot I \quad [\text{W}] \quad [2.33]$$

Effektformlen kan omskrives til:

$$U = \frac{P}{I} \quad [\text{V}] \quad [2.34]$$

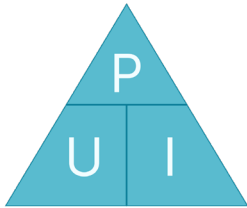
eller

$$I = \frac{P}{U} \quad [\text{A}] \quad [2.35]$$

Ligesom med Ohms lov ser man her en proportionalitet. Man kan ikke ændre på en af værdierne, uden at en af de andre værdier også må ændre sig.

Disse tre formler skal en elektriker også kunne udenad og have en direkte fornemmelse af forholdet mellem de tre enheder.

Til en begyndelse kan man også her benytte sig af trekanten for at huske formlerne:



Figur 26: Trekant for effektformlen

Eksempel

- Forsøg fx derhjemme at se på mærkepladen for en elkoger.
- Her bør man kunne udregne elkogerens modstand vha. oplysningerne om effekt og spænding samt Ohms lov.
- Man kan også forsøge at udregne modstanden for en brødrister eller et strygejern.
- Forsøg derefter at måle modstanden for at kontrollere beregningen.

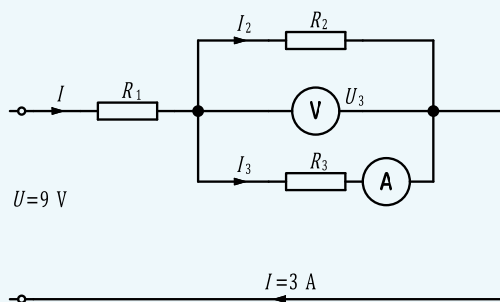
2.3.1 Beregning af effekter

Ved beregning af de afsatte effekter vil man tage summen af alle de respektive effekter. Her ser man ikke på serie- eller parallelforbindelser. Den effekt, der afsættes i hver modstand, afsættes uanset forbindelserne.

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3 \quad [\text{W}] \quad [2.36]$$

Et eksempel kan igen være at se på radiatorer. Her er det ligegyldigt, om de er forbundet parallelt, serielt eller med en blandet forbindelse. Afhængigt af trykfald og væskemængde gennem hver enkelt radiator, så vil den afgivne effekt fra hver radiator ikke have noget at sige for de andres afgivne effekt. Den samlede afgivne effekt kan altså blot findes ved at lægge de enkelte effekter sammen.

Eksempel



Figur 27:
Blandet forbindelse

Ser vi på den tidligere blandede forbindelse, kan vi indsætte de afsatte effekter i en ny kolonne i vores tabel:

Komponent	Spænding (U)	Strøm (I)	Modstand (R)	Effekt (P)
R_1	3 V	3 A	1 Ω	9 W
R_2	6 V	1 A	6 Ω	6 W
R_3	6 V	2 A	3 Ω	12 W
R_{total}	9 V	3 A	3 Ω	27 W

Vi kan beregne de respektive effekter for hver modstand vha. effektformlen:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = 3 \cdot 3 = 9 \text{ W}$$

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = 6 \cdot 1 = 6 \text{ W}$$

$$P_3 = U_3 \cdot I_3 = 6 \cdot 2 = 12 \text{ W}$$

$$P_{\text{total}} = U \cdot I = 9 \cdot 3 = 27 \text{ W}$$

Kontrol:

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3 = 9 + 6 + 12 = 27 \text{ W}$$

2.3.2 Sammensatte formler

Ved at indsætte Ohms lov i effektformlen kan man finde de afsatte effekter uden nødvendigvis at have spændingen eller strømmen til rådighed.

Erstatter man U med $I \cdot R$, får man:

$$P = U \cdot I = (I \cdot R) \cdot I \iff [2.37]$$

$$P = I^2 \cdot R \text{ [W]} [2.38]$$

Her ser man, at effekten er i anden potens af strømmen gennem en modstand. Øges strømmen med det dobbelte gennem modstanden, vil man derfor have fire gange afsat effekt.

Denne formel er vigtig for elektrikerer, da det er vigtigt at vide, at en dobbelt så stor strøm i ledningerne giver en fire gange så stor effektabsætning, og temperaturen stiger kraftigere. Dette er vigtigt for kablernes levetid og i værste fald for ledningssystemer, som kan brænde sammen.

Vi laver et eksempel med den samlede modstand fra forrige eksempel:

$$\Sigma P = \Sigma I^2 \cdot \Sigma R = 3^2 \cdot 3 = 9 \cdot 3 = 27 \text{ W} [2.39]$$

Erstatter man I med $\frac{U}{R}$, får vi:

$$P = U \cdot I = U \cdot \left(\frac{U}{R} \right) \iff [2.40]$$

$$P = \frac{U^2}{R} \text{ [W]} [2.41]$$

Her ser man, at effekten er i anden potens af spændingen over en modstand. Øges spændingen med det dobbelte over en modstand, vil man derfor have fire gange afsat effekt.

Vi laver et eksempel med den samlede modstand fra forrige eksempel:

$$P_{\text{total}} = \frac{U^2}{R_{\text{total}}} = \frac{9^2}{3} = \frac{81}{3} = 27 \text{ W} \quad [2.42]$$

Det kan konstateres, at selv om tabellen nu også indeholder en fjerde kolonne med effekt, så behøves stadig kun to værdier, for at man kan udfylde resten af rækken.

Der findes flere sammensatte formler mellem Ohms lov og effektformlen, men disse behandles ikke her.

2.4. Arbejde

Når det elektriske arbejde skal findes, bruges formlen:

$$A = P \cdot t \quad [\text{Ws}] \text{ eller } [\text{kWh}] \quad [2.43]$$

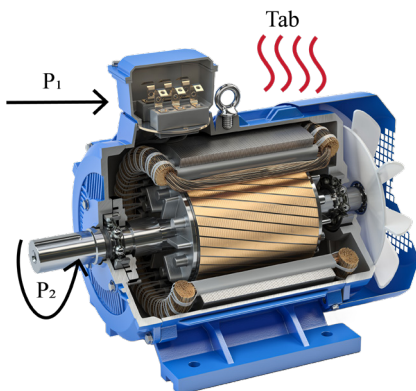
Se i øvrigt [1.3.5. Arbejde](#).

2.5. Virkningsgrad

Ved omsætning af effekt og arbejde fra én tilstand til en anden vil der forekomme tab. Dette tab forekommer af forskellige årsager, men vil i de fleste tilfælde forekomme grundet varmeafviklinger ved overførslen af energi.

Varmetabet stammer primært fra gnidninger i lejer m.m. og/eller fra strømvarmetab (varmeeffekt ved strøm i ledninger). Man kan også se et indre tab i spændingskilder, som vil blive behandlet i efterfølgende afsnit.

Vi tilfører altså noget til et anlæg, og dette omsættes til arbejde eller energi på afgang kombineret med tab:



Figur 28: Tilførsel og afgivelse af energi på et anlæg

$$\text{Arbejde:} \quad A_1 = A_2 + \text{tab} \quad [\text{Ws}] \text{ eller } [\text{kWh}] \quad [2.44]$$

$$\text{Effekt:} \quad P_1 = P_2 + \text{tab} \quad [\text{W}] \quad [2.45]$$

Forholdet mellem det tilførte og det afgivne kan udtrykkes i et forhold kaldet virkningsgraden, også benævnt η (eta):

$$\eta = \frac{A_2}{A_1} \quad [\quad] \quad [2.46]$$

eller

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad [\quad] \quad [2.47]$$

2.6. Spændingskilder

Af forskellige spændingskilder er fx batterier (elementer/akkumulatorer) eller generatorer. Spændingskilder er givne til vores elektriske systemer, og den tilførte spænding benævnes elektromotorisk kraft (E).

Tilfælles har alle spændingskilder en indre modstand (R_i). Når spændingskilden forsyner strøm til et kredsløb, vil der fremkomme et spændingsfald over den indre modstand (U_i), hvorfor man vil opleve forskellige spændinger på klemmerne alt efter forbruget.

Medregner man de spændingsfald, man vil opleve i det ydre kredsløb, kan følgende formel fra Kirchhoffs 2. lov anskues:

$$\Sigma E = \Sigma U \text{ [V]} \iff [2.48]$$

$$\Sigma E = U_{kl} + U_i \text{ [V]} [2.49]$$

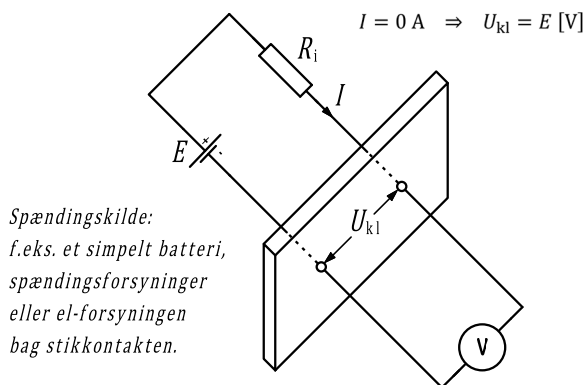
U_{kl} er klemspændingen, som er lig med de spændingsfald, som opleves i det ydre kredsløb.

U_i er spændingsfaldet over den indre modstand.

I dette afsnit vil de forskellige tilstande for spændingskilderne blive gennemgået: ubelastet, belastet og kortsluttet. Specielt kortslutningsforsøget er godt at kende for yderligere at forstå, hvad der sker ved kortslutninger i vores elektriske installationer.

Illustrationerne viser et batteri, men tilstandene er også gældende for andre typer spændingskilder.

2.6.1 Elektromotorisk kraft



Figur 29: Ækvivalentdiagram af spændingskilde i ubelastet tilstand

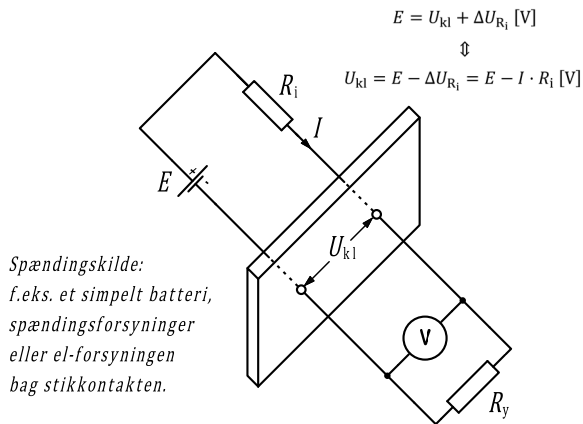
Tilsluttes et voltmeter over en energikildes to klemmer i ubelastet tilstand, måles den elektromotoriske kraft (E).

Da kredsløbet er åbent, vil der ikke løbe nogen strøm, og der vil ikke være noget spændingsfald over den indre modstand (R_i). Man vil derfor måle den påtrykte spænding på klemmerne som den elektromotoriske kraft.

$$\Sigma E = U_{kl} \text{ [V]}$$

[2.50]

2.6.2 Klemspænding



Figur 30: Ækvivalentdiagram af spændingskilde i belastet tilstand

Tilsluttes derefter en modstand, viser voltmeteret et mindre udslag end før. Spændingen på klemmerne er blevet mindre.

Denne mindre spænding kaldes klemspændingen. Som formeltegn benyttes U_{kl} .

2.6.3 Indre modstand

At spændingen over klemmerne falder, når der tilsluttes belastning, skyldes, at energikilden indeholder elektrisk modstand.

Denne modstand i selve energikilden kaldes den indre modstand. Som formeltegn benyttes R_i .

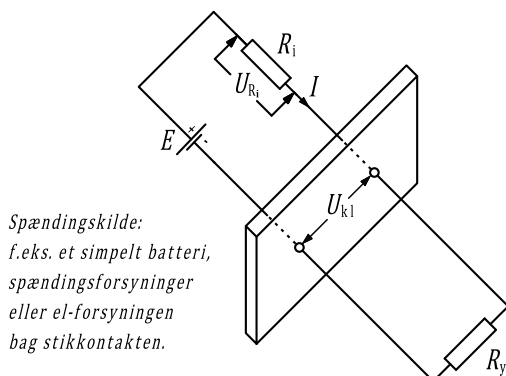
Der fremkommer altså et spændingsfald over den indre modstand, hvorfor der nu er mindre spænding til rådighed på klemmerne.

$$\Sigma E = U + U_i \text{ [V]} \quad [2.51]$$

eller

$$\Sigma E = U + I \cdot R_i \text{ [V]} \quad [2.52]$$

Forbrug $\uparrow\uparrow \Rightarrow I \uparrow\uparrow \Rightarrow U_{R_i} \uparrow\uparrow \Rightarrow U_{kl} \downarrow\downarrow$



Figur 31: Spændingsfald over indre modstand

Ved større forbrug vil klemspændingen falde yderligere.

Det er det, man oplever, når man tænder en elkedel eller en anden stor forbruger og ser lamperne falde i lysstyrke. Når strømforbruget stiger, vil spændingsfaldet i forsyningsledningerne stige, og man vil have mindre spænding til rådighed i stikkontakten. Fra stikkontakten anskuer vi en klemspænding og må se forsyningsledningerne som en slags indre modstand fra forsyningen.

2.6.4 Formler for spændingskilder

Til beregning på spændingskilder kan man benytte følgende formler:

$$\Sigma E = U_{kl} + U_i \quad [\text{V}] \quad [2.53]$$

$$\Sigma E = U_{kl} + I \cdot R_i \quad [\text{V}] \quad [2.54]$$

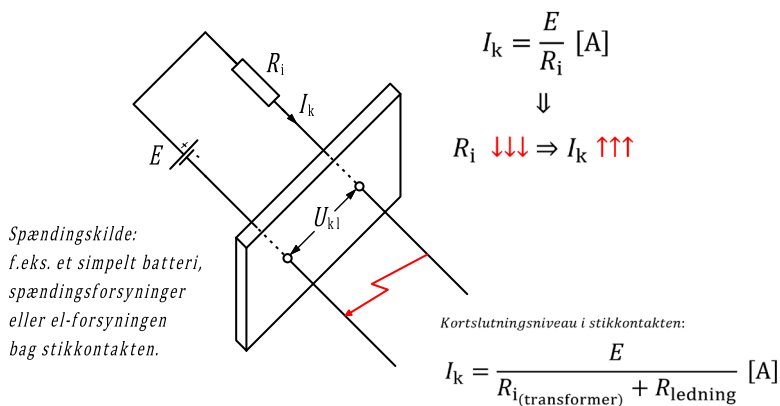
$$I = \frac{E}{R_y + R_i} \quad [\text{A}] \quad [2.55]$$

$$\Sigma R = R_y + R_i \quad [\Omega] \quad [2.56]$$

$$U_{kl} = I \cdot R_y \quad [\text{V}] \quad [2.57]$$

$$U_i = I \cdot R_i \quad [\text{V}] \quad [2.58]$$

2.6.5 Kortslutningsstrøm



Figur 32: Kortslutning af spændingskilde

Hvis man kortslutter klemmerne på spændingskilden, er der kun den indre modstand til at begrænse strømmen.

Størrelsen af denne kortslutningsstrøm (I_k) kan beregnes ved brug af nedenstående formel:

$$I_k = \frac{E}{R_i} \text{ [A]} \quad [2.59]$$

Selv om spændingen over energikildens tilslutningsklemmer muligvis er ganske lille, kan der godt opstå ret anseelige strømme ved kortslutning. Strømmen er nu kun begrænset af den indre modstand.

Et bilbatteri på 12 V kan give en anseelig stor strøm. Hvis man lægger en svensknøgle over klemmerne, kan man opleve, at strømmen er så stor, at svensknøglen svejser sig fast til klemmerne. Hvis man blot kortslutter batteriet med en ledning, vil man opleve, at ledningen hurtigt bliver så varm, at den brænder over.

Ligeledes kan man lave et forsøg med et lille 9 V's batteri.

Læg en mønt oven på et lille stykke mælkechokolade (gerne blødt), og stil derefter batteriet med polerne på mønten. Kortslutningsstrømmen vil varme mønten op og roligt smelte sig ned i chokoladen. Man vil også kunne mærke, at batteriet bliver varmt, da der nu bliver afsat en stor effekt i den indre modstand: $P = I^2 \cdot R_i$.

Har man derfor et batteri liggende i lommen sammen med en masse mønter, vil man opleve, at man bliver ganske varm på låret.

Det er derfor, man skal undgå kortslutninger i installationerne. Da kortslutningsstrømmen kun er begrænset af forsyningsledningerne, vil strømmen være så stor, at ledningerne kan blive beskadiget og i værste fald påsætte en brand.

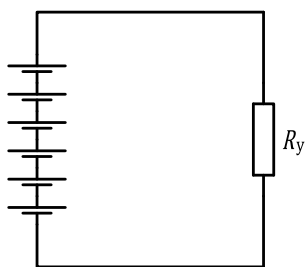
Eksempel

Et 1,5 V element med en indre modstand på 0,1 Ω kortsluttes. Find kortslutningsstrømmen:

$$I_k = \frac{E}{R_i} \text{ [A]}$$
$$\Downarrow$$
$$I_k = \frac{1,5}{0,1} = 15 \text{ A}$$

2.6.6 Kombinationer af spændingskilder

I nogle tilfælde er det nødvendigt med en større spænding, end man kan få fra et batteri. Det kan derfor være nødvendigt at serieforbinde flere batterier for at opnå denne spænding.

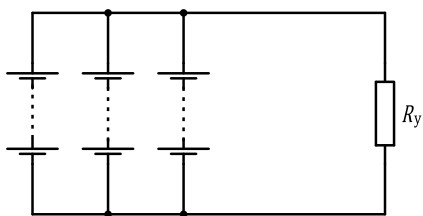


Figur 33: *Serieforbindelse af batterielementer*

Serieforbindes batterierne, vil den samlede elektromotoriske kraft adderes:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 \text{ [V]} \quad [2.60]$$

I visse tilfælde kan det have betydning, at batterierne ikke belastes for hårdt. Det kan derfor være nødvendigt at parallelforbinde flere batterier for at frembringe den nødvendige strøm.



Figur 34: *Parallelforbindelse af batterielementer*

Parallelforbindes batterierne, vil den elektromotoriske kraft være ens, men til gengæld har man øget forsyningen af strøm, uden at de enkelte batterier nødvendigvis bliver overbelastet.

$$\Sigma E = E_1 = E_2 = E_3 \text{ [V]} \quad [2.61]$$

Man kan altså anskue de elektromotoriske kræfter i forbindelser, som man ser på spændingsfald iht. Kirchhoffs love.

3. Elektromagnetisme

Der er en naturlig samhørighed mellem magnetisme og elektricitet – det, man kalder elektromagnetisme. Samhørigheden mellem disse to fænomener gælder begge veje.

Ved fremstilling af vekselspænding benytter man altså naturens evne til ved magnetisme at provokere naturen til at lede en strøm.

Samtidig kan man få strømmen til at frembringe magnetisme, hvilket er det, man benytter til at drive fx motorer.

Denne samhørighed og evne til at frembringe vekselspænding og drive motorer vil blive gennemgået i det næste kapitel.

3.1. Magnetisme

Magnetisme er opkaldt efter en lille by, Magnesia, i Asien, hvor der i større mængder forekommer jernmalme, som viser magnetiske egenskaber. Det vil sige, at de påvirker eller lader sig påvirke af andet jern.

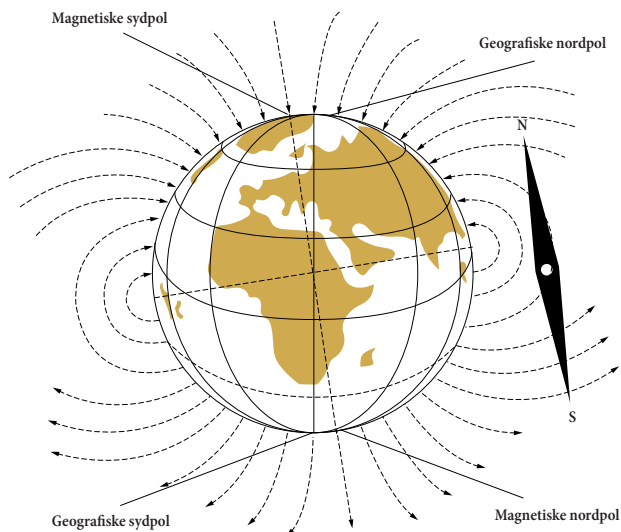
Jernmalm kaldes også magnetjernsten.

Foruden de i naturen forekommende magnetjernsten viser kun stål samt nogle enkelte metaller som nikkel og kobolt stærke magnetiske egenskaber.

Magnetismen kommer af partikler, som roterer om sig selv. Disse partikler kaldes for småmagneter, og i princippet har alle partikler denne egenskab. Det specielle ved magnetiske materialer er, at partiklerne ligger i en orden, hvor alle partikler ligger i samme retning, og dermed forstærkes de magnetiske egenskaber.

3.1.1 Jordmagnetisme

Ophænges en stangformet naturmagnet frit drejelig, vil dens ene ende pege mod jordens nordpol og den anden derfor mod sydpolen.



Figur 35: Jordmagnetisme

Forklaringen herpå er, at jordkloden i sig selv virker som en kæmpe-mæssig magnet, hvor jordens magnetiske sydpol ligger i nærheden af den geografiske nordpol, og den magnetiske nordpol ved den geografiske sydpol.

3.1.2 Kompasnålen

En kompasnål er en lille drejelig stangmagnet.



Figur 36: Traditionelt kompas

Den ene ende af kompasnålen, der peger mod jordens nordpol, kaldes nordpol, og den anden ende derfor sydpol.

I vore dage er en kompasnål ikke en naturmagnet; den fremstilles som en permanent stålmagnet.

Kompasset er opfundet af kineserne før Kristi fødsel. Man benyttede naturlige magneter, det vil sige fundne stykker af magnetjernsten.

Imidlertid opdagede man, at magnetismen lod sig overføre fra det naturlige magnetjern til andre jernstykker, og man bemærkede yderligere, at hærdet stål gav de mest holdbare magneter.

På almindelige skibskompasser fastgøres kompasnålen på undersiden af en kompasrose, som foruden nordretningen samtidig angiver alle andre kompasretninger.

3.1.3 Magneter

En magnet kendes på, at den tiltrækker jern. Magneter fremstilles i dag af forskellige legeringer, hvor jern eller jernpulver indgår, alt efter hvad magneten skal anvendes til.

Der skelnes mellem permanente magneter og elektromagneter.

3.1.3.1. Permanente magneter

Ordet permanent betyder vedvarende.

Permanente magneter fremstilles af hårdt stål og har den egenskab, at de holder magnetismen.

I dag er det muligt at fremstille meget kraftige magneter med små ydre dimensioner. Fremstillingen foregår ved, at selve støbningen af den færdige magnet sker i et meget kraftigt magnetfelt.

Tidligere anvendtes stållegeringer, hvor kulstof, krom, wolfram eller kobolt indgik.

I dag er det oftest betydeligt mere komplicerede legeringer, der anvendes, og som hovedsageligt består af jern, nikkel, aluminium samt diverse andre stoffer. Eksempler på disse legeringer er ticonal, alnico og alcomax.

Disse magneter bliver benyttet i komponenter, hvor man gerne vil beholde denne magnetisme uden at skulle benytte elektrisk kraft, og benyttes blandt andet i små jævnstrømsmotorer og ældre måleinstrumenter.

Hvis man forsøger at dreje blæseren i fx strømforsyningen til computeren, vil man mærke, at magneter forsøger at holde fanen i bestemte stillinger.

3.1.3.2. Elektromagneter

Elektromagneter er metaller, som magnetiseres ad elektrisk vej. Ved at vikle en ledning om en metalstang kan man skabe et magnetfelt vha. den magnetisme, som fremstilles ad strømmen i ledningen. Dette vil blive beskrevet i resten af kapitlet.

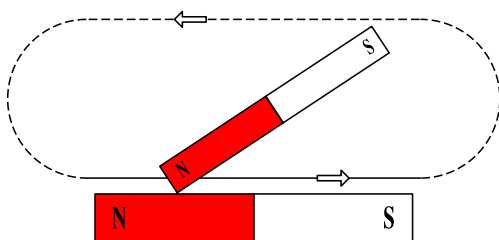
3.1.4 Op- og afmagnetisering

3.1.4.1. Opmagnetisering

Magnetisering kan fx ske ved produktionen af permanente magneter eller ad elektrisk vej. Man kan yderligere magnetisere jern ved bl.a. strygning.

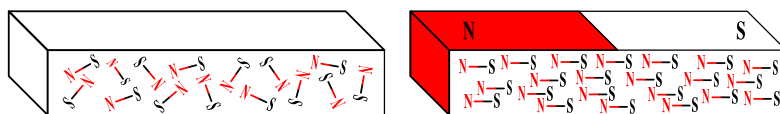
3.1.4.1.1. Magnetisering ved strygning

Magnetisering af en stålstang kan ske ved, at man stryger en permanent magnet gentagne gange i samme retning og i hele stångstens længde. Derved omdannes det før umagnetiske stål til en magnet.



Figur 37: *Magnetisering ved strygning*

Et billede på, hvad der sker, kan man få ved at tænke sig, at det umagnetiserede stål indeholder en mængde småmagneter, som ligger hult til bult. Disse vil blive strøget i samme retning og vil derfor styrke de magnetiske egenskaber for stålet.



Figur 38: *Ensretning af småmagneter*

Ved strygning med en magnet ordnes disse småmagneter, så de kommer til at ligge med nordpolen i én retning og sydpolen i den modsatte retning. Midt i stangen vil en lille magnets sydpol ligge imod en anden lille magnets nordpol, men ved stangens ender ligger en hel del nord- og sydpoler frit, hvorfor stålstangen får en magnetpol i hver ende.

I støbejern og blødt stål drejer småmagneterne sig lettere end i hårdt stål, men kommer til gengæld også lettere i uorden. I fx ankerblik i en elmotor, som er blødt stål, drejer småmagneterne sig på plads, så snart de udsættes for en magnetiserende kraft, men kommer delvis i uorden igen, så snart kraften ophører.

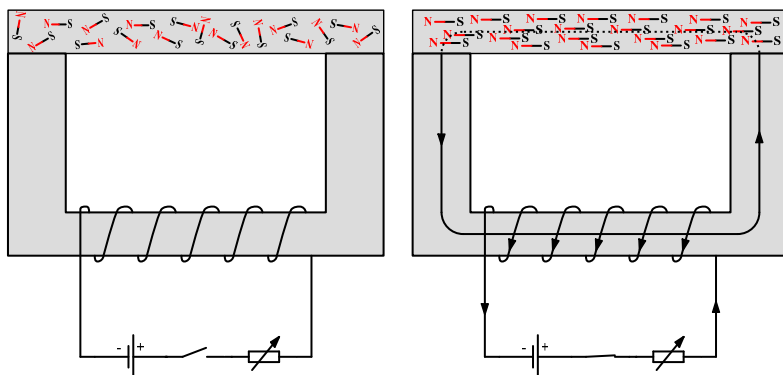
I hårdt stål kræver småmagneterne en stor kraft for at ordne sig, men beholder derefter deres stilling, selv om den magnetiske kraft ophører.

Lav eventuelt et forsøg, hvor der stryges med en magnet op ad en klinge til en nedstryger.

3.1.4.1.2. Magnetisering ad elektrisk vej

Det almindeligste er at opmagnetisere ad elektromagnetisk vej. Elektromagnetens spole tilsluttes en jævnspændingskilde, hvorved strømmen i spolen frembringer et magnetfelt, hvis retning er bestemt af strømretningen i spolen. Dette magnetfelt vil forløbe i kernen og gennem stålstangen.

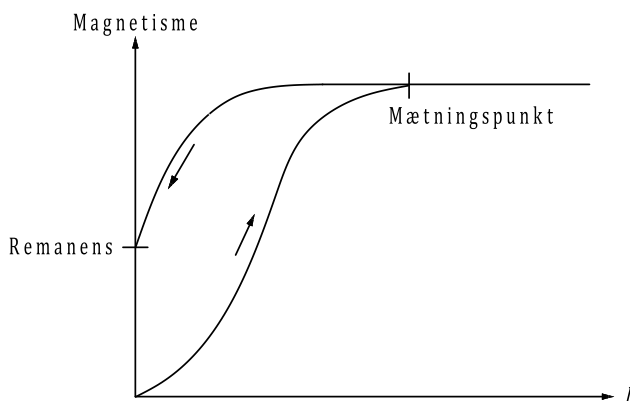
Når strømmen forøges, og magnetfeltet derfor forstærkes, vil stålstangens småmagneter påvirkes, så de drejer sig med nordpolerne i feltets retning.



Figur 39: Magnetisering ad elektrisk vej

3.1.4.2. Mætningspunkt

Når samtlige småmagneter i stålstangen er bragt i orden, er mætningspunktet nået, det vil sige, at der ikke ved fortsat strygning eller større strøm i elektromagnetens spole opnås en forøgelse af stålstangens magnetiske kraft.



Figur 40: Op- og afmagnetiseringskurve: Mætningspunkt og remanens

3.1.4.3. Remanens

Ligeledes kan man se på fig. 40, at når man slukker for strømmen, vil der stadig være småmagneter, som ikke vender tilbage til den totale uorden. Stålstangen vil altså bibeholde noget af sin magnetisme, hvilket kaldes remanens, altså den tilbageblivende magnetisme.

3.1.4.4. Afmagnetisering

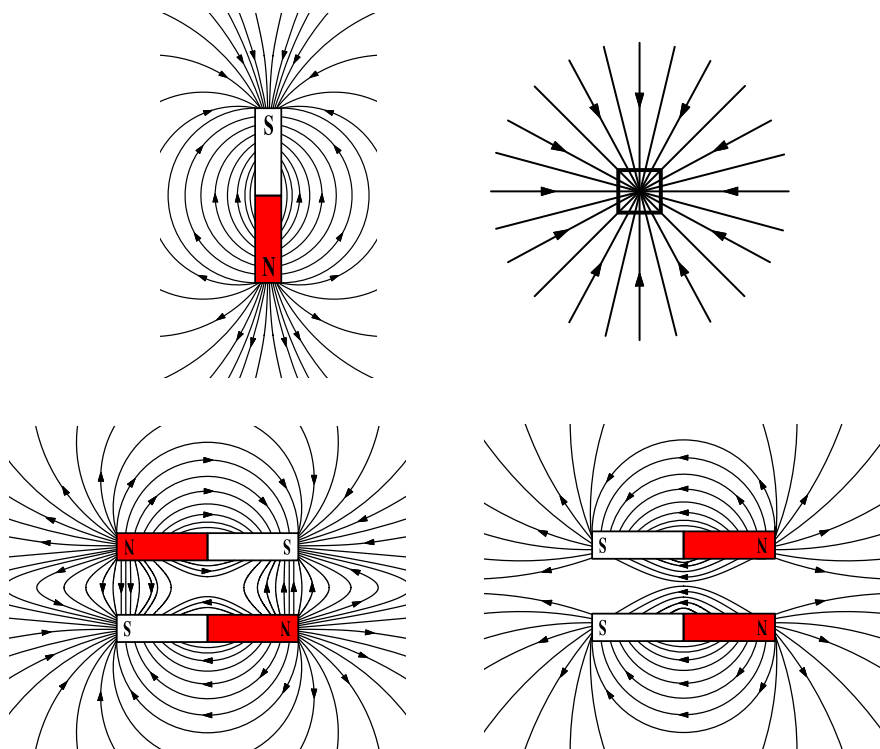
Afmagnetisering kan ske ved slag eller opvarmning. Yderligere kan man afmagnetisere ved at føre en mindre strøm i modsat retning for en elektromagnet.

Udsættes en permanent magnet for et slag i en bestemt retning, kan den derved miste hovedparten af sin magnetisme. Det er en af grundene til, at måleinstrumenter, hvori der findes permanente magneter, skal behandles med varsomhed.

Som beskrevet med det bløde stål, fx klingen til en nedstryger, er den nem at opmagnetisere, men den er lige så nem at afmagnetisere, hvis man banker den ned i bordet.

Desuden forsvinder magnetismen, når magneten opvarmes til ca. 700 °C. Temperaturen er varierende i forhold til typen af stål.

3.1.5 Magnetfelter



Figur 41: *Magnetfelter*

Anbringer man en magnets ene pol i nærheden af en anden magnets pol, vil der som nævnt optræde en tiltrækning eller en frastødning. En magnetpols virkning strækker sig altså ud i rummet udenom. Man siger, at der uden om magneten findes et magnetisk felt.

Man tænker sig ofte feltets karakter anskueliggjort ved hjælp af magnetiske kraftlinjer.

De magnetiske kraftlinjer tænkes at udgå fra magnetens nordpol og vende tilbage til dens sydpol.

Inde i magneten går kraftlinjerne videre fra sydpolen til nordpolen.

De magnetiske kraftlinjer danner altså lukkede kurver. Man kan altså se på lukkede kredsløb ligesom ved lukkede elektriske kredsløb.

Kraftlinjernes retning, feltets retning i et tilfældigt punkt, angiver den retning, hvori en nordpol vil påvirkes, hvis den anbringes i det pågældende punkt. Dette stemmer med, at kraftlinjerne udgår fra magnetens nordpol og vender tilbage til dens sydpol.

Hvis man skærer en magnet over på midten, vil man stå med to nye magneter, da de nye magneter stadig består af en masse småmagneter ordnet med polerne i samme retning.

Nærmer man en magnets ene pol til en anden magnets pol, vil de to magneter enten frastøde eller tiltrække hinanden, afhængig af om de enten er ens polede eller modsat polede.

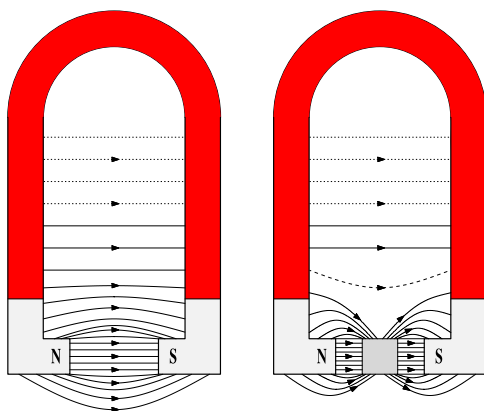
Ved permanente magneter har kun kurverne uden for magneten interesse, men ved elektromagneter har kraftlinjerne inde i magneten ofte interesse. Dette fordi man normalt forsøger at overføre de magnetiske egenskaber til en anden spole el.lign., hvorfor man gerne vil undgå den store modstand mod magnetisme i luften.

Man kan let udføre et forsøg, der viser feltets karakter.

Eksempel

På et bord lægger man en permanent magnet og derover et stift stykke papir. Af blødt stål filer man nogle spåner og drysser dem på papiret. Spånerne magnetiseres, og når man banker let på papiret, vil de lægge sig i et mønster, der er karakteristisk for den anvendte magnet.

Fig. 42 viser en hestekomagnet uden og med et anker af blødt stål. Man kalder stålkernen mellem magnetens poler for et anker.



Figur 42: Hesteskomagnet

Ankeret magnetiseres og tiltrækkes derfor af magneten. Da kraftlinjerne vil løbe den kortest mulige vej fra en nordpol til en sydpol, og da stålet leder de magnetiske kraftlinjer mange gange bedre end luft, vil kraftlinjerne i det tilfælde, hvor der er anker, søge gennem dette.

Ved at anvende en stålkerne får man altså en mindre spredning og derfor et kraftigere magnetfelt.

3.2. Elektromagneter

Den elektriske strøms magnetiske virkning blev i 1820 påvist af den danske professor H.C. Ørsted. Han opdagede, at en bevægelig magnetnål bliver påvirket til drejning, når den anbringes i nærheden af en strømførende leder. H.C. Ørsted kunne altså påvise, at der er en sammenhæng mellem elektricitet og magnetisme – det, vi kalder elektromagnetisme. Ligesom en elektrisk ledet strøm har påvirkning på et magnetisk felt om lederen, lige så vel har magnetiske felter en påvirkning på strømmen i en leder, hvis kredsen er lukket.

Elektromagnetismen bliver i dag brugt i en utrolig stor skala og gav bl.a. anledning til, at Nikola Tesla kunne udbygge vekselstrømsgeneratoren og -motoren, som stadig er de mest anvendte komponenter i dag for fremstilling af vekselstrøm og drift af elektriske motorer. Grunden til dette er, at med elektromagnetismen kan man overføre

energien mellem stator og rotor uden nogen berørende dele, hvorfor de er nemme at bygge og drive.

I dette afsnit behandles denne sammenhæng mellem elektrisk strøm og magnetisme.

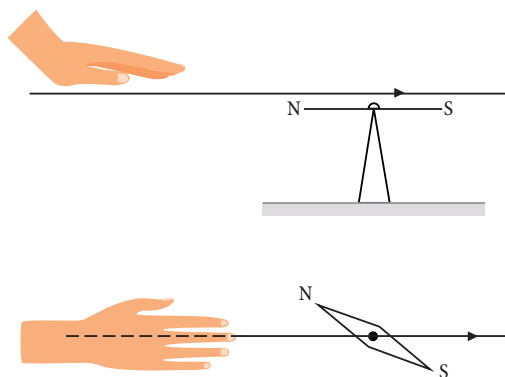
3.2.1 Højrehåndsregel

Det er altså påvist, at når en leder er strømførende, vil der dannes et roterende magnetfelt rundt om lederen. Hvis man derfor placerer en magnetnål, fx et kompas, under lederen, vil kompasset give udslag til en given retning.

Retningen af udslaget findes ved hjælp af højrehåndsreglen.

Højrehåndsregel

- Man lægger højre hånd langs lederen med fingrene i strømmens retning og med håndfladen vendt mod magneten.
- Magnetens nordpol vil da slå ud til den side, hvor tommelfingeren befinder sig.
- Magnetens nordpol vil da slå ud til den side, hvor tommelfingeren befinder sig.

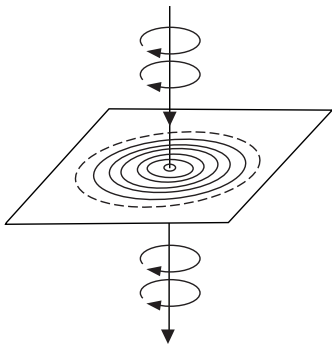


Figur 43: Udslag på magnetnål ved placering under en strømførende leder

Strømmens magnetiske virkninger udnyttes i moderne elektricitetsproduktion, i motorer, mange apparater og instrumenter mv.

Lader man en strømførende leder gå gennem et stykke karton, der er bestrøet med jernfjlespån, vil disse ordne sig i cirkler omkring lederen.

Enhver strømførende leder er omgivet af et magnetisk felt, og feltet er kraftigst inde ved lederen og aftager hurtigt udefter.



Figur 44: *Magnetiske feltlinjer omkring en strømførende leder*

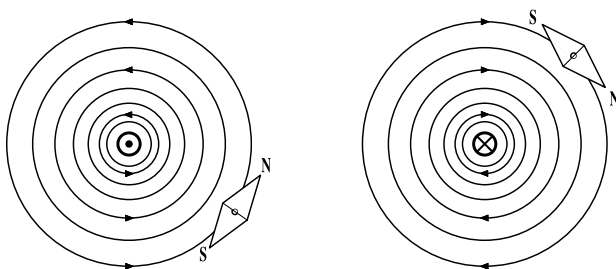
3.2.1.1. Proptrækkerregel

Retningen af feltet huskes lettest ved den såkaldte ”proptrækkerregel”. Denne regel er en anden huskeregel til ”højrehåndsreglen”:

Proptrækkerregel

Skrues en højreskåren proptrækker frem gennem ledningen i strømmens retning, vil proptrækkerens omdrejningsretning angive feltretningen.

Magnetfelternes retning kan også vises i et plan vinkelret på lederen, hvor strømmen enten kommer ud fra papirets plan eller ind i papirets plan.



Figur 45: Magnetfelter set i et plan vinkelret på lederen

Når man anskuer strøm komme ind i eller ud af papiret, kan man angive det med en prik eller et kryds.

- Prikken angiver spidsen af en pil på vej ud af papiret. Man ser altså spidsen komme imod os.
- × Krydset angiver styrefanerne/fjerene på en pil på vej ind i papiret. Man ser altså pilen forlade os.

3.2.1.2. Alternativ "højrehåndsregel"

At forestille sig hånden over en leder med kompasnålen nedenunder kan være lidt svært for nogle. I stedet kan man enten benytte "prop-trækkerreglen" eller endnu en alternativ regel.

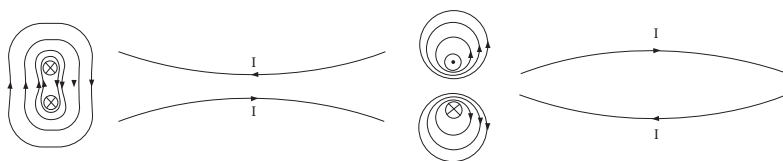
Alternativ højrehåndsregel

Hvis man med højre hånd holder om lederen med tommelfingeren i strømmens retning, vil magnetfeltet dreje i fingrenes retning.

Prøv at se, om den alternative højrehåndsregel passer med illustrationerne i fig. 44 og 45.

3.2.2 Gensidig påvirkning mellem to parallelle ledere

Ligesom magnetiske poler tiltrækker eller frastøder hinanden, vil de roterende magnetiske felter om strømførende ledere have samme egenskab. To retlinede, parallelle ledere, som gennemløbes af en strøm, vil derfor påvirke hinanden magnetisk.



Figur 46: Magnetisk påvirkning på to parallelle strømførende ledere

- Går strømmene i samme retning, tiltrækker lederne hinanden.
- Går strømmene i modsat retning, frastøder lederne hinanden.

Dette er vigtigt, når store kabler bl.a. fører meget store kortslutningsstrømme. Ud over at lederne kan have effekt på hinanden, kan det skabe forstyrrelser i nærliggende installationer eller ligefrem få kablet til at flytte sig.

- Ved en 1- eller 2-faset kortslutning vil strømmene løbe i hver sin retning i lederne. Her vil lederne forsøge at frastøde hinanden.
- Ved 3-fasede kortslutninger vil strømmene skiftevis gå i vekslende retninger. Hvis man i en stor forsyningstavle har skinner-systemer, vil skinnerne skiftevis frastøde og tiltrække hinanden. Det er her vigtigt, at fastgørelsen af skinnerne kan holde til denne kraft.

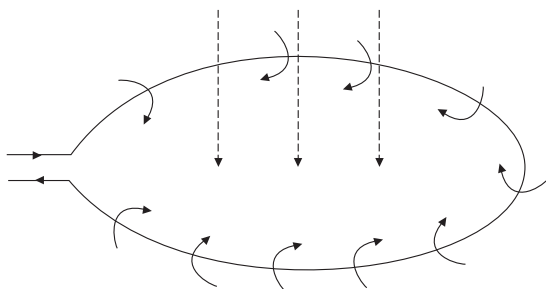
3.2.3 Spole

Bøjes en leder i cirkelform, vil magnetfeltet omkring lederen danne et felt med retning vinkelret på lederens plan.

Det ses af højrehåndsreglen, at alle kraftlinjerne inde i sløjfen vil have én retning og uden for den modsatte retning.

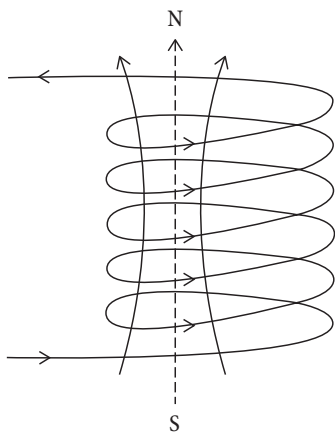
Sløjfen virker altså som en flad magnet, da alle magnetfelter går i samme retning inde i sløjfen.

Sløjfen er her defineret som en vinding.



Figur 47: *Magnetfelt i en ledersløjfe*

Hvis man vikler lederen op i en spole, vil hver vinding optræde som en cirkulær leder med et magnetfelt vinkelret på lederens plan; felterne fra de enkelte vindinger vil understøtte hinanden, og der vil dannes et for spolen fælles magnetfelt, så spolen udadtil optræder som en magnet, hvis poler befinder sig i spolens endeflader. Magnetfeltets størrelse er altså forstærket lige så mange gange, som man har vindinger i forhold til en enkelt sløjfe/vinding.



Figur 48: *Magnetfelt i en spole*

Man kalder sådan en spole for en elektromagnet eller en solenoide. Den har et feltbillede, der svarer til en stangmagnets.

3.2.3.1. Spoleregel

Polerne i en spole kan bestemmes ved højrehåndsreglen, også her kaldet spolereglen.

Spolereglen

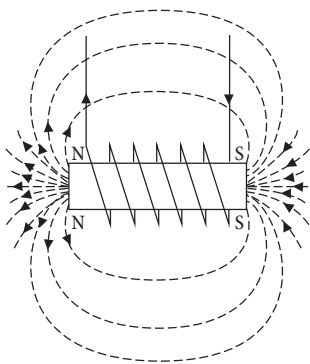
Man griber med højre hånd om spolen med fingrene i strømmens retning. Spolen vil da have nordpol til den side, hvor tommelfingeren befinder sig.

3.2.3.2. Spole med jernkerne

Anbringer man en stålkerne i spolen og sender samme strømstyrke gennem spolen som før, vil virkningen af magneten blive kraftigere. Det magnetiske felt er blevet mangedoblet.

Den evne til således at mangedoble magnetismen, som stålet her afslører, skyldes stålets permeabilitet.

Permeabiliteten er stålets magnetiske ledeevne og betegnes ved bogstavet μ (my), der er en talfaktor, som angiver, hvor mange gange stålet leder magnetismen bedre end luft.



Figur 49: Spole med jernkerne

De legeringer, der anvendes som kernemateriale, er sædvanligvis de såkaldte magnetiske bløde materialer, det vil sige ferromagnetiske (*ferro* betyder jern) stoffer med ringe remanens. De er dermed nemme at magnetisere og slipper nemt magnetismen igen, når man slukker for spolen.

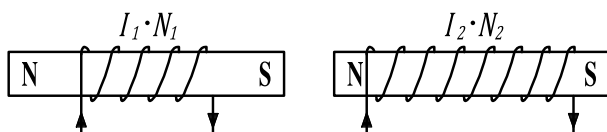
3.2.3.3. Amperevindinger

Det viser sig, at styrken af det magnetiske felt vokser proportionalt med såvel strømstyrken som antallet af vindinger. Dette udtrykkes ved, at magnetfeltet er afhængigt af amperevindingerne.

Ved amperevindinger, AV , forstås:

$$AV = I \cdot N \quad [\text{amperevindinger}] \quad [3.1]$$

N er et udtryk for antallet af vindinger i spolen.



Figur 50: Amperevindingstal (AV)

Eksempel

En spole har 600 vindinger og kræver til magnetisering en strøm på 2,5 A.

Hvor mange vindinger skal spolen have, hvis magnetiseringsstrømmen kun skal være 1,5 A?

Den magnetiserende kraft frembringes af et amperevindingstal:

$$AV = I_1 \cdot N_1 = 2,5 \cdot 600 = 1500 \text{ AV} \quad [3.2]$$

$$I_2 \cdot N_2 = 1500 \text{ AV} \quad [3.3]$$

$\Downarrow$

$$N_2 = \frac{1500}{1,5} = 1000 \text{ vindinger} \quad [3.4]$$

3.3. Induktion

Induktion fremkommer ved, at naturen forsøger at opretholde balance. Naturen er altså imod enhver form for ændring af de nuværende tilstande.

Bevæges en leder derfor i et magnetfelt, eller en magnet løber forbi en leder, så den overskærer de magnetiske kraftlinjer, vil der i lederen induceres en spænding. Denne spænding benævnes elektromotorisk kraft (E).

Lederen inducerer denne kraft, da den forsøger at modvirke ændringen ved selv at lede en strøm i en sådan retning, at kraften udlignes. Denne strøm vil dog kun løbe, hvis lederen befinder sig i et lukket kredsløb.

Dette naturfænomen er det, man udnytter i generatorer og motorer.

Retningen af den inducerede elektromotoriske kraft findes ved Lenz' lov.

3.3.1 Michael Faraday

I år 1831 opdagede den berømte engelske fysiker Michael Faraday den elektriske induktion.

Faraday påviste, at der i en spole induceres en spænding, når den bevæges i et magnetfelt.

Hvis spolen indgår i et lukket kredsløb, vil strømretningen være sådan, at den modvirker ændringen i de magnetiske forhold.

3.3.2 Lenz' lov

Imidlertid havde Faraday ikke den store matematiske forståelse, hvorfor Lenz senere kunne opsætte udtrykket i en matematisk formel.

$$e = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ [V]} \quad [3.5]$$

Formlen fortæller, at jo flere feltlinjer, Φ (phi), lederen overskærer på en given tid, jo mere elektromotorisk kraft vil induceres i øjeblikket.

At formelen er negativ, fortæller netop, at den inducerede elektromotoriske kraft forsøger at modvirke bevægelsen. Den elektromotoriske kraft har altså en sådan retning, at en strøm fremkaldt af den vil søge at modvirke den årsag, som frembragte den.

For nu er det ikke vigtigt at forholde sig nærmere til formelen. Den fortæller blot, at jo hurtigere man bevæger lederen, eller jo stærkere magnetfeltet er, jo mere elektromotorisk kraft vil der blive induceret i lederen.

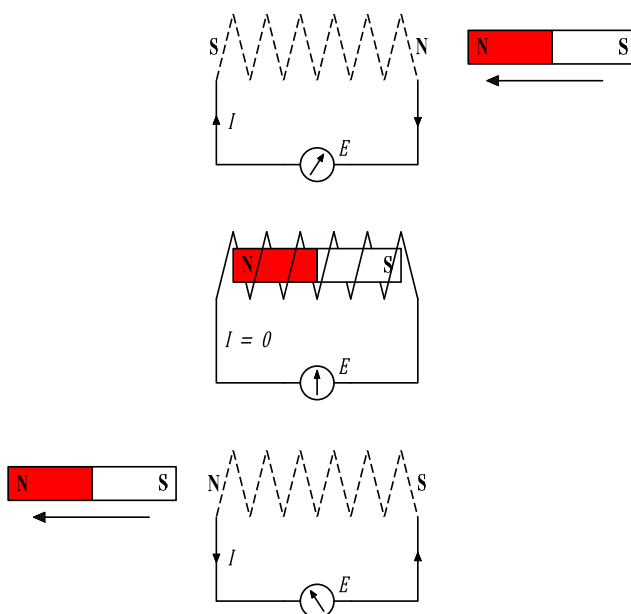
3.3.3 Induktionsprincippet

Skydes den viste permanente magnet ind i spolen, vil der induceres en spænding og dermed en strøm med en sådan retning, at spolen prøver at holde stangmagneten ude; det vil sige, at spolen danner en nordpol til højre og en sydpol til venstre.

Spolen forsøger at modarbejde indskydelsen af magneten, altså bevægelsen af stangmagneten eller ændringen af magnetfeltet.

Når magneten er anbragt midt i spolen eller ikke er i bevægelse, vil den inducerede spænding være nul, og dermed er der ingen strøm. Her er der altså ikke behov for at modarbejde noget.

Trækker man på ny magneten ud af spolen, til venstre, vil der induceres en spænding og dermed strøm af modsat retning, idet der fremkaldes en sydpol i højre ende og en nordpol i venstre ende af spolen, som igen søger at undgå ændringen af de magnetiske forhold.



Figur 51: Induktion af E ved bevægelse af magnet

Når magneten er trukket helt bort fra spolen, vil spænding og strøm være nul.

Der induceres altså kun spænding i spolen, så længe de magnetiske forhold ændres.

Den inducerede spændings størrelse afhænger af:

- den permanente magnets styrke
- magnetens bevægelseshastighed
- antal vindinger på spolen.

Inden for stærkstrømsteknikken omtales to former for induktion, hvorved der frembringes elektrisk spænding: elektromagnetisk og elektrodynamisk induktion. Disse henholder sig til generatorer og motorer, som er beskrevet og illustreret i de næste afsnit.

3.3.3.1. Elektromagnetisk induktion (generator)

En maskine, der får tilført mekanisk kraft fra fx en dieselmotor, damp turbine eller lignende og derved omdanner den mekaniske energi til elektrisk energi, kaldes en generator.

Tidligere kaldte man de maskiner, der frembringer jævnspænding, for dynamoer, og de, der frembringer vekselspændinger, for generatorer. Nu benævnes begge kategorier generatorer.

Generatoren genererer altså vores elektricitet ved elektromotoriske kræfter frembragt ved induktion, når en magnet bevæger sig forbi en spole. Dette er yderligere beskrevet i afsnit [3.4. Generatorregel \(højre hånd\)](#).

3.3.3.2. Elektrodynamisk induktion (motor)

Ændres de magnetiske forhold om en leder, induceres der spænding i lederen.

Det variable magnetfelt, som indvirker på lederen, behøver ikke at stamme fra en bevægelig permanent magnet, men kan lige så godt skabes af en elektromagnet.

I visse tilfælde er det mere fordelagtigt at lade elektromagneten være stillestående, men ændre magnetfeltet ved at ændre strømstyrken i magnetens spole.

Man taler da om elektrodynamisk induktion, hvilket benyttes i motorer. Dette er yderligere beskrevet i afsnit [3.5. Motorregel \(venstre hånd\)](#).

3.4. Generatorregel (højre hånd)

Generatorer benytter sig som tidligere nævnt af den elektromagnetiske induktion.

For at kunne forstå, hvordan elektricitet frembringes, gennemgås her produktionen af vekselstrøm ved drejning af en ledersløjfe placeret i et homogent magnetfelt.

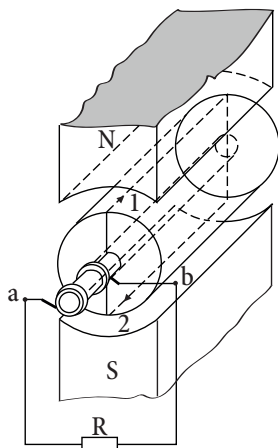
Ud fra Lenz' lov bestemmes strømretningen i en ledersløjfe, hvilket kaldes "generatorreglen":

Generatorregel (højre hånd)

Man anbringer sin højre hånd således, at kraftlinjerne går ind i håndfladen, og tommelfingeren peger i bevægelsesretningen. Der går da strøm i retning af fingerspidserne.

Imellem to magnetpoler anbringes et cylindrisk anker af jern, som kan drejes rundt. Ankerviklingen består her kun af én vinding, hvis sider 1 og 2 befinder sig i luftmellemrummet mellem magnetpolerne og ankeret. Viklingen ligger derfor i et homogent (ensartet) magnetfelt gående fra nordpolen mod sydpolen.

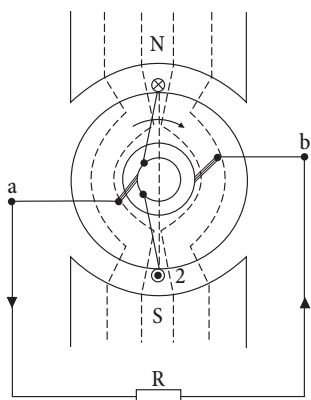
Viklingens ender er forbundet til to kontaktringe, og den inducerede strøm aftages gennem to børster, som glider på kontaktringene og er forbundet til maskinens ankerklemmer a og b.



Figur 52: Tegning af rotor med ledersløjfe i homogent magnetfelt

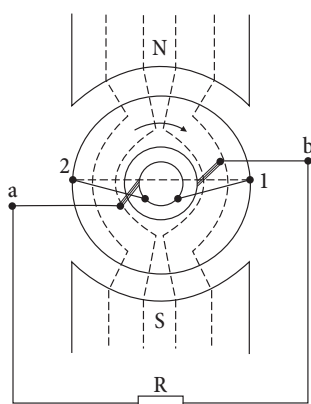
Ved generatorprincippet påvirker man med en kraft lederen inde i magnetfeltet og får derved induceret en spænding og følgelig en strøm gennem sløjfen.

Betragter man en række stillinger af ankerviklingen under dennes rotation, vil der i den viste stilling være den største spændingsforskel mellem klemmerne a og b, idet viklingens sider her bevæger sig vinkelret på kraftlinjerne, der er angivet ved punkterede linjer.



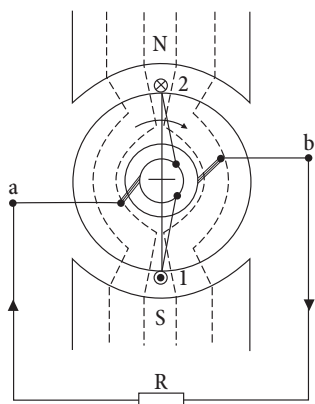
Figur 53: Ledersløjfens placering vandret på magnetfeltet

Når ankeret drejes videre, vil den inducerede spænding blive mindre, fordi der pr. tidsenhed skæres færre kraftlinjer, og når ankeret har drejet sig en kvart omdrejning, vil spændingen mellem klemmerne være nul, fordi viklingens sider nu bevæger sig parallelt med kraftlinjerne.



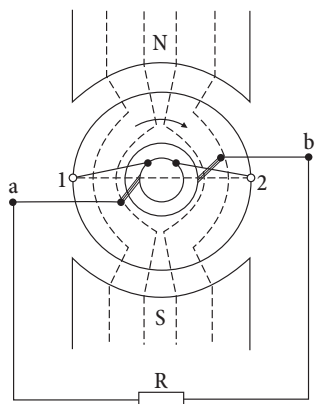
Figur 54: Ledersløjfens placering lodret på magnetfeltet

Efter yderligere en kvart omdrejning vil spændingen mellem klemmerne a og b atter have den størst mulige værdi, men med modsat fortegn. Punkterne 1 og 2 har nu bevæget sig en halv omgang og gennemskærer nu feltet i modsat retning, hvorfor den inducerede elektromotoriske kraft er modsat.



Figur 55: *Ledersløjfen efter en halv rotation*

En kvart omdrejning senere vil spændingen mellem a og b atter være nul.



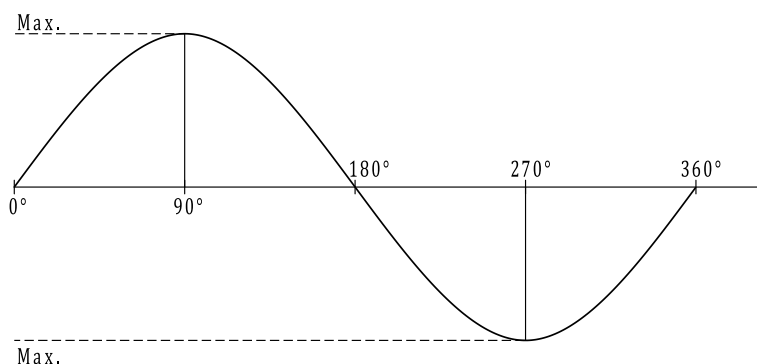
Figur 56: *Ledersløjfen returnerende til udgangspunktet*

I løbet af den sidste del af omdrejningen vokser spændingen til den værdi, den havde i den først betragtede stilling.

Mellem klemmerne a og b vil der således fremkomme en periodisk varierende spænding, når ankeret drejes rundt mellem magnetpolerne.

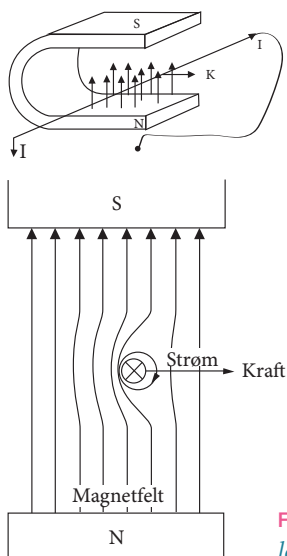
Tiden for en periode er lig med tiden for en omdrejning. En spænding, der varierer på denne måde, kaldes en vekselspænding.

Ved passende udformning af magnetpolerne kan man opnå, at spændingen kommer til at variere efter en sinuskurve:



Figur 57: Fremstilling af sinuskurve med en ledersløjfe i generator

3.5. Motorregel (venstre hånd)



Figur 58: Kraftpåvirkning på strømførende leder i et homogent magnetfelt

Det er påvist, at enhver strømførende leder omgives af et magnetfelt, og at to magnetfelter i nærheden af hinanden vil udøve gensidig kraftpåvirkning.

Anbringes en strømførende leder i et magnetisk felt, påvirkes lederen af en kraft, der søger at bevæge lederen på tværs i magnetfeltet.

På tegningen er vist en leder set i snit; krydset angiver strømretningen ind i papiret.

Magnetfeltet omkring den strømførende leder danner en lukket ring.

Dette felt indvirker på hovedfeltet N-S, så der til højre for lederen frembringes en feltsvækkelse og til venstre en tilsvarende feltforøgelse.

Lederen vil derved blive påvirket af en kraft K , der søger at drive den ud af hovedfeltet som antydnet med pilen.

Kraftens størrelse afhænger af magnetfeltets styrke og strømstyrken i lederen samt den længde, som lederen befinder sig med i magnetfeltet.

Dette princip benyttes til at drive en motors rotor.

Ved motorprincippet placeres en strømførende ledersløjfe i et magnetfelt og vil i dette blive påvirket af en kraft, der søger at trække lederen ud af feltet.

Bevægelsesretningen kan bestemmes ud fra motorreglen, som benytter venstre hånd:

Motorregel (venstre hånd)

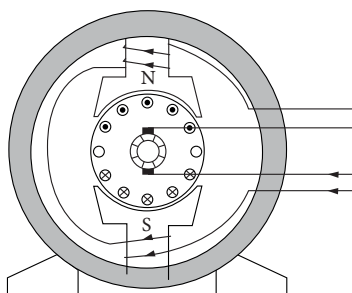
Man anbringer sin venstre hånd således, at de magnetiske kraftlinjer går ind i håndfladen, og fingerspidserne peger i strømretningen. Lederen vil da bevæge sig til tommelfingersiden.

En god huskeregel er, at man benytter venstre hånd ved magnetiske kraftpåvirkninger, som i bokseudtrykket ”en lige venstre”.

Nogle benytter sig dog af højre hånd, hvorfor de kigger på kraftens retning til lillefingerens side.

Fig. 59 viser skematisk en jævnstrømsmotor. Med de antydende poler og strømretning i ankerspolerne vil de øverste ledere påvirkes til drejning mod højre og de nederste mod venstre.

Motoren vil køre højre om.



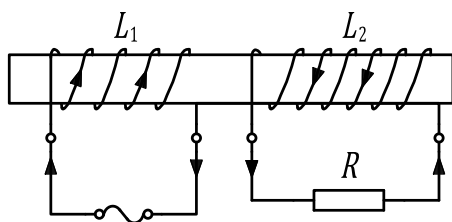
Figur 59: Jævnstrømsmotor

3.6. Transformerprincippet/gensidig induktion

En jernstang omvikles med to adskilte spoler, L_1 og L_2 .

Sender man vekselstrøm gennem spolen L_1 , altså en varierende strøm, vil magnetfeltet ændres. Som modreaktion vil der derfor til stadighed induceres vekselspænding og vekselstrøm i spolen L_2 .

Strømmen i L_1 skaber et magnetfelt i jernstangen, og denne magnetisme inducerer derefter en elektromotorisk kraft i L_2 . Dette kaldes for gensidig induktion og benyttes i transformere.

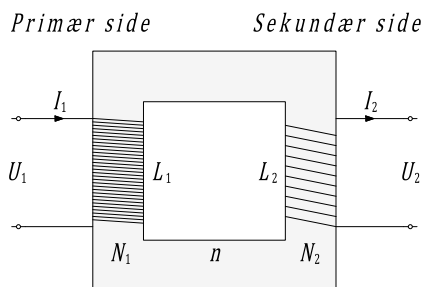


Figur 60: Gensidig induktion

Den kraftigste virkning opnås, når den magnetiske modstand er mindst mulig.

I reglen udformer man derfor jernkernen som en lukket ring.

Apparatet kaldes da en transformer, og L_1 kaldes primærviklingen, mens L_2 kaldes sekundærviklingen.



Figur 61: Transformer

I hver af sekundærspolens vindinger vil der induceres en vis vekselspænding, og da vindingerne er serieforbundne, kan der opnås fx 100 gange så stor spænding ved at udføre L_2 med 100 vindinger i stedet for én. Udføres L_2 med 100 gange så mange vindinger som L_1 , vil sekundærspændingen være ca. 100 gange primærspændingen.

Spændingsforholdene mellem primær- og sekundærsiderne er derfor ligefrem proportionale med antallet af vindinger.

Formeltegnet n angiver transformerens omsætningsforhold og kan udtrykkes som:

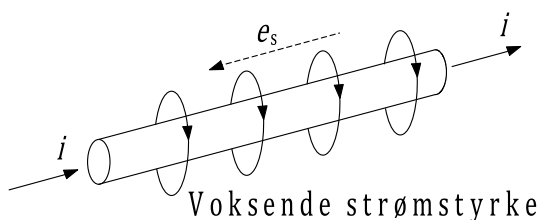
$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad [\quad] \quad [3.6]$$

Disse forhold vil yderligere blive gennemgået i kapitlet omkring transformere.

3.7. Selvinduktion

Som beskrevet tidligere så er naturen doven og vil altid forsøge at opretholde sin nuværende tilstand. Man taler også her om ”aktion lig reaktion”.

Enhver ændring af de magnetiske forhold omkring en leder vil inducere en spænding i lederen. Men ændringen i magnetfeltet kan skyldes, at strømmen i den samme leder varierer. Betragter man en strømløs leder, som man derefter sender strøm igennem, vil der omkring lederen opstå et koncentrisk magnetfelt som vist. Men i den tid, da dette felt opstår, vil der i lederen induceres en spænding, som søger at modvirke feltets opståen. Dette fænomen kaldes selvinduktion og vil oprette en modsatrettet elektromotorisk kraft e_s .



Figur 62: Selvinduktion

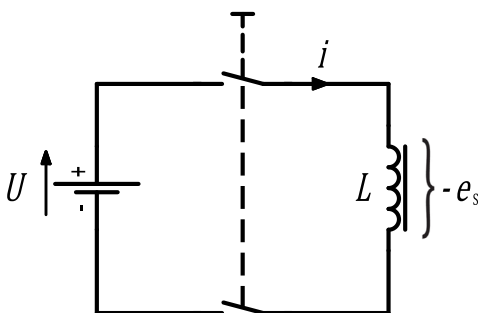
Resultatet bliver, at når man sætter spænding på lederen, vil strømmen ikke vokse øjeblikkeligt til sin endelige værdi – det vil vare en vis tid.

Spændingens virkning forplanter sig meget hurtigt ud i ledningen, nemlig med en fart af ca. 300.000 km/s. Strømmen i en leder er som

nævnt en bevægelse af negativ elektricitet; denne bevægelse foregår i øvrigt højst med en fart af få cm/s.

I en kort, ret leder er den inducerede modspænding meget lille og i reglen uden betydning. Men i en spole med mange vindinger og en stor stålkerne kan selvinduktionen spille en betydelig rolle.

På figuren er vist en opstilling med en spole i forbindelse med en jævnspændingskilde og en afbryder.



Figur 63: Spole tilsluttet en jævnspændingskilde

3.7.1 Indkobling af spole

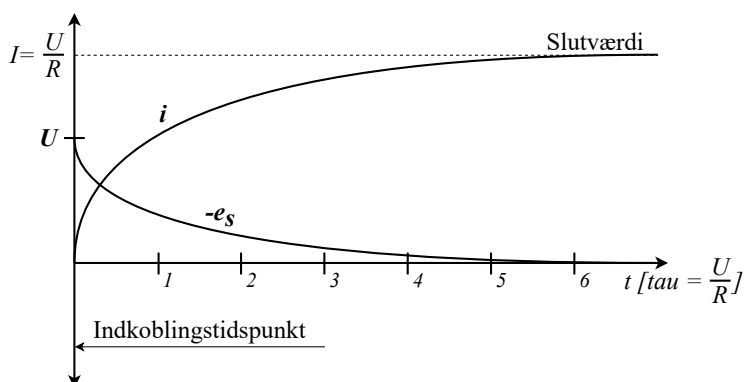
Sluttes kontakten, lægger hele jævnspændingen sig straks over spolen og søger at drive en strøm gennem spolen fra plus til minus.

Som vist i induktionsloven vil der induceres en spænding e_s , der søger at sende strøm modsat den oprindelige strøm I .

Der vil derfor gå et tidsrum, før strømmen når sin maksimale værdi, som er bestemt af den ohmske modstand i tilledninger og spole.

Strøm og spænding vil forholde sig som vist.

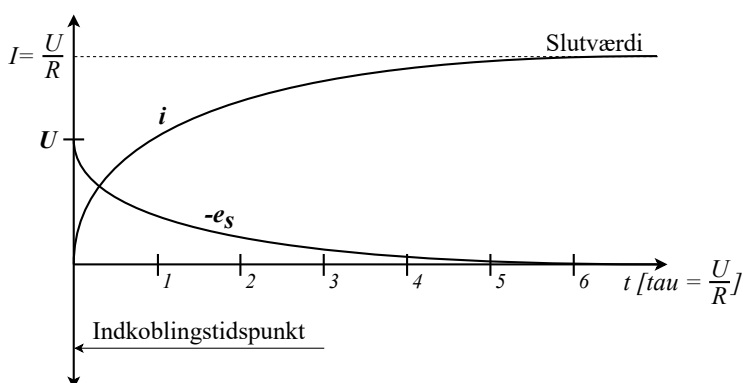
I visse tilfælde kan det vare adskillige sekunder, før strømmen når sin normale værdi.



Figur 64: Strømmens forsinkelse ved tilslutning af en spole

3.7.2 Udkobling af spole

Afbrydes strømmen til spolen, induceres der igen en spænding e_s , som søger at bibeholde magnetfeltet, det vil sige, at strømmen ikke øjeblikkelig falder til nul. Den inducerede spænding og strøm vil derfor være stigende og i samme retning som den aftagende strøm, idet enhver induceret spænding og strøm modvirker sin årsag.



Figur 65: Udkobling af spole

3.7.3 Selvinduktionskoefficient

Den inducerede spændings størrelse afhænger af:

- spolens vindingsantal
- stålkernens størrelse, beskaffenhed og udformning
- magnetfeltets styrke. Strømvariationen pr. tidsenhed.

Den inducerede spænding har formeltegnet U_L .

$$U_L = I \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad [\text{V}] \quad [3.7]$$

hvor I er strømmen gennem spolen, og $2 \cdot \pi \cdot f$ er strømvariationen pr. tidsenhed, også kaldet vinkelhastigheden.

L er spolens selvinduktionskoefficient, som udtrykkes i henry og forkortes H.

Selvinduktionskoefficienten er medbestemmende for en spoles evne til at inducere en spænding, altså evnen til at modstå ændringen.

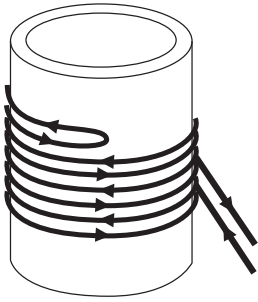
Hvis strømmen gennem en spole stiger eller falder jævnt med 1 A pr. sekund, og derved inducerer en spænding på 1 V, har spolen en selvinduktionskoefficient på 1 H.

$$U = L \cdot \left(\frac{I}{t} \right) \quad [\text{V}] \quad [3.8]$$

3.7.4 Bifilar vikling

I mange tilfælde ønsker man en induktionsfri modstand. Dette kan opnås ved at vikle modstandstråden bifilar, det vil sige, at tråden lægges dobbelt, inden den vikles.

Da trådene ligger tæt, bliver magnetfeltet fra den ene tråd neutraliseret af den anden, da de to tråde har modsat strømretning.



Figur 66: Bifilar vikling

Selv om der på denne måde kan vikles modstande med yderst ringe selvinduktion, giver den relativt store kapacitet mellem de to tætliggende tråde dog anledning til andre uønskede fænomener.

I mere specielle tilfælde, fx ved fremstilling af modstande til vekselstrømsbrug ved høje frekvenser eller med stor præcision, anvendes særlige viklingsmåder.

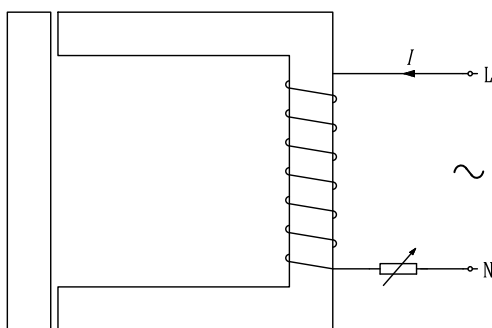
3.8. Magnetiske tab

I enhver stålkerne, generator- eller motorankers kerne eller transformers kerne vil der derfor opstå to former for ”jerntab”: hysteretab og hvirvelstrømstab.

3.8.1 Hysterese

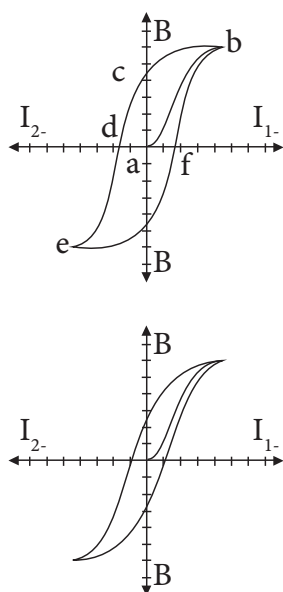
Magnetiseres en stålkerne med vekselstrøm, fremkommer der et vekselfelt.

Dette vekselfelt fremkalder visse tab, idet stålet skal ommagnetiseres 100 gange i sekundet, når frekvensen er 50 Hz.



Figur 67: Spole med indskudt variabel modstand

3.8.1.1. Hysteresesløjfe



Figur 68: Hysteresesløjfe

Reguleres strømmen med den viste skydemodstand (fig. 67) fra nul og op efter, vil den magnetiske kraft stige efter kurvegrenen ab til punktet b ; når strømmen derefter formindskes, vil den magnetiske induktion falde, men denne gang efter kurvegrenen bc . Der vil endnu være nogen magnetisme – den remanente magnetisme – tilbage i stålet, når strømmen er blevet nul.

For at fjerne denne magnetisme må der magnetiseres med en vis strøm – ad – i modsat retning. Dette sker, når vekselstrømmen skifter retning, og den magnetiserende kraft følger nu kurvegrenen cde . Når strømmen vender igen, følger magnetismen kurvegrenen ef og videre til b . Den fremkomne kurve kaldes hysteresekurven.

Den totale energi, der må tilføres for at foretage en fuldstændig om-magnetisering af stålet, kan måles ved størrelsen af arealet inden for kurven.

Dette energitab kaldes hysteresetab og omsættes til varme i stålet.

Disse tab kan i nogen grad formindskes ved at legeres stålet med silicium. De kan desuden reduceres ved at underkaste stålet en koldvalsning i en bestemt retning. Man opnår herved, at stålet bliver lettere at magnetisere i valseretningen.

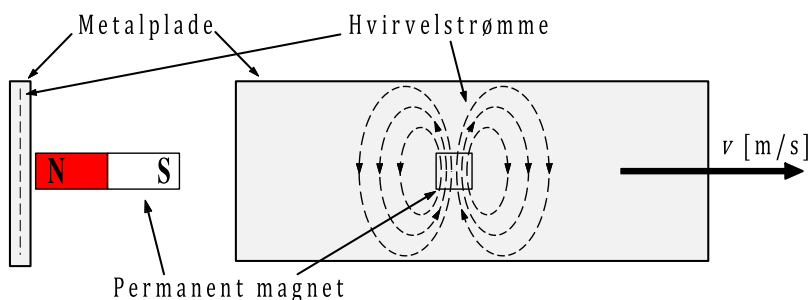
Tabet er afhængigt af den maksimale magnetiserende kraft og af stålets remanens.

Jo mindre remanens, des mindre er kurvens areal, og derved bliver tabet mindre.

3.8.2 Hvirvelstrømme

Ændres de magnetiske forhold for en spole med stålkerne, induceres der spænding i spoleviklingen; men da stålkernelen virker som en massiv vikling og er elektrisk ledende, vil der også i denne opstå spænding og strøm. Disse såkaldte hvirvelstrømme omdanner den elektriske energi til varme og medfører derfor et vist effekttab, hvirvelstrømstabet.

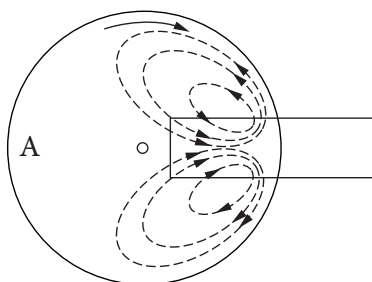
Hvirvelstrømmene er næsten altid uønskede. I enkelte tilfælde drager man dog nytte af den bremsning, som hvirvelstrømmene giver anledning til. Tegningen viser princippet i en hvirvelstrømsbremse, som den bruges i målere og adskillige instrumenttyper.



Figur 69: *Hvirvelstrømsbremse*

Når metalskiven bevæges, vil der i denne mellem bremsemagnetens poler induceres en spænding og en strøm, som mellem magnetpolerne løber i samme retning som spændingen og tilbage gennem skiven uden for magnetpolernes område.

Der opstår derved en dæmpning af skivens bevægelse, og denne dæmpning er proportional med skivens hastighed.



Figur 70: *Hvirvelstrømme i skiven*

Denne effekt benyttes også til sikkerhed i elevatorer og til nedbremsning af rutsjebaner. Bremsen behøver ikke tilslutning og vil derfor altid virke.

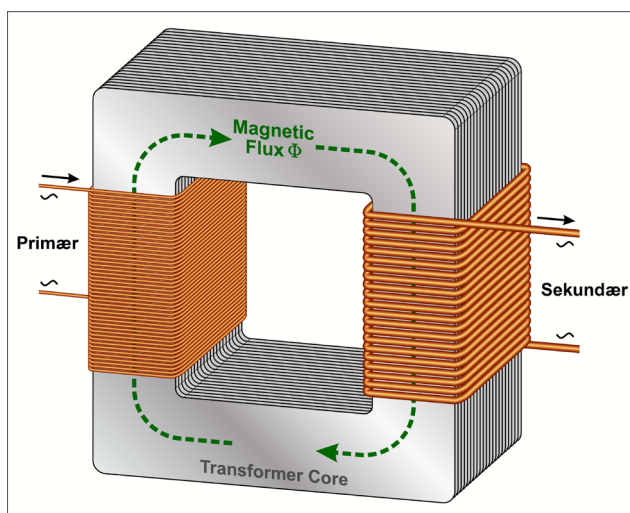
Hvirvelstrømme benyttes også i komfurer med induktion. Her er varmepladen udskiftet med en elektromagnet, som med magnetismen inducerer en spænding og dermed strøm i bunden af gryden. Strømmen afsætter sin effekt til varme i gryden. Det er en af grunde-

ne til, at plastik lagt oven på en tændt induktionsplade ikke smelter.

Hvirvelstrømme medfører varmeudvikling og dermed et energitab i jernet. Tidligere beskrev vi formelen $P=I^2 \cdot R$, som viser, at den afsatte effekt, altså tabet, er i anden potens med hvirvelstrømmen.

For at holde hvirvelstrømstabene så små som muligt vælger man en stålsort med størst mulig elektrisk modstand, men mindst mulig magnetisk modstand, og – først og fremmest – bruger man en ”lamelleret” kerne. Dvs. en kerne opbygget af tynde stålplader, som indbyrdes isoleres elektrisk ved hjælp af papir, fernis, lak eller et iltlag fremkommet ved, at pladerne er strøget med syre.

De isolerede lag i en lamelleret kerne må selvsagt ikke ligge på tværs af kraftlinjerne, men skal ligge på tværs af lederens retning.

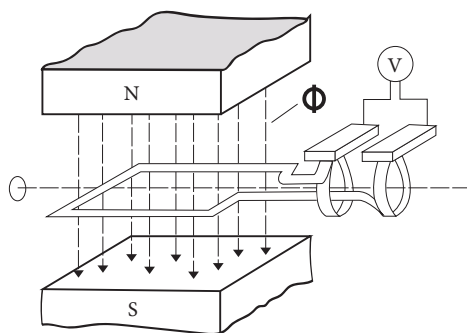


Figur 71: Lamelleret jernkerne

4. 1-faset vekselstrømsteori

4.1. Frembringelse af vekselstrøm

Når en ledersløjfe drejes i et homogent (ensartet) magnetfelt, opstår der i ledersløjfen en sinusformet vekselspænding.



Figur 72: Ledersløjfe i homogent magnetfelt

Denne ændrer under drejningen ikke kun sin størrelse, men også sin retning.

For hver omdrejning af sløjfen vil der dannes en sinuskurve.

Antallet af sinuskurver, der frembringes pr. sekund, kaldes frekvensen f og måles i enheden hertz [Hz], idet:

$$f = \text{svingninger pr. sekund} \quad [\text{Hz}] \quad [4.1]$$

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ periode pr. sekund} \quad [4.2]$$

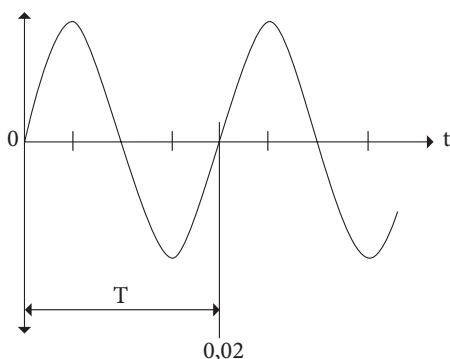
Varigheden af en periode kaldes periodetiden T og kan beregnes som:

$$T = \frac{1}{f} \quad [\text{s}] \quad [4.3]$$

Her i landet er frekvensen 50 Hz, hvilket giver en periodetid på:

$$T = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ s} = 20 \text{ ms} \quad [4.4]$$

Vekselstrøm angives ved ~-tegnet og betegnes ofte AC, fx 230 V~ eller 230 Vac.



Figur 73: Sinuskurve med 50 Hz

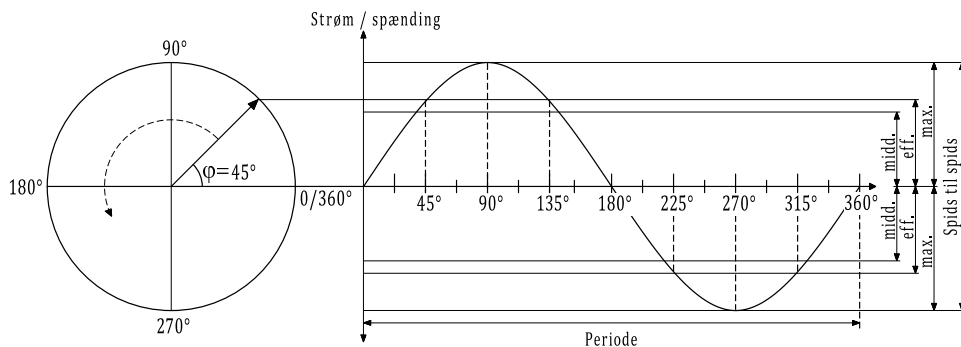
4.1.1 Sinuskurve

For at illustrere, hvorledes sinuskurven bliver til, benyttes en enhedscirkel, hvori man svinger en vektor. For hver omdrejning vektoren laver, repræsenteres en svingning, altså en periodetid.

Da vektoren svinger 360° på en omdrejning, repræsenteres sinuskurvens øjebliksværdi i antal grader, som vektoren har svinget på det pågældende tidspunkt. Dette kan også repræsenteres i radianer. Radianer er et udtryk for den distance, som vektorens pilespids rejser på en omgang i en enhedscirkel. Dette er beskrevet i afsnit [4.1.1.3. Vinkelhastighed](#).

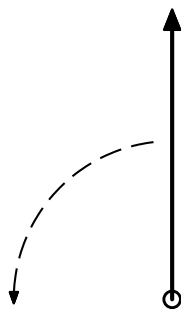
Antallet af svingninger på 1 sekund giver dermed den frekvens, som sinuskurven repræsenterer.

Yderligere forklaring følger i de næste afsnit.

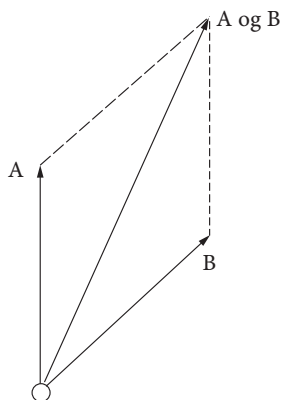


Figur 74: Fremstilling af sinuskurve vha. enhedscirkel og vektor

4.1.1.1. Vektorer



Figur 75: Vektor



Figur 76: Addition af vektorer

Til hjælp for beregninger af kræfters påvirkning på hinanden benyttes vektordiagrammer.

En vektor er en repræsentation af en given værdi samt værdiens retning.

Vektordiagrammer kan benyttes som en erstatning for kurver og vil i det tilfælde vise en kurves øjebliksværdi.

Ved anskuelse af kurver er vektorens omdrejningsretning venstre om.

Almindeligvis er det effektivværdierne, der benyttes i vektordiagrammer, men ved tegning af kurver vha. enhedscirklen benytter man den maksimale værdi.

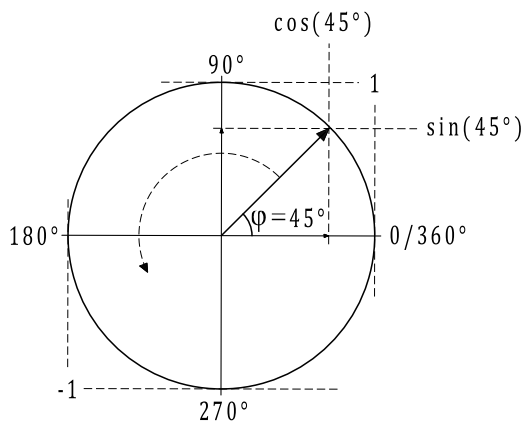
Hvis flere vektorer skal sammensættes, skal de tegnes i samme målforhold. Herefter kan vektorerne sammenlægges i en resulterende vektor, der angiver den vektorielle sum af vektorerne.

4.1.1.2. Enhedscirklen

En enhedscirkel er en cirkel, som med sin omkreds repræsenterer en radius svarende til én enhed [].

I enhedscirklen kan vi svinge en vektor og dermed aflæse givne øjebliksværdier op ad y-aksen.

Enhedscirklen er enhedsløs, da den tager den enhed, som vektoren repræsenterer. Fx når man ser på en spændingsvektor, vil enheden automatisk blive ganget med volt [V].



Figur 77: *Enhedscirkel*

Når en vektor svinges i en enhedscirkel, starter man i 0° . Man svinger derefter vektoren venstre om.

Vektorens endepunkt er det punkt, som drejer i enhedscirkelns omkreds.

Ved en given vinkel kan man aflæse en værdi fra -1 til 1 ad enten x- eller y-aksen. Akserne er det, vi repræsenterer som cosinus og sinus i relation til vektorens endepunkt.

- x-aksen repræsenterer cosinusværdier.
- y-aksen repræsenterer sinusværdier.

Står vi i vinkel 0° , har vi altså en cosinusværdi på 1 og en sinusværdi på 0.

Disse værdier vil skifte, i henhold til hvilken vinkel vektoren står i.

Vinkel	Cosinus	Sinus
$0^\circ / 360^\circ$ (0 eller 2π radianer)	1	0
90° ($\frac{1}{2}\pi$ radianer)	0	1
180° (1π radianer)	-1	0
270° ($1\frac{1}{2}\pi$ radianer)	0	-1

Da vi laver en grafisk fremstilling af sinuskurven, er det altså de repræsentative værdier for y-aksen, som viser sinusværdierne.

4.1.1.3. Vinkelhastighed

Drejes en radius af længden 1 enhed en hel omdrejning, vil dens yderste punkt gennemløbe cirkelens omkreds.

Omkredsen for en cirkel er:

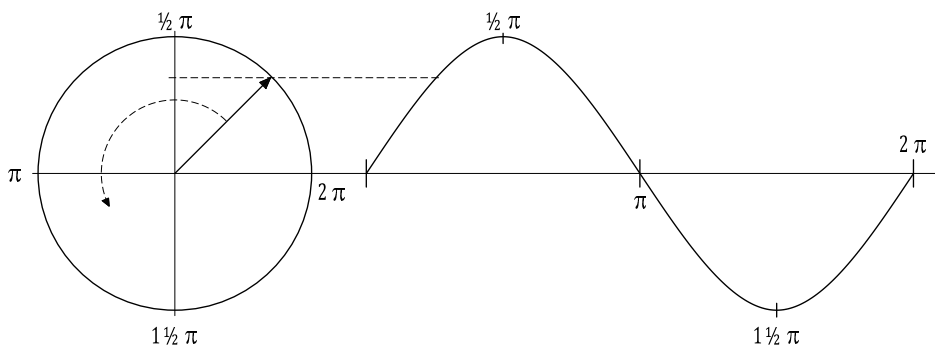
$$O = 2 \cdot \pi \cdot r \quad [\quad] \quad [4.5]$$

Da enhedscirkelens radius er lig med 1, får vi en omkreds lig med:

$$O = 2 \cdot \pi \cdot 1 = 2\pi \quad [\quad] \quad [4.6]$$

Dette betegnes som radianer, hvorfor en omdrejning er:

$$360^\circ = 2\pi \text{ radianer} \quad [4.7]$$



Figur 78: Drejning af vektor i enhedscirkel

Vektoren gennemløber altså en vinkel på 2π (2π) for hver omdrejning. Drejer vi kun en kvart omgang, siger man, at man har drejet $\frac{1}{2}\pi$. En halv omgang er 1π .

Vektorens vinkelhastighed er antal radianer gennemløbet pr. sekund og betegnes med det græske bogstav lille omega (ω):

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \left[\frac{\text{radianer}}{\text{sekund}} \right] \quad [4.8]$$

Vi ganger altså en omgang med antallet af omgange pr. sekund.

Vær opmærksom på, om lommeregneren er indstillet til at regne med vinkler i grader eller radianer!

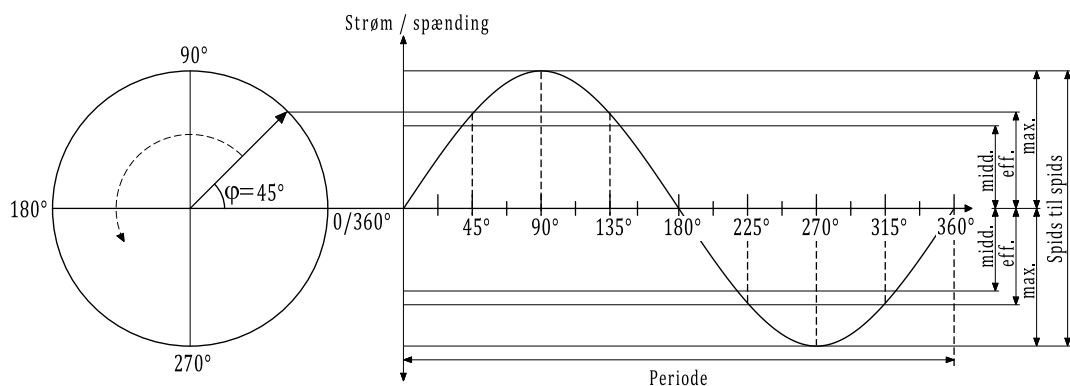
I matematikkens sprog og formler regner man i radianer og vinkelhastigheder, men her regner vi med antal grader (360°).

4.1.1.4. Frembringelse af sinuskurven for vekselspænding

Ved en grafisk fremstilling af sinuskurven afsætter man en linje, som er i forlængelse af x-aksen. På denne x-akse afsætter vi derefter vinklerne fra 0 - 360° .

Herefter afsættes de repræsentative værdier for vektorens endepunkt vinkelret på y-aksen ved den respektive vinkel, mens vektoren svinges rundt i enhedscirklen.

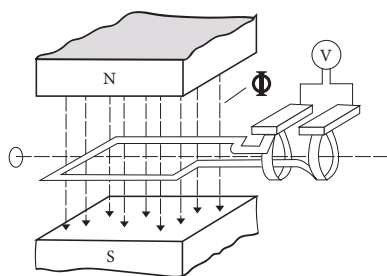
Når vektoren har drejet en omgang, vil der fremkomme en sinuskurve. Ordet **sinuskurve** kommer af, at det er y-aksens værdier, som bliver afsat, og y-aksen repræsenterer sinusværdier i enhedscirklen.



Figur 79: Fremstilling af sinuskurve vha. enhedscirkel og vektor

Når man laver den grafiske fremstilling af den inducerede elektromotoriske kraft, altså generatorens fremstillede spænding, vil ledersløjfen være repræsenteret med vektoren. Vektorens vinkel viser altså positionen af ledersløjfen i det homogene magnetfelt.

I vinkel 0° vil ledersløjfen ikke gennemskære nogen feltlinjer, og den inducerede spænding er derfor 0 V.

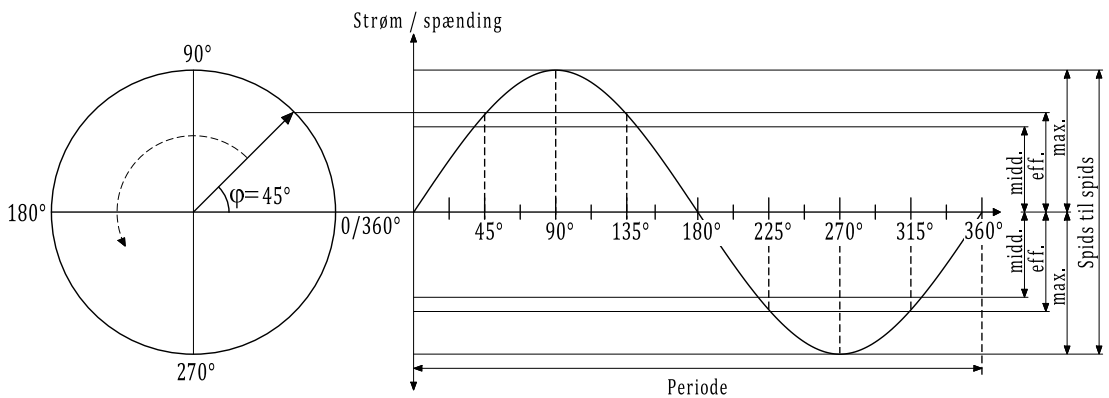


Figur 80: Ledersløjfe i homogent magnetfelt

Efter en kvart omgang vil ledersløjfen gennemskære det maksimale antal feltlinjer, og den inducerede spænding er derfor på sin maksimale værdi. Dette er grafisk vist i sinuskurven sammen med enhedscirklen.

Vektoren repræsenterer altså i dette tilfælde den maksimale værdi. I beregninger benyttes dog de effektive værdier, hvilket er beskrevet i næste afsnit.

4.2. Vekselstrømmens værdier



Figur 81: Fremstilling af sinuskurve vha. enhedscirkel og vektor

4.2.1 Effektivværdi

Kurvens højeste værdi kaldes maksimalværdien eller spidsværdien (peak-værdi), og fra plus maks. og til minus maks. har man ”spids til spids”-værdien (peak to peak).

I praksis benyttes maksimalværdier ikke ret meget; det er mere bekvemt at benytte effektivværdien. Grunden til dette er, at værdierne aldrig ligger konstant på den maksimale værdi.

Effektivværdien af en vekselstrøm er defineret således:

Effektivværdi af vekselstrøm

At en vekselstrøms effektive værdi er 1 A, vil sige, at den udvikler samme varme i en given modstand som en jævnstrøm på 1 A.

Man kan se på figuren, at den effektive værdi ligger ved en vinkel φ (phi) på 45° . Kendes en vekselstrøms maksimale værdi, kan den effektive værdi beregnes således:

$$I_{\text{eff}} = I_{\text{max}} \cdot \sin(45^\circ) \quad [\text{A}] \quad [4.9]$$

$$I_{\text{eff}} = I_{\text{max}} \cdot 0,707 \quad [\text{A}] \quad [4.10]$$

Den reciprokke værdi for $\sin(45^\circ)$ er lig med kvadratroden af 2:

$$\frac{1}{\sin(45^\circ)} = \frac{1}{0,707} = 1,41 = \sqrt{2} \quad [\quad] \quad [4.11]$$

I praksis kan man derfor benytte nedenstående formel:

$$\frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{eff}}} = \sqrt{2} = 1,41 \quad [\quad] \quad [4.12]$$

eller

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = \frac{I_{\text{max}}}{1,41} \quad [\text{A}] \quad [4.13]$$

For spændinger og andet benyttes de tilsvarende omregninger.

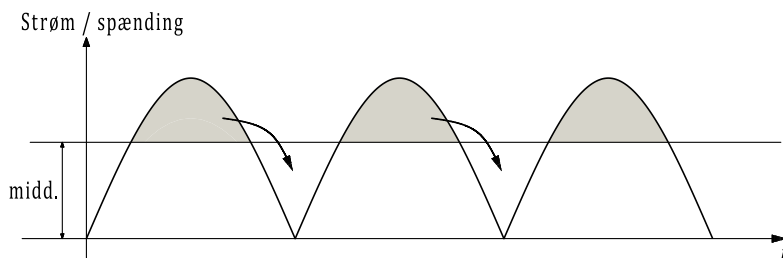
Det er altid de effektive værdier, man benytter til beregningerne.

I stikkontakten er spændingens effektivværdi 230 V. Prøv at beregne, hvad den maksimale peak-spænding er.

4.2.2 Middelværdi

Middelværdien benyttes primært kun ved jævnstrøm. I vekselstrøm giver det ikke så meget mening, da de negative halvperioder vil udligne de positive. Vi benytter altså først denne værdi, når vi fx omdanner vekselstrøm til jævnstrøm. Vi skal dog alligevel kende til forholdet og forskellen mellem effektiv- og middelværdi.

Tænk vi os vekselstrømmens negative halvperioder drejet op ”oven på” tidsaksen, fremkommer nedenstående udseende.



Figur 82: *Ensrettet vekselstrøm*

Ud af denne kurve kan man få vekselstrømmens geometriske middelværdi, idet man forestiller sig halvbølgerne som grusbunker, der skal jævnes ud i et glat lag.

Lagets tykkelse bliver sinuskurvens middelværdi og kan betegnes som:

$$I_{\text{mid}} = I_{\text{max}} \cdot 0,637 \quad [\text{A}] \quad [4.14]$$

Omregningen gælder også for spændinger.

4.2.3 Formfaktor

Forholdet mellem effektiv- og middelværdi kaldes formfaktoren og er forholdet mellem de to ovenstående forhold:

$$\frac{I_{\text{mid}}}{I_{\text{max}}} = \frac{0,637}{0,707} = 0,9 = \frac{I_{\text{mid}}}{I_{\text{eff}}} \quad [\quad] \quad [4.15]$$

Derfor:

$$I_{\text{mid}} = I_{\text{eff}} \cdot 0,9 \text{ [A]} \quad [4.16]$$

De tilsvarende omregninger gælder også for spændinger:

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \text{ [V]} \quad [4.17]$$

$$U_{\text{mid}} = U_{\text{max}} \cdot 0,637 \text{ [V]} \quad [4.18]$$

$$U_{\text{mid}} = U_{\text{eff}} \cdot 0,9 \text{ [V]} \quad [4.19]$$

Eksempler

En vekselspænding har effektivværdien 230 V. Find spændingens maksimal- og middelværdi.

$$U_{\text{max}} = U_{\text{eff}} \cdot \sqrt{2} = 230 \cdot \sqrt{2} = 325 \text{ V}$$

$$U_{\text{mid}} = U_{\text{eff}} \cdot 0,9 = 230 \cdot 0,9 = 207 \text{ V}$$

4.3. Effekter i vekselstrøm

Der findes tre former for belastninger på vekselstrøm: ohmsk belastning, kapacitiv belastning og induktiv belastning. De kendetegnes ved følgende:

- Ohmsk belastning: Modstande, som primært afgiver varme, såsom glødelamper, varmelegemer og ledninger
- Kapacitiv belastning: Modstande, hvor en kapacitet af elektroener enten oplades eller afgives, fx i kondensatorer
- Induktiv belastning: Modstande i forbindelse med magnetisme, altså induktion i fx spoler.

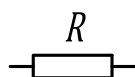
Forståelsen for de kapacitive og induktive belastninger, også kaldet reaktanser, vil først blive gennemgået på hovedforløbet. Det specielle ved disse belastninger er, at de danner en faseforskydningsvinkel mellem strøm og spænding, som man bliver nødt til at tage højde for ved brug af effektformlen for vekselstrøm. På grundforløbet ses primært på de ohmske belastninger og brugen af faseforskydningsvinklen i effektformlen.

Effektformlen for et faset vekselstrøm er:

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \text{ [W]} \quad [4.20]$$

$\cos(\varphi)$ er et udtryk for faseforskydningsvinklen, som bliver gennemgået senere i dette afsnit.

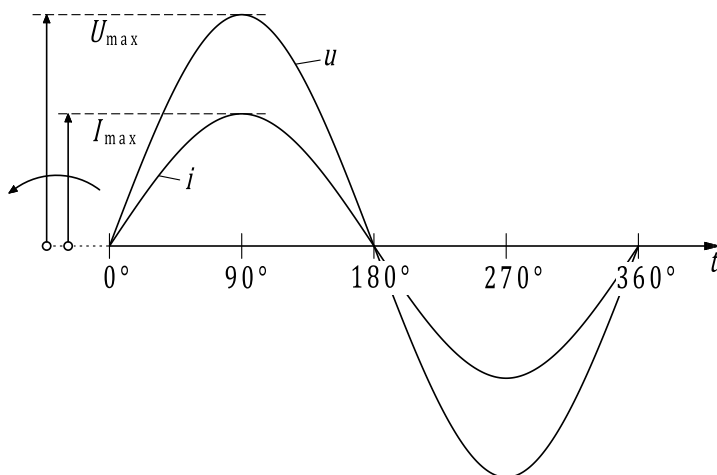
4.3.1 Ohmsk vekselstrømsbelastning



Figur 83: Ohmsk belastning

Består belastningen af glødelamper, varmelegemer el.lign. uden væsentlig selvinduktion eller kapacitet, vil strøm- og spændingskurverne ligge i fase og benævnes ohmsk belastning.

Når spændingen stiger, stiger strømmen samtidigt, og omvendt. Når spændingen er nul, vil strømmen også være nul, og de vil begge opnå maksimal værdi på samme tid. I figur 84 ses, at både strøm og spænding ligger i samme vinkel og vil dreje rundt sammen i enhedscirklen. De ligger altså med samme vinkel, og der vil i dette tilfælde ikke være nogen faseforskydning, hvorfor $\cos(\varphi)$ vil være lig med 1.

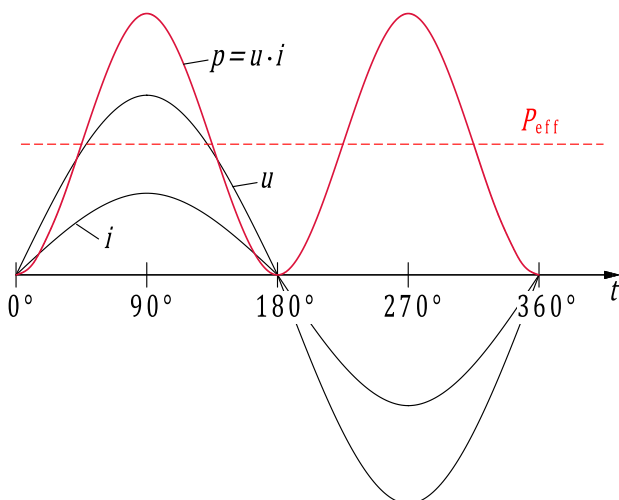


Figur 84: Spænding og strøm ved ohmsk belastning

Ved ren ohmsk belastning kan beregningerne udføres nøjagtig som ved jævnstrøm. Da $\cos(\varphi)=1$, kan man altså se bort fra denne ved brug af effektformlen for ohmske effekter.

Man regner med spændingens og strømmens effektivværdier. Dette gælder for både Ohms lov og formelen for effekt.

4.3.1.1. Ohmsk effektkurve



Figur 85: Ohmsk effektkurve

Hvis vekselspændingen er sinusformet, vil strømmen også være det. Effekten vil da inden for en periode variere efter den på figuren viste kurve, der fremkommer ved at gange sammenhørende øjebliksværdier af strøm og spænding.

Strøm og spænding har skiftevis positiv og negativ værdi, men effekten har kun positiv værdi, hvilket er ganske naturligt, da strømmen udvikler varme, uanset i hvilken retning den går i en modstand.

Eksempel

En varmeovn har en modstand på $30\ \Omega$ og er tilsluttet 230 Vac .

Hvor stor er strømmen og effekten?

$$I = \frac{U}{R} = \frac{230}{30} = 7,67\text{ A}$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \text{ og } \cos(\varphi) = 1$$

derfor

$$P = U \cdot I \cdot 1 = 230 \cdot 7,67 \cdot 1 = 1764\text{ W}$$

4.3.2 Faseforskydningsvinkel/effektfaktor

Når vi ser på de ohmske belastninger, så ligger spændingen og strømmen i fase, altså med samme vinkel, når vi drejer dem i enhedscirklen. Når en elektrisk kreds også består af spoler og/eller kondensatorer (reaktanser), vil strømmen forskyde sig i forhold til spændingen, hvorfor de ikke længere ligger i fase med hinanden. Den samlede modstand, som skaber denne forskydning, kaldes en impedans og beskrives nedenunder.

4.3.2.1. Impedans

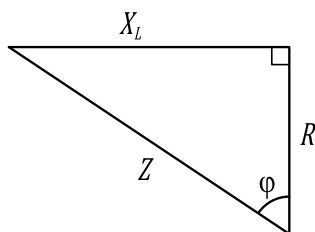


Figur 86: Impedans

En impedans (Z) er den samlede modstand (kombinationsmodstand), som opstår, når man påfører en spole eller kondensator med vekselstrøm. Ved denne vekselvirkning opstår en reaktans (X), som ligger 90° forskudt fra den ohmske modstand.

Impedanser er noget, man ser på spoler i en motor eller ved højtalersystemer.

Den samlede modstand, impedansen, er en vektoriel sammenlægning af de to værdier.



Figur 87: Modstandstrekant

Den ohmske modstand og den reaktive modstand kan illustreres som to vektorer, som ligger 90° forskudt. Disse danner sammen med impedansen en retvinklet trekant.

Af den retvinklede trekant beregnes længden af impedansen Z , som er kombinationsmodstanden af R og X , ved hjælp af enten Pythagoras eller forhold for cosinus og sinus, således:

$$Z^2 = R^2 + X^2 \quad [\Omega] \iff \quad [4.21]$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad [\Omega] \quad [4.22]$$

eller

$$\cos(\varphi) = \frac{R}{Z} \quad [\quad] \quad [4.23]$$

eller

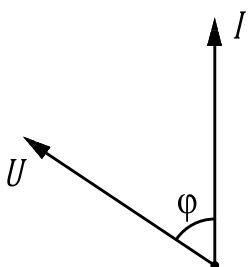
$$\sin(\varphi) = \frac{X}{Z} \quad [\quad] \quad [4.24]$$

Faseforskydningen på denne samlede modstand, impedansen, i forhold til den ohmske modstand er det, som skaber en forskydning, hvorfor spændingen og strømmen ikke længere ligger i fase med hinanden.

4.3.2.2. Effekttrekant

Vinklen mellem spændingen og strømmen er det, som benævnes faseforskydningsvinklen. Denne vinkel er den samme for modstandstrekanten.

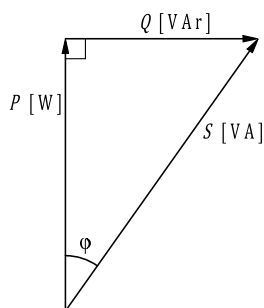
Faseforskydningen medfører, at den frembragte effektkurve nu ikke kun ligger med positive værdier, hvorfor det ikke er den samlede effekt, der omsættes til rent arbejde (ohmsk effekt).



Figur 88: *Faseforskydning mellem spænding og strøm*

Når man ser på vektorerne for de effekter, som fremkommer, så vil der dannes en retvinklet trekant med samme vinkel som for modstandstrekanten. De forskellige typer modstande skaber altså forskellige typer effekter, som vi kan opsætte i en effekttrekant.

- Ohmsk modstand (R) skaber virkeeffekten P .
- Reaktiv modstand (X) skaber reaktiv effekt Q .
- Impedansen (Z) skaber den samlede (tilsyneladende) effekt S , også kaldet kombinationseffekten.



Figur 89: Effekttrekant

Da vi har samme faseforskydning og kan illustrere den samme retvinklede trekant, kan vi lave følgende forhold mellem effekterne:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad [\Omega] \iff \quad [4.25]$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [\Omega] \quad [4.26]$$

eller

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad [\quad] \quad [4.27]$$

eller

$$\sin(\varphi) = \frac{Q}{S} \quad [\quad] \quad [4.28]$$

4.3.2.3. Kombinationseffekt

Multipliserer man spændingen og strømmen uden at tage højde for faseforskydningsvinklen, vil vi få et udtryk for den samlede effekt, altså både den ohmske og de reaktive effekter. Den samlede effekt benævnes kombinationseffekten og har enheden voltampere [VA]:

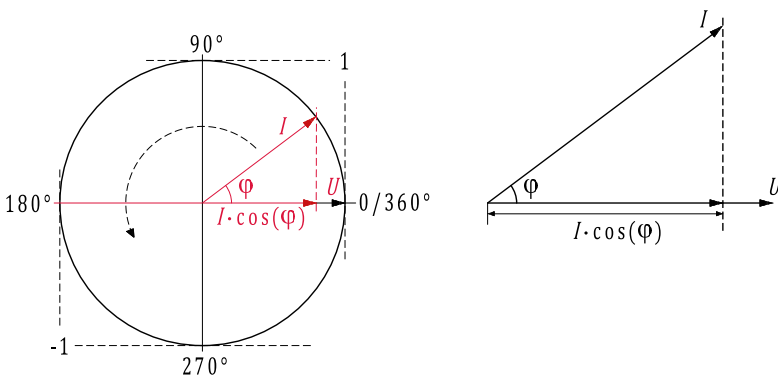
$$S = U \cdot I \text{ [VA]}$$

[4.29]

4.3.2.4. Ohmsk effekt/virkeeffekt

Tager man gennemsnittet af den nye frembragte effektkurve, altså udligner det negative areal med noget af det positive, fås en værdi, som repræsenterer det frembragte arbejde, altså den ohmske effekt. Denne effekt benævnes også som virkeeffekt. For at finde denne effektive værdi bliver vi nødt til at forholde os til faseforskydningsvinklen.

Virkeeffekten findes ved at multiplicere værdier, som ligger i fase med hinanden. Vinklen mellem spændingen og strømmen kan udledes ved brug af cosinus, som er en relation mellem den samlede strøm og den hosliggende katete. Multipliserer man den samlede værdi med cosinus til vinklen, vil man få en repræsentativ værdi liggende i fase med spændingen.



Figur 90: Vektordiagram for induktiv belastning, fx en motor

Figuren illustrerer dette, og multiplicerer man de to værdier, som ligger i fase med hinanden, får vi:

$$P = S \cdot \cos(\varphi) \iff [4.30]$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \text{ [W]} [4.31]$$

Man kan se, at med en faseforskydningsvinkel får man ikke omsat al sin effekt til arbejde. Man kalder derfor også $\cos(\varphi)$ for effektfaktoren. I daglig tale kaldes effektfaktoren for ”cosinus til phi” – $\cos(\varphi)$.

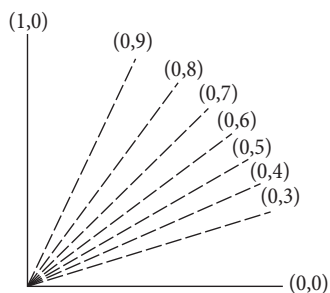
Det skal nævnes, at der i figuren er vist den repræsentative værdi for strømmen. Dette kan også gøres med spændingen, men det vil ikke ændre noget i formlen.

4.3.2.5. Erfaringstal for $\cos(\varphi)$

Vedrørende effektfaktoren $\cos(\varphi)$ har vi tidligere set, at den er lig med 1,0 ved ren ohmsk belastning og mellem 1,0 og 0,0 ved reaktive belastninger. Man kan overslagsmæssigt regne med følgende værdier:

- Glødelamper, alm. varme- og kogeapparater 1,0
- Blandet belastning af lys og motorer 0,7-0,8
- Maskinfabrikker og landbrugsinstallationer 0,6-0,7
- Svejsetransformere 0,5-0,6
- Neonanlæg, lysstofrør, Na- og Hg-damplamper 0,4-0,5.

$\cos(\varphi)$ i relation til faseforskydningsvinklen kan ses i nedenstående figur:



Figur 91: $\cos(\varphi)$ i relation til faseforskydningsvinkel

4.3.3 Arbejde i vekselstrøm

Arbejde er effekt over en given periode. I jævnstrømsteorien udledte vi arbejde som:

$$A = P \cdot t \text{ [Ws] eller [kWh]} \quad [4.32]$$

Man skal altså se på den virkeeffekt, som benyttes over en periode. Man kan derfor udlede, at for vekselstrøm er arbejdet:

$$A = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \cdot t \text{ [Ws] eller [kWh]} \quad [4.33]$$



Figur 92: Måler af elforbrug: kWh

Afregning med elværkerne sker normalt for forbruget af kWh. Man betaler altså for det arbejde, som den elektriske effekt giver over tid. Jo længere tid man benytter en brugsgenstand, jo mere skal man betale. Elforbruget afregnes efter antallet af forbrugte kWh og ikke efter kVAh.

Se i øvrigt 1.3.5. Arbejde.

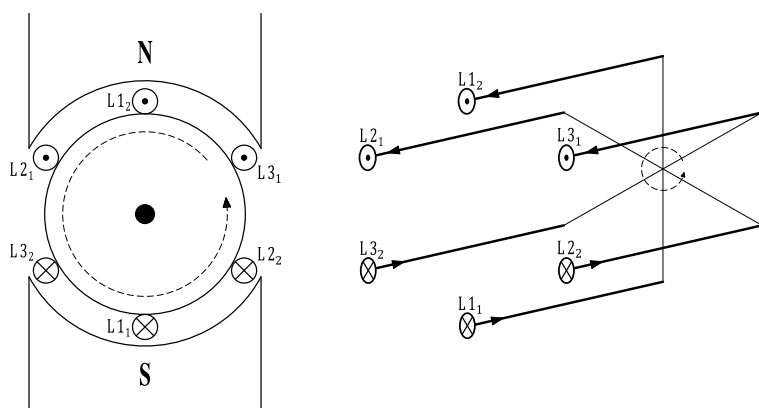
5. 3-faset vekselstrømsteori

Mindre belastninger tilsluttes normalt 230 V (1 fase), hvorimod større belastninger tilsluttes 2 eller 3 faser med eller uden nul, for at begrænse strømmen mest muligt.

Ved frembringelsen af 3-faset vekselstrøm får man nogle flere muligheder, blandt andet en større spænding ved forbindelse mellem faserne, og man opnår det, man kalder et drejefelt, som er meget nyttigt til rotation af motorer.

I dette afsnit vises, hvordan man frembringer de tre faser, samt hvordan man kan koble belastningerne på forskellige måder, da man kan opnå forskellige spændinger. Med tre faser ser man på to typer koblinger, stjerne og trekant, som gennemgås i dette afsnit.

5.1. Frembringelse af 3-faset vekselstrøm

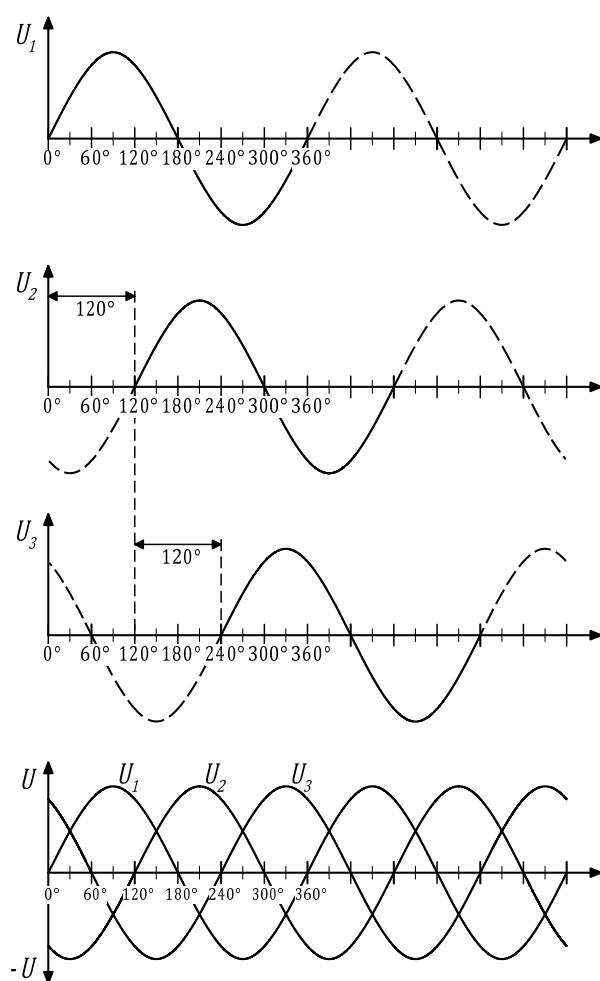


Figur 93: Tre ledersløjfer i magnetfelt for frembringelse af 3-faset vekselspænding

I afsnit 4.1. *Frembringelse af vekselstrøm* vises, hvordan man frembringer en enkel vekselspænding, når man roterer en ledersløjfe i et magnetfelt.

Ved at anbringe tre ens sæt viklinger på en generators rotor, med en forskydning på 120° i forhold til hinanden, vil der ved rotorens rotation frembringes 3-faset vekselspænding.

De tre faser benævnes henholdsvis L_1 , L_2 og L_3 , og de frembragte spændinger benævnes U_1 , U_2 og U_3 .



Figur 94: *Illustration af sammenlægningen af 3 faser*

Under generatorens rotation induceres der en vekselspænding i hver af de tre viklinger, som har en elektromotorisk kraft på $230 \text{ V}_{\text{eff}}$ ved stjerneforbundne viklinger. Spændingerne er sinusformede og forskudt 120° i forhold til hinanden.

Princippet er vist ved koordinatsystemet med spændingen U som funktion af vinklen.

Figuren nederst viser sammensætning af de tre kurver, som danner et kurvediagram af en 3-faset vekselspænding.

5.2. Fase- og netværdier

Ved frembringelse af tre faser kan man tilslutte komponenter i enten en stjerne- eller trekantforbindelse. Med disse forbindelser opnår man to forskellige værdier: fase- og netværdier. Alt efter forbindelsen kan man opnå enten forskellige spændinger eller strømme. I dette afsnit gennemgås stjerne- og trekantforbindelsen, og hvordan man anskuer fase- og netværdierne.

Grundlæggende kan fase- og netværdierne ses med følgende forståelse:

- **Faseværdierne** er de værdier, som man ser inde i maskinen. Dette kan være både i generatoren eller forsyningstransformers sekundære viklinger, hvor spændingen frembringes, eller i maskinen, som er tilsluttet den trefasede forsyning. Faseværdierne benævnes U_f og I_f .
- **Netværdierne** er de værdier, man ser uden for maskinen. Det vil sige på maskinens klemmer eller i forsyningsledningerne. Netværdierne benævnes U_n og I_n .

5.2.1 Stjerneforbindelse

Forsyningsgeneratorers eller -transformeres sekundærviklinger er normalt forbundet i stjerneforbindelse. Det er på den måde, man forsyner tre faser og en nulleleder.

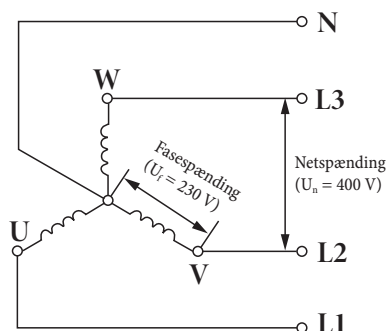
De tre viklinger er forbundet med et fælles punkt, som frembringer nulpotential, altså nullederen. Hver vikling frembringer så hver sin fasespænding, som er forskudt med 120° , som vist i 5.1. Frembringelse af 3-faset vekselstrøm. På denne måde kan man fremskaffe både 1-fasede spændinger på 230 V eller flerfasede spændinger på 400 V (netspændinger).

5.2.1.1. Fase- og netspænding i stjernekobling

Spændingen over maskinens enkelte viklinger, eller mellem en faseledning og nullederen, kaldes fasespændingerne U_f , mens spændingerne mellem to af maskinens yderklemmer eller mellem to faseledninger kaldes netspændingerne U_n .

Ved stjerneforbindelse er forholdet mellem fase- og netspænding $\sqrt{3}$. Se 5.2.1.3. Forholdet mellem fase- og netspænding i stjernekobling.

$$U_n = \sqrt{3} \cdot U_f \text{ [V]} \quad [5.1]$$



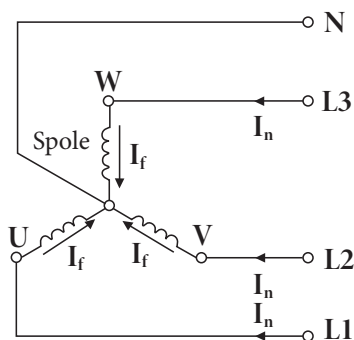
Figur 95: Fase- og netspænding i stjerneforbindelse

5.2.1.2. Fase- og netstrøm i stjernekobling

Strømmen i den enkelte fasespole i maskinen kaldes fasestrømmen I_f , og strømmen i en af nettets faseledninger netstrømmen I_n .

Ved stjerneforbindelse er fasestrømmen og netstrømmen de samme, altså er de lige store.

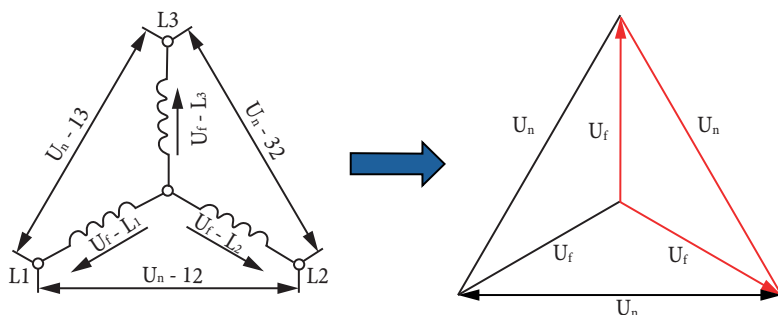
$$I_n = I_f \text{ [A]} \quad [5.2]$$



Figur 96: Fase- og netstrøm i stjerneforbindelse

5.2.1.3. Forholdet mellem fase- og netspænding i stjernekobling

Ved stjerneforbindelse findes U_n ved en geometrisk sammenlægning af to fasespændinger. Man kan se på spændingerne i et vektordiagram, som viser de tre fase- og netspændinger.

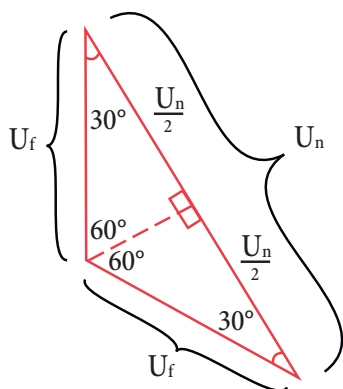


Figur 97: Fremstilling af vektordiagram for spændinger i stjerneforbindelse

Betrægter man en af de ligebenede trekanter, udgør netspændingen U_n grundlinjen og fasespændingerne U_f de to andre sider.

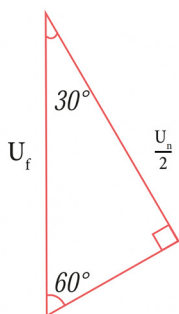
Halveres vinklen på 120° , vil vinkelhalveringslinjen stå vinkelret på grundlinjen, hvorved der fremkommer to retvinklede 30° - 60° trekanter.

Siderne i hver trekant består nu af en hypotenusen af U_f og to kateter, hvor den længste katete udgøres af $\frac{U_n}{2}$.



Figur 98: Ligebenet trekant for to fase- og en netspænding

For en retvinklet trekant er $\cos(\text{vinkel}) = \frac{\text{Hosliggende katete}}{\text{Hypotenusen}}$, hvorfor det kan udledes, at:



Figur 99: Retvinklet trekant for beregning af forholdet mellem fase- og netspænding

$$\cos(30^\circ) = \frac{\frac{U_n}{2}}{U_f} = \frac{U_n}{2 \cdot U_f} \Leftrightarrow \quad [5.3]$$

$$U_n = U_f \cdot 2 \cdot \cos(30^\circ) \text{ [V]} \quad [5.4]$$

$$2 \cdot \cos(30^\circ) = 2 \cdot 0,866 = 1,73 = \sqrt{3} \Rightarrow \quad [5.5]$$

Man kan derfor skrive:

$$U_n = \sqrt{3} \cdot U_f \text{ [V]} \quad [5.6]$$

eller

$$\frac{U_n}{U_f} = \sqrt{3} \quad [5.7]$$

Netspændingen i Danmark kan derfor beregnes til:

$$U_n = \sqrt{3} \cdot U_f = \sqrt{3} \cdot 230 = 398 \text{ V} \approx 400 \text{ V} \quad [5.8]$$

5.2.2 Trekantforbindelse

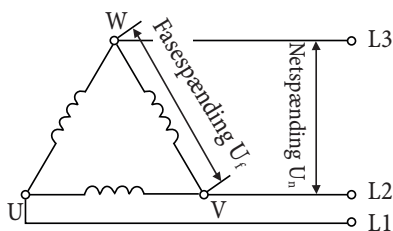
Forsyningstransformerens primærside er trekantforbundet. Dette blandt andet fordi højspændingsnettet kun er fremført med tre faser, altså uden nulleleder. Sekundærsiden kan i særlige tilfælde også forbindes i trekant, men vi ser mest trekantforbindelser, når vi forbinder en motor eller store varmelegemer.

5.2.2.1. Fase- og netspænding i trekantkobling

I en trekantforbindelse er modstandene/spolerne hver forbundet mellem to faser. Der bliver derfor kun én spænding til rådighed, da netspændingen U_n udgør fasespændingen U_f .

Ved trekantforbindelse er fase- og netspændingen den samme, altså er de lige store.

$$U_f = U_n \text{ [V]} \quad [5.9]$$



Figur 100: Fase- og netspænding i trekantforbindelse

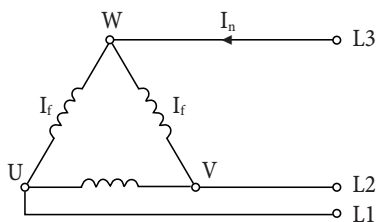
5.2.2.2. Fase- og netstrøm i trekantkobling

Af figuren ses, at netstrømmen i L_1 er sammenlægningen af de to strømme, som dels forløber gennem spolen Z_1 og dels gennem spolen Z_3 . Netstrømmen I_n er altså bestående af to fasestrømme I_f .

Det tilsvarende sker fra netstrømmene i L_2 og L_3 , og ydermere bliver de tre fasestrømme faseforskudt fra hinanden som ved stjerneforbindelsen 120° .

Grundet faseforskydningen på 120° , er forholdet mellem fase- og netstrøm $\sqrt{3}$.

$$I_n = \sqrt{3} \cdot I_f \quad [\text{A}] \quad [5.10]$$

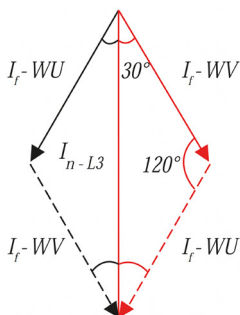


Figur 101: Fase- og netstrømme i trekantforbindelse

5.2.2.3. Forholdet mellem fase- og netstrøm i trekantkobling

Ved trekantforbindelse findes I_n ved en geometrisk sammenlægning af to fasestrømme. Man kan se på strømmene i et vektordiagram, som viser denne sammenlægning.

Lægger man de to fasestrømme sammen fra fig. 101, får man følgende vektordiagram:



Figur 102: Vektordiagram for fase- og netstrøm

Sammenlægningen af de to fasestrømme udgør altså netstrømmen i L_1 .

Betrakter man en af de ligebenede trekanter, udgør netstrømmen I_n grundlinjen og fasestrømmene I_f de to andre sider. Denne ligebenede trekant har de samme vinkler som ved udregningen af forholdet mellem fase- og netspændingerne, U_f og U_n . Se 5.2.1.3. [Forholdet mellem fase- og netspænding i stjernekobling.](#)

Da de ligebenede trekanter har samme forhold, kan det konkluderes, at forholdet mellem fase- og netstrøm ved trekantforbindelse er $\sqrt{3}$.

$$I_n = \sqrt{3} \cdot I_f \text{ [A]} \quad [5.11]$$

eller

$$\frac{I_n}{I_f} = \sqrt{3} \quad [5.12]$$

5.3. Belastninger og 3-fasede effekter (symmetrisk belastning)

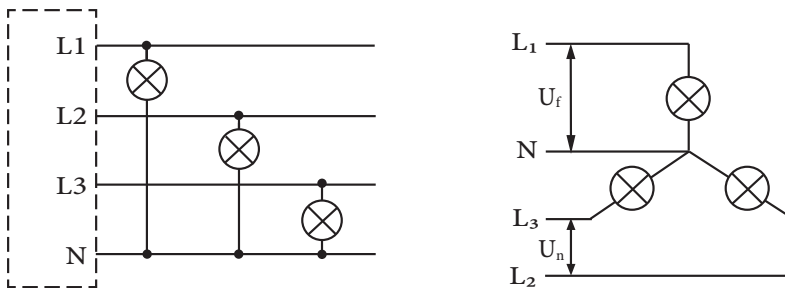
Med tre faser i forsyningen kan man tilslutte tre lige store modstande i enten en stjerne- eller trekantforbindelse. Tre lige store modstande i disse tilslutninger vil trække lige store strømme i de tre faser og kaldes derfor for en symmetrisk belastning. Ved en symmetrisk belastning vil der ikke være behov for en nulleleder, da de tre lige store strømme med deres faseforskydning på 120° vil udligne sig. Når strømmen føres frem i den ene fase, vil strømmen returnere i de to andre.

Symmetriske belastninger benyttes blandt andet i motorer, som har tre ens spoler, eller for varmelegemer i store varmeanlæg.

Ved symmetriske belastninger kan man nemt udregne den fulde afgivne effekt, hvilket forklares i det efterfølgende.

5.3.1 Stjernetkobling

I et symmetrisk belastet trefaset net, hvor belastningen er stjerneforbundet med tre ens modstande/impedanser, vil den fælles forbindelse danne et stjernepunkt, hvor spændingen vil være 0 V. Man har derfor skabt det, man kalder et kunstigt nulpunkt.



Figur 103: Symmetrisk belastning i stjernetkobling

Da man inde i maskinen ser på faseværdier, kan effekten for hver impedans skrives som:

$$P = U_f \cdot I_f \cdot \cos(\varphi) \quad [\text{W}] \quad [5.13]$$

Den samlede effekt kan derfor skrives som:

$$\Sigma P = 3 \cdot P \quad [\text{W}] \quad \Leftrightarrow \quad [5.14]$$

$$\Sigma P = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos(\varphi) \quad [\text{W}] \quad [5.15]$$

For en stjerneforbindelse er forholdet mellem fase- og netspændingen $\sqrt{3}$:

$$U_f = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \text{ [V]} \implies \quad [5.16]$$

$$\Sigma P = 3 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot I_f \cdot \cos(\varphi) \text{ [W]} \quad [5.17]$$

Forholdet mellem 3 og $\sqrt{3}$ er $\sqrt{3}$. Man kan derfor udskifte $\frac{3}{\sqrt{3}}$ med $\sqrt{3}$:

$$\Sigma P = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_f \cdot \cos(\varphi) \text{ [W]} \quad [5.18]$$

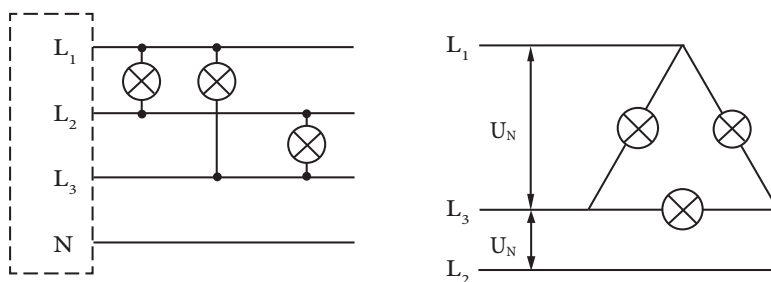
Da $I_f = I_n$ i en stjerneforbindelse, kan den samlede virkeeffekt i en symmetrisk stjernekobling skrives som:

$$\Sigma P = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos(\varphi) \text{ [W]} \quad [5.19]$$

Man benytter altså netværdierne for spænding og strøm, altså de værdier, som forsynes til maskinen, når man skal indsætte værdierne i formelen for den samlede virkeeffekt for en symmetrisk stjernekobling.

5.3.2 Trekantkobling

I et symmetrisk belastet trefasenet, hvor belastningen er trekantforbundet med tre ens modstande/impedanser, er modstandene forbundet mellem hver fase. Der er derfor ikke behov for en nulleleder.



Figur 104: Symmetrisk belastning i trekantkobling

Da man inde i maskinen ser på faseværdier, kan effekten for hver impedans skrives som:

$$P = U_f \cdot I_f \cdot \cos(\varphi) \quad [\text{W}] \quad [5.20]$$

Den samlede effekt kan derfor skrives som:

$$\Sigma P = 3 \cdot P \quad [\text{W}] \quad \Leftrightarrow \quad [5.21]$$

$$\Sigma P = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos(\varphi) \quad [\text{W}] \quad [5.22]$$

For en trekantforbindelse er forholdet mellem fase- og netstrømmen $\sqrt{3}$:

$$I_f = \frac{I_n}{\sqrt{3}} \quad [\text{A}] \quad \Rightarrow \quad [5.23]$$

$$\Sigma P = 3 \cdot U_f \cdot \frac{I_n}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\varphi) \quad [\text{W}] \quad [5.24]$$

Forholdet mellem 3 og $\sqrt{3}$ er $\sqrt{3}$. Man kan derfor udskifte $\frac{3}{\sqrt{3}}$ med $\sqrt{3}$:

$$\Sigma P = \sqrt{3} \cdot U_f \cdot I_n \cdot \cos(\varphi) \quad [\text{W}] \quad [5.25]$$

Da $U_f = U_n$ i en trekantforbindelse, kan den samlede virkeeffekt i en symmetrisk stjernekobling skrives som:

$$\Sigma P = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos(\varphi) \quad [\text{W}] \quad [5.26]$$

Man benytter altså netværdierne for spænding og strøm, altså de værdier, som forsynes til maskinen, når man skal indsætte værdierne i formlen for den samlede virkeeffekt for en symmetrisk trekantkobling.

Man kan også se, at ved udregning af virkeeffekten i en symmetrisk belastning er formlen den samme for både stjerne- og trekantkoblinger.

5.4. Effekter i 3-fasede systemer

5.4.1 Virkeeffekt

5.4.1.1. 1-faset effekt

Virkeeffekten for en belastning tilsluttet mellem en fase og nullederen:

$$P = U_f \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad [\text{W}] \quad [5.27]$$

5.4.1.2. 2-faset effekt

Virkeeffekten for en belastning tilsluttet mellem to faser:

$$P = U_n \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad [\text{W}] \quad [5.28]$$

5.4.1.3. 3-faset effekt

Ved en symmetrisk belastning er virkeeffekten såvel ved stjernebelastning som ved trekantbelastning:

$$\Sigma P = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos(\varphi) \quad [\text{W}] \quad [5.29]$$

5.4.2 Belastningsfordeling

Ved tilslutning af brugsgenstande på nettet må man tilstræbe en ensartet belastning af faserne.

Ved ens belastning af alle faseledere vil der ikke opstå nogen strøm i nullederen, da summen af tre lige store strømme, som er faseforskudt 120° for hinanden, er nul.

Hvis belastningerne på de tre faser ikke er ens, vil strømmen i nullederen kunne bestemmes i et vektordiagram ved at foretage en geometrisk sammenlægning af de tre fasestrømmes vektorer. Nulstrømmen er en udligningsstrøm og er modsatrettet summen af fasestrømmene.

5.4.2.1. Afbrydelse af nettet

Kan de fire ledere i nettet ikke afbrydes samtidig, er det af vigtighed, at nullederen ikke brydes før de spændingsførende ledere. Sker dette, og man ikke har samme belastning på alle tre faser, vil der opstå en ligevægtstilstand i systemet, hvorved summen af de tre fasestrømmes øjebliksværdier bliver nul.

Dette vil medføre, at spændingsforholdene i systemet ændrer sig, hvorved brugsgenstande, der er tilsluttet de svagest belastede faser, udsættes for højere spænding end normalt og herved kan blive ødelagt.

Rækkefølgen for afbrydelse af nettet er derfor altid:

1. Spændingsførende ledere (faserne)
2. Nullederen
3. Jordlederen (beskyttelseslederen).

5.4.2.2. Tilslutning af nettet

Ved tilslutning af et 4-ledervekselstrømsnet skal nullederen tilsluttes før faserne.

Tilsluttes faserne først, kan det ovenstående problem ved afbrydelse af nettet opstå.

Man vil også opleve, at den påtrykte spænding på en komponent vil opstå på nulklemmen. Dette sker, fordi spændingsfaldet over komponenten vil være 0 V, da der ikke løber nogen strøm. Hvis man derfor tror, at nulklemmen altid har 0 V's potentiale, kan man stå med en stor overraskelse, hvis man rører ved nulklemmen.

Rækkefølgen ved tilslutning af ledningerne er derfor altid:

1. Jordlederen (beskyttelseslederen)
2. Nullederen
3. Spændingsførende ledere (faserne).

5.5. Spændingsfald

Den elektriske energi sendes fra elværk til forbruger gennem ledninger.

Da ledningerne yder en vis modstand mod strømmen, opstår der spændingsfald.

I Dansk Standard HD 60364, Elektriske lavspændingsinstallationer, findes der anbefalinger om det maksimale tilladte spændingsfald, regnet fra stikledningens begyndelse til tilslutningsstederne i installationen.

Der skelnes mellem forskellige typer installationer.

5.5.1 Formeltegn

Spændingsfaldet har formelbetegnelsen ΔU . Ved jævnstrømskredsløb kan spændingsfaldet beregnes således:

$$\Delta U = I \cdot R_l \quad [\text{V}] \quad [5.30]$$

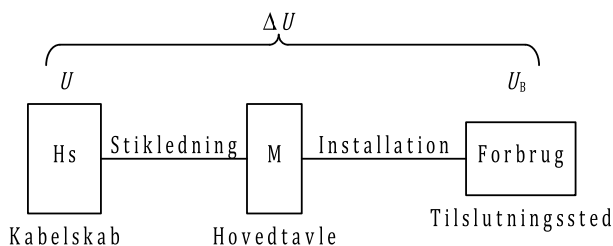
For vekselstrømskredsløb, hvor der kan være en faseforskydning, beregnes spændingsfaldet således:

$$\Delta U = I \cdot R_l \cdot \cos(\varphi) \quad [\text{V}] \quad [5.31]$$

Ved beregninger af spændingsfald udgøres R_l af den samlede ledningslængde.

ΔU er forskellen mellem spændingen ved stikledningens (forsyningskablet til installationen) udgangspunkt og spændingen ved brugsgenstanden.

$$\Delta U = U - U_b \quad [\text{V}] \quad [5.32]$$



Figur 105: Forsyning af brugsgenstand for beregning af spændingsfald

5.5.2 Procentisk spændingsfald

Det tilladte spændingsfald i en installation er angivet i procent i henhold til Dansk Standard HD 60364, Elektriske lavspændingsinstallationer.

Det procentiske spændingsfald vil være:

$$\Delta U_{(\%)} = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100 \quad [\%] \quad [5.33]$$

I et eksempel, hvor man regner med samme ledningsstørrelse og strømforbrug, må en fordobling af afstanden for forsyningskablet resultere i en fordobling af spændingsfaldet. Det procentiske spændingsfald vil derfor også blive fordoblet.

Oplever man, at det procentiske spændingsfald overstiger de anbefalede værdier for Dansk Standard HD 60364, Elektriske lavspændingsinstallationer, må man benytte ledninger med et større kvadrat. Dermed mindskes ledningsmodstanden i forsyningsledningerne, og man kan opnå procentiske spændingsfald, som ligger inden for de anbefalede værdier.

5.5.3 1-faset belastning

Ved 1-fasede belastninger kan spændingsfaldet beregnes ved:

$$\Delta U = I \cdot R_l \cdot \cos(\varphi) \quad [V] \quad [5.34]$$

hvilket er det samme som forskellen på spændingen ved installationsudgangspunkt U og spændingen ved belastningen U_B .

$$\Delta U = U - U_B \quad [\text{V}] \quad [5.35]$$

Da strømmen vil løbe i både fase- og nullelederen, beregnes R_l til:

$$R_l = \frac{\rho \cdot 2 \cdot l}{S} \quad [\Omega] \quad [5.36]$$

ρ : Lederens specifikke modstand $[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}]$

l : Installationslængden for brugsgenstanden $[\text{m}]$

S : Forsyningsledningens kvadrat $[\text{mm}^2]$

5.5.4 2-faset belastning

Større belastninger, fx varmelegemer, tilsluttes ofte to faser, altså 400 V.

Spændingsfaldene i hver faseledning kan så beregnes efter formlen:

$$\Delta U_f = I \cdot R_l \cdot \cos(\varphi) \quad [\text{V}] \quad [5.37]$$

Spændingen ved brugsgenstanden:

$$U_B = U - (2 \cdot \Delta U_f) \quad [\text{V}] \quad [5.38]$$

5.5.5 3-faset belastning

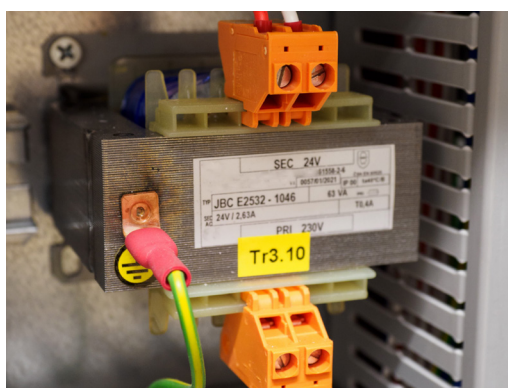
Ved en symmetrisk 3-faset belastning kan spændingsfaldet i hver faseleder beregnes efter formlen:

$$\Delta U_f = I \cdot R_l \cdot \cos(\varphi) \quad [\text{V}] \quad [5.39]$$

Der vil ved denne belastningsform ikke gå strøm i nullelederen, hvorfor der ikke vil ske spændingsfald i nullelederen.

6. Transformere

Transformeren er en vekselstrømsmaskine, men i modsætning til andre maskiner har den ingen bevægelige dele. Den tilføres elektrisk energi og afgiver elektrisk energi igen. Siden man gik over til at distribuere elektricitet som vekselstrøm, har transformeren fået stor udbredelse i såvel forsyningsnettet som i elektriske apparater.



Figur 106: *Transformer*

Den praktiske udførelse af en transformer kan variere en del, alt efter hvad den skal anvendes til.

Transformeren anvendes oftest til:

- at omsætte en høj vekselspænding fra forsyningsnettet til en lavere vekselspænding, som kan anvendes i almindelige installationer
- at opnå en elektrisk adskillelse mellem to strømkredse
- at omsætte en fast vekselspænding til en variabel vekselspænding
- at omsætte en høj vekselspænding eller vekselstrøm til en praktisk målelig størrelse
- at omsætte en lav vekselspænding til en høj vekselspænding.

I dette afsnit vil der ikke tages højde for tab i transformeren, altså den varmeafvikling, der også skal leveres energi til. Der ses altså på en ideel transformer, hvor den energi der kommer ind, også er den energi der kommer ud.

6.1. Transformerprincippet

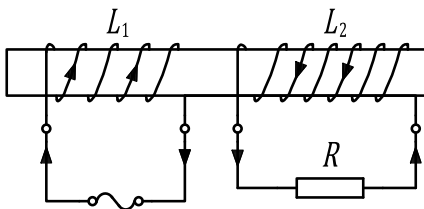
Transformationen mellem spændingerne kaldes for gensidig induktion, hvilket blev vist i afsnittet omkring magnetisme, [3.6. Transformerprincippet/gensidig induktion](#).

Man transformerer altså mellem spændingerne vha. magnetisme.

En jernstang omvikles med to adskilte spoler, L_1 og L_2 .

Sender man vekselstrøm gennem spolen L_1 , altså en varierende strøm, vil magnetfeltet ændres. Som modreaktion vil der derfor til stadighed induceres vekselspænding og vekselstrøm i spolen L_2 .

Strømmen i L_1 skaber et magnetfelt i jernstangen, og denne magnetisme inducerer derefter en elektromotorisk kraft i L_2 . Dette kaldes for gensidig induktion og benyttes i transformere.



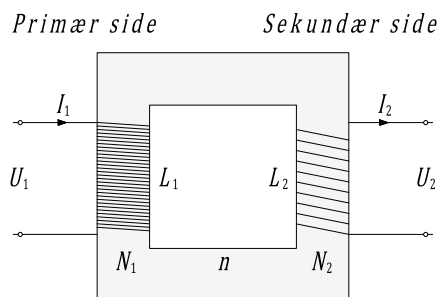
Figur 107: Gensidig induktion

6.2. Transformerens opbygning

Den kraftigste virkning opnås, når den magnetiske modstand er mindst mulig.

I reglen udformer man derfor jernkernen som en lukket ring. I den lukkede ring kan man opretholde et magnetisk kredsløb, som uden nævneværdig magnetisk modstand kan løbe i jernkernen og ikke i luften.

Apparatet kaldes da en transformer, og L_1 kaldes primærviklingen, mens L_2 kaldes sekundærviklingen.



Figur 108: Transformer med lukket jernkerne

I hver af sekundærspolens vindinger vil der induceres en vis vekselspænding, og da vindingerne er serieforbundne, kan der opnås fx 100 gange så stor spænding ved at udføre L_2 med 100 vindinger i stedet for én. Udføres L_2 med 100 gange så mange vindinger som L_1 , vil sekundærspændingen være ca. 100 gange større end primærspændingen. Man kan derfor også transformere spændingen ned, ved at sekundærviklingen har færre viklinger end primærviklingen.

Spændingsforholdene mellem primær- og sekundærsiderne er derfor ligefrem proportionale med antallet af vindinger.

6.3. Virkemåde

Når de magnetiske forhold ændres omkring en leder, bliver der induceret en spænding i lederen, og dette er grundlaget for transformerens virkemåde.

Tilsluttes primærviklingen en vekselspænding, vil der gå en vekselstrøm i viklingen, og denne strøm vil skabe et magnetisk vekselfelt i jernkernen. Vekselfeltet inducerer en elektromotorisk kraft i både primær- og sekundærspolerne. Hvis sekundærspolen er tilsluttet en belastning, så der dannes en lukket kreds, vil der gå en strøm i sekundærspolen.

Spændingen over den enkelte vikling er ens for både primær- og sekundærviklingen, så forholdet mellem primær- og sekundærspænding bliver det samme som forholdet mellem primær- og sekundærvindingstal (N_1 og N_2).

6.4. Omsætningsforhold

6.4.1 Transformerens omsætningsforhold

Som nævnt er transformerens omsætningsforhold forholdet mellem antallet af vindinger på primærside og sekundærside. Det kan udregnes med følgende formel, hvor n er omsætningsforholdet, der er et ubenævnt tal, N_1 er antallet af vindinger på primærsiden, og N_2 er antallet af vindinger på sekundærsiden.

$$n = \frac{N_1}{N_2} \quad [\quad] \quad [6.1]$$

6.4.2 Spændingens omsætningsforhold

Da spænding pr. vinding er ens for primær og sekundær, når der ses bort fra det spændingsfald, der opstår i vindingerne under belastning, kan omsætningsforholdet også udregnes tilnærmelsesvis med følgende formel:

$$n = \frac{U_1}{U_2} \quad [\quad] \quad [6.2]$$

Hvis det primære vindingstal N_1 er 10 gange større end det sekundære vindingstal N_2 , er den primære spænding U_1 også 10 gange større end sekundærspændingen U_2 .

Man kan derfor opsætte følgende:

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad [\quad] \quad [6.3]$$

eller

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_1}{n} \quad [\text{V}] \quad [6.4]$$

6.4.3 Strømmens omsætningsforhold

Ser man på den ideelle transformer uden tab, må den tilgående energi være den samme som den afgivne energi.

$$P_1 = P_2 \quad [\text{W}] \quad [6.5]$$

Indsætter man Ohms lov i dette udtryk, får man:

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad [\text{W}] \quad [6.6]$$

Vender man rundt på dette udtryk, vil man se, at strømmen er omvendt proportional med spændingen, eller transformerens omsætningsforhold:

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{U_1}{U_2} = I_1 \cdot n \quad [\text{A}] \quad \Longleftrightarrow \quad [6.7]$$

$$n = \frac{I_2}{I_1} \quad [\quad] \quad [6.8]$$

Hvis man derfor transformerer spændingen ned, så vil strømforbruget på sekundærsiden være tilsvarende højere. Er spændingen 10 gange lavere på sekundærsiden, vil strømmen dermed være 10 gange højere.

Dette er en stor årsag til, at man skal passe på, når man installerer lavspændingssystemer. Mange begår den fejl at tænke, at ved lavere spænding er der mindre fare. Dette er ikke gældende ved dimensionering af ledningerne. Ved et 12 V's system må strømmen være ca. 20 gange højere for at kunne afsætte den samme effekt.

Der er her en vigtig formel, man skal huske fra Ohms lov:

$$P = I^2 \cdot R \text{ [W]} \quad [6.9]$$

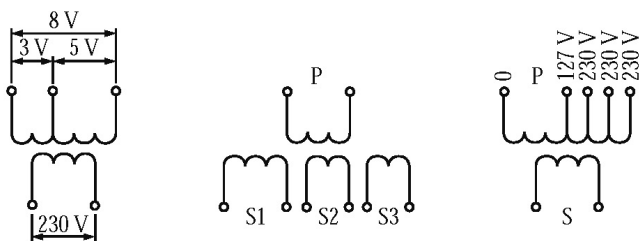
Den afsatte effekt i ledningerne er i 2. potens, hvorfor 20 gange større strøm afsætter (20^2) 400 gange større varmeeffekt i ledningerne, end hvis man forsynede lamperne med 230 V. Man skal derfor benytte større ledninger i lavvoltage-systemer for at undgå brandfare.

Et eksempel er ledningerne, der sidder på batteriet i en bil. De er heller ikke helt tynde.

6.5. Viklingsudtag

Mange transformere udføres med udtag på viklingerne. Disse udtag kan laves på både primær- og sekundærviklingen. Herved gives der mulighed for flere primær- og sekundærspændinger. I forsyningstransformere er det almindeligt, at primærviklingen har et antal udtag, så man herved kan tilpasse sekundærspændingen til den højspænding, der er på stedet. Grunden til, at udtagene er placeret i primærviklingen, er, at strømmene, der skal kobles på, er mindre end sekundærstrømmene.

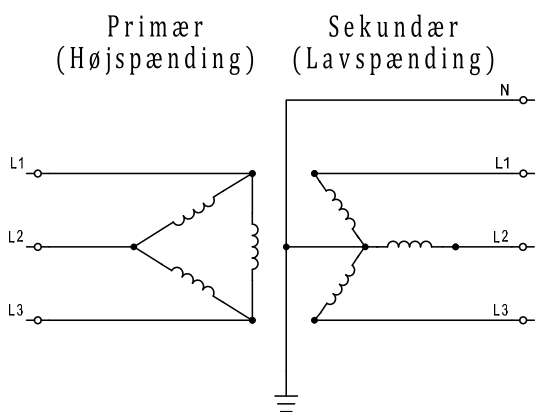
Transformeren kan også forsynes med fx flere adskilte sekundærviklinger. Herved kan samme primærvikling forsyne flere adskilte sekundære kredsløb.



Figur 109: Transformere med flere udtag

6.6. 3-fasede transformere

Da vores forsyningsnet er opbygget som et 3-faset net, bruges der 3-fasede transformere, når alle faser ønskes ført videre ved en anden spænding. Transformatoren opbygges normalt som en jernkerne med tre ben. På hvert ben er der anbragt en primær og en sekundær vikling.



Figur 110: 3-faset forsyningstransformer fra højspænding til lavspænding

Viklingerne kan forbindes i stjerne eller trekant.

Da der ikke er fremført en nulleleder i højspændingsnettet, er primærviklingen i forsyningstransformere ofte trekantforbundet. Lavspændingsviklingen er stjerneforbundet for at muliggøre tilslutning af et 4-leder 3 x 230/400 V net samt jordforbindelse af stjernepunktet.

6.6.1 Stjernekobling

Det er den oftest anvendte kobling for sekundærviklingerne i en transformer i forsyningsnettet. Fordelen ved denne kobling er, at der er mulighed for at udtage de fire ledere (jordlederen udtages senere) til installationerne. Tre ens fasespændinger mellem nul og hver af de tre faser. Der er også mulighed for at udtage netspændinger mellem to eller tre faser. Nulpunktet jordforbindes normalt. Derved får man fastlagt fasespændingerne i forhold til et potentiale.

Ulempen ved stjernekobling er, at en stor belastning på en fase på lavspændingsnettet også giver en stor belastning på en fase i højspændingsnettet.

6.6.2 Trekantkobling

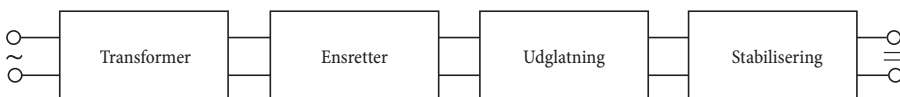
Denne kobling er meget lidt anvendt for sekundærviklingerne i transformere til forsyning af lavspændingsnettet, da der ikke er mulighed for at udtage fasespændinger. Det er heller ikke muligt at jordforbinde noget stjernepunkt, så i lavspændingsnettet ses denne kobling meget sjældent.

7. Ensretning

Der er blevet gennemgået teorierne vedrørende jævnspænding, og hvordan man frembringer en vekselspænding. Mange komponenter, apparater, maskiner og styringsanlæg benytter jævnstrøm. Da man normalt forsyner alle disse ting med vekselstrøm, må man lave en ensretning af spændingen.

I en strømforsyning med ensretning indgår der forskellige typiske enheder, såsom:

1. Transformer
2. Ensretter
3. Udglatning
4. Stabilisering.



Figur 111: Elementerne i ensretning af vekselstrøm

7.1. Transformer

Til at starte med skal den høje spænding på normalt 230 V tilpasses og transformeres ned til en passende størrelse. Meget elektronik skal kun forsynes med 5 V eller 12 V, og mange styringsanlæg forsynes med 24 V. Til dette benyttes en transformer.

Yderligere kan transformeren også give en galvanisk (metallisk) adskillelse af primær- og sekundærsiderne. Transformerens spoler kan også have en dæmpende virkning på støjimpulser.

Transformerens formål er derfor:

1. Tilpasning af den nødvendige spænding
2. Galvanisk adskillelse af jævnstrømskredsen fra forsyningsnettet
3. At hindre støjimpulser fra nettet i at komme ind i styringsanlægget.

7.2. Ensretter

Da hovedparten af elektroniske styringer anvender jævnspænding som forsyning, er det nødvendigt at ensrette den nedtransformerede vekselspænding.

Der findes i grove træk to måder at ensrette vekselspænding på, nemlig ved enkeltensretning eller dobbeltensretning.

7.2.1 Dioden



Figur 112: *Symbol for en ensretterdiode*

Ensretningen foretages ved hjælp af halvlederdiode, eller som dioderne benævnes i denne sammenhæng, ensrettere.

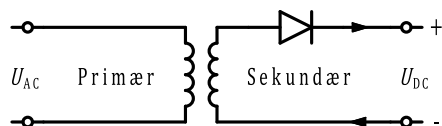
En halvlederdiode er en komponent, som er fremstillet af to typer metal, primært silicium. Deres egenskab er, at de kun vil lede strømmen i den ene retning.

Hvis man påtrykker spændingen i modsat retning, vil man mætte et spærrelag mellem metallerne, og dioden vil derfor spærre for strømmen. Påtrykker man derimod spændingen i den anden retning, vil spærrelaget åbne sig, og dioden vil lede strømmen.

Dioderne vil have et givent spændingsfald over sig afhængigt af de to metaller, som dioden er bygget af. En diode vil normalt have 0,7 V over sig, men de kan også fås med andre spændinger, bl.a. 1,2 V.

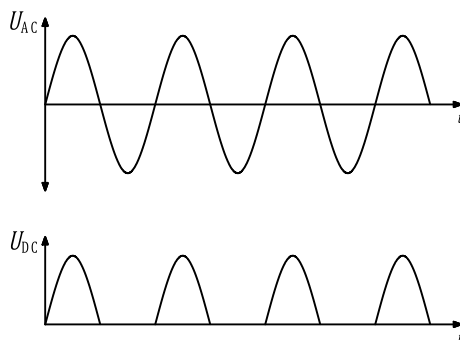
7.2.2 Enkeltensretning

Enkeltensretningen har den ulempe, at den kun ensretter vekselspændingens ene halvperiode, hvorfor vekselspændingstiden bliver ”skævt” belastet, hvilket igen betyder, at transformatoren skal være ca. dobbelt så stor som nødvendigt for en dobbeltensretter. Desuden vil en senere udglatning og filtrering komponentmæssigt være dyrere at udføre.



Figur 113: Enkeltensretning i en vekselspænding

På grund af ovennævnte ulemper ved enkeltensretning anvendes denne type ensretter kun, hvor der er tale om meget små jævnspændingsbelastninger.

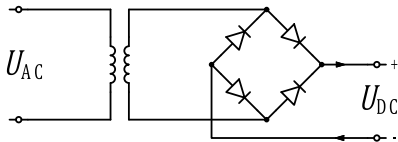


Figur 114: Spændingsforløb med enkeltensretning

Da dioden spærrer i den ene retning, vil man derfor kun have de positive spændinger tilbage. Man har altså en pulserende jævnspænding, hvor spændingen er nul i halvdelen af tiden. Da dette ikke er så hensigtsmæssigt, benyttes i stedet en dobbeltensretning, også kaldet brokobling.

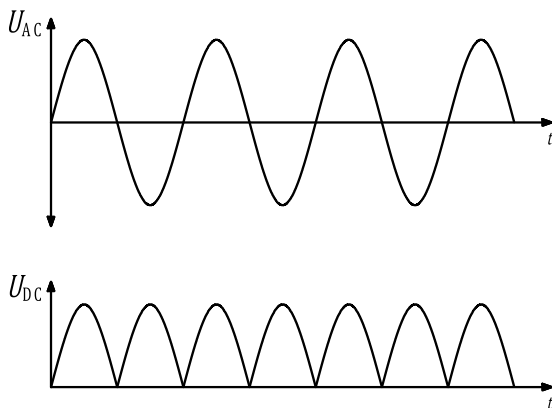
7.2.3 Dobbeltensretning/brokobling

Den mest udbredte form for ensretning foretages ved hjælp af dobbeltensretning. Denne ensrettertype har den fordel, at den ensretter begge vekselspændingens halvperioder.



Figur 115: Dobbeltensretning/brokobling

Dobbeltensretteren kaldes også en brokobling eller en Graetz-kobling. Selv om den spænding, som kommer fra ensretteren, pr. definition er en jævnspænding, er den dog langt fra jævn og kaldes derfor en pulserende jævnspænding. I enkelte tilfælde kan denne spænding anvendes uden videre behandling, fx til DC-motorer og opladning af batterier.



Figur 116: Spændingsforløb med dobbeltensretning

En elektronisk styring vil dog ikke kunne anvende pulserende jævnspænding, hvorfor det vil være nødvendigt at udglatte den.

7.3. Udglatning

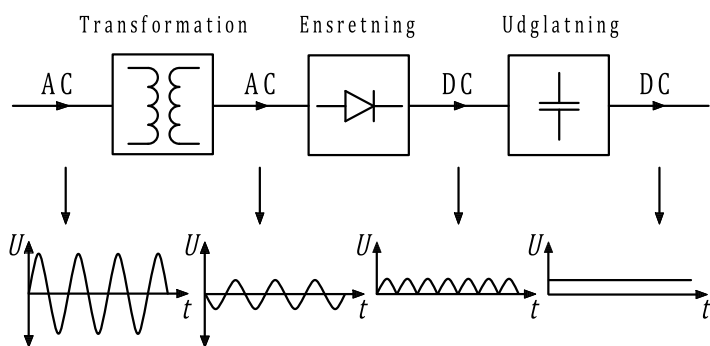
Udglatning af den pulserende jævnstrøm sker ved at indsætte en kondensator. I dette tilfælde vil det være en forholdsvis ren jævnspænding, som kommer fra ensretteren.

Kondensatoren vil lade sig oplade, når spændingen overstiger kondensatorens spænding. Når spændingen fra brokoblingen igen falder, vil kondensatoren forsyne kredsløbet i stedet og opretholde spændingen. Spændingen vil dog falde en smule mellem hver spændingstop. Jo større kondensator man benytter, jo bedre kan man opretholde spændingen, og jævnspændingen vil være udglattet.

Den afgivne spænding vil være lig med sekundærspændingens spidsværdi eller $U_{\text{sek}} \cdot \sqrt{2}$. Det er forhold, man må tage hensyn til.

Hvis transformatorens $U_{\text{sek}} = 12 \text{ V}$, vil man få en udglattet jævnspænding på:

$$U_{\text{dc}} = U_{\text{sek}} \cdot \sqrt{2} = 12 \cdot 1,414 = 17 \text{ V} \quad [7.1]$$



Figur 117: Fra vekselspænding til udglattet jævnspænding

7.4. Stabilisering

Den viste DC-forsyning er ikke stabiliseret, hvilket betyder, at dens afgivne spænding er belastningsafhængig. Samtidig med at spændingen falder ved belastning, vil den ved større og større belastning være overlejret med en større og større brumspænding eller ripple-spænding, som den også kaldes. Denne brumspænding kommer af, at jævnspænding stadig pulserer lidt, da kondensatoren ikke kan lave en 100 % udglatning.

For stabilisering af spændingen på spændingsforsyningens udgangsklemmer kan benyttes forskellige metoder. Man kan blandt andet benytte en zenerdiode, som er en komponent, der altid vil opretholde samme spænding over sig. Sammen med zenerdioden vil man også benytte en modstand, som skal tage det resterende spændingsfald.

8. Målinger

Måleinstrumenter benyttes til at bestemme elektriske værdier, enten for udregning af andre værdier ved hjælp af Ohms lov eller blot for at kontrollere, om der eventuelt er spænding eller ikke er spænding. Er der elektrisk forbindelse, altså gennemgang, eller er der den ønskede isolation? Gennemgangstesten kan fx afgøre, om en kontakt er sluttet, eller en komponent eventuelt er gået i stykker.

Ordet ”meter” betyder måler, hvorfor et voltmeter måler spænding, ligesom et termometer måler temperatur.

I dag er stort set alle instrumenter digitale, og man kan nemt aflæse den ønskede værdi på en LCD-skærm. Det er dog vigtigt, at man kender til både måleprincipper, typer af instrumenter, samt hvorledes instrumentets indre modstand kan påvirke måleresultatet.

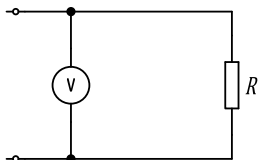
Der findes utroligt mange forskellige typer instrumenter, og det er vigtigt, at man vælger det rigtige. Instrumentets kompleksitet skal afspejle, hvor kompleks målingen er. Det giver ikke mening at slæbe en stor installationstester med ud til en kunde blot for at måle en spænding.

I det følgende afsnit forsøges givet en grov gennemgang af de instrumenttyper og -principper, der oftest anvendes til måling af strøm, spænding, modstand og effekt, samt en introduktion til installations-testeren.

8.1. Voltmeter/spændingstester

8.1.1 Måleprincip

Ved spændingsmåling benyttes et voltmeter. Instrumentet tilsluttes som vist på skitsen.



Figur 118: Måling af spænding med voltmeter

Et voltmeter indsættes parallelt, hvor man ønsker at måle spændingen. Den ene probe benyttes til at måle potentialet, og den anden benyttes til at give en reference til målingen.

Voltmeteret måler altså et givent ”tryk” det pågældende sted og benytter en reference til at give sit udslag. Voltmeteret giver altså en referencemåling.

8.1.1.1. Spændingspotentiale (U)

Ønsker man at måle det givne spændingspotentiale et givent sted, skal man indsætte referenceproben 0 V. Udslaget vil så vise spændingsniveauet på den givne klemme. Dette gøres fx i stikkontakten, hvor den ene pind tilsluttes 0 V, og man bør derefter måle ca. 230 V.

Indsætter man proberne på to faser, får man i stedet ca. 400 V, da det er den vektorielle distance mellem to faser med 120° forskydning. Her er det to potentialer, man lægger vektorielt sammen.

8.1.1.2. Spændingsfald (ΔU)

Ønsker man at måle et givent spændingsfald over en komponent, indsætter man proberne på hver sin side af komponenten. Man vil her måle potentialet før modstanden og derefter trække spændingen på den anden side fra.

Kender man strømmen eller modstandens størrelse, kan man derefter indsætte værdierne i Ohms lov.

8.1.2 Indre modstand

Voltmeterets indre modstand er meget stor ($k-/M\Omega$). Dette er for ikke at ødelægge måleresultatet, samt for ikke at skabe en kortslutning, når man måler direkte på spændingsforsyningen. Man vil altså gerne måle med så lille en målestrøm som muligt.

Den indre modstand vil være afhængig af det måleområde, man benytter, hvorfor man helst skal indstille voltmeteret, så man måler nærmest den mindst mulige indstilling. Hvis man måler en spænding, som er meget lav i forhold til voltmeterets indstillede måleområde, vil man øge fejlvisningen.

8.1.3 Spændingstester



Figur 119: Spændingstester

Til daglig benytter elektrikerer primært voltmeteret for at konstatere, om der er spænding eller ej (230/400 V).

Instrumentet er nemt at have med i lommerne, og visse spændingstestere giver en lyd, når der konstateres spænding.

Instrumentet er desuden lavet uden indstillingsmuligheder, så man ikke fejlbetjener det i de situationer, hvor det er vigtigt at konstatere, at der ingen spænding er.

Inden man påbegynder arbejde på elektriske installationer, skal det først konstateres, at man arbejder spændingsløst. Derfor er spændingstesteren en god og nem ven at have med, og de manglende indstillingsmuligheder sikrer, at man ikke laver en fejlmåling.

8.1.4 Glimlamper

En glimlampe kan benyttes til at konstatere, om der er en påtrykt spænding på en given klemme. De fås i forskellige udgaver, blandt andet i skruetrækker af billigt format.

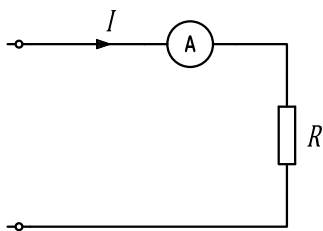
Det er dog ikke tilrådeligt at benytte disse, selv om de virker meget nemme, da de ikke altid er troværdige. De kan dog være nyttige, hvis man vil se, hvilken klemme der er fase, og hvilken der er nulleleder.

Vigtigt. Glimlamper må ikke benyttes til at konstatere, om der er spændingsløst, inden arbejde på elektriske installationer, da de ikke er pålidelige.

8.2. Amperemeter/tangamperemeter

8.2.1 Måleprincip

Ved strømmåling benyttes et amperemeter. Instrumentet tilsluttes som vist på skitsen.



Figur 120: Måling af strøm med amperemeter

Et amperemeter indsættes i serie med den belastning, hvis strøm man ønsker bestemt. Amperemeteret virker ligesom en tæller, som altså tæller mængden af elektroner, som passerer apparatet.

Den største ulempe ved en traditionel strømmåling er, at man skal bryde kredse for at kunne indsætte amperemeteret. Dette kan man undgå ved at benytte et tangamperemeter, som beskrevet senere i afsnittet.

8.2.2 Indre modstand

Det er ønskeligt, at amperemeteret har en meget lille indre modstand. Dette er for ikke at påvirke strømmen i kredsen, da man gerne vil opretholde spændingsfaldet over den målte modstand.

Det er derfor også vigtigt, at man ikke har indstillet sit måleinstrument til amperevisning, når man ønsker at måle en spænding, da man så vil trække en meget stor strøm. Ud over at man vil skabe en kortslutning i installationen, så vil instrumentet også kunne gå i stykker. Derfor er der indsat en sikring i de bedre instrumenter. Hvis strømmålingen ikke virker, så bør man tjekke denne sikring.

8.2.3 Tangamperemeter



Figur 121: Tangamperemeter med lukket tang

Til måling af vekselstrøm kan der også benyttes et tangamperemeter. Der vil normalt også være mulighed for at tilslutte målepinde, så man kan måle spænding og modstand/gennemgang.

Tangamperemeteret har den store fordel, at man ikke behøver at åbne kredsløbet for at indsætte instrumentet i kredsen. Af denne grund er tangamperemeteret blevet meget populært. Til gengæld kan det have en dårligere nøjagtighed, specielt ved meget små strømme, eller hvis tangen ikke er lukket korrekt.

Tangen kan åbnes og derefter sluttet omkring den ledning eller skinne, man ønsker at måle strømmen i. Tangamperemeteret virker i princippet som en transformer, hvor ledningen virker som primærvinding, mens tangen er jernkernen, og instrumentet er tilsluttet en sekundærvikling. Tanginstrumentet kan have flere måleområder.

Da tangen virker som transformerens jernkerne, hvor magnetismen skal løbe rundt, er det vigtigt, at tangens flader er rene og slutter tæt mod hinanden under måling.



Figur 122: Måling med tangamperemeter

Det er vigtigt, at man kun måler på en enkelt ledning ad gangen. Måler man på alle lederne i et kabel, vil strømmene i hver leder udligne hinanden, og instrumentet vil derfor ikke give noget udslag.



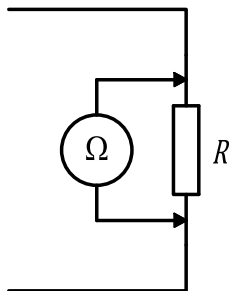
Figur 123: *Tangamperemeter med åben tang*

Tangamperemeteret på figuren er med åben tang. De kan benyttes ved nogenlunde bestemmelse af strømmen, men da tangen er åben og ikke har en lukket jernkerne, skal man regne med en vis usikkerhed.

8.3. Ohmmeter

8.3.1 Måleprincip

Ved modstandsmåling benyttes et ohmmeter. Instrumentet tilsluttes som vist.



Figur 124: *Måling af modstand med ohmmeter*

Modstandsmåling foregår ved, at instrumentet selv sender en strøm ud i et kredsløb, og strømmens størrelse vil afgøre modstandens værdi. Det er derfor også vigtigt, at man ikke måler modstandsværdier, mens der er spænding på.

Yderligere skal man sikre sig, at der ikke er andre modstande, som eventuelt sidder parallelt med den målte modstand, da man i stedet vil måle den samlede modstand for parallelforbindelsen. Er man ikke sikker på, om der sidder modstande parallelt, skal man løsne det ene ben på modstanden, så man sikrer sig, at der ikke løber en målestrøm i andre retninger.

Modstandsmåling kan benyttes til fx at konstatere, om et varmelegeme eller en motorvikling er defekt.

Kender man den påsatte spænding, kan man også beregne strømmeaet vha. Ohms lov.

8.3.2 Indre modstand

Den indre modstand vil være afhængig af det måleområde, man benytter, hvorfor man helst skal indstille ohmmeteret, så man måler nærmest den mindst mulige indstilling. Hvis man måler en mod-

stand, som er meget lav i forhold til det indstillede måleområde, vil man øge fejlvisningen.

8.3.3 Gennemgangstest

Ohmmetrene er oftest udstyret med en gennemgangstest. Her ønskes altså påvist, om der er gennemgang eller ej. Det kan fx være for at se, om en kontakt er sluttet eller ej. Instrumentet vil ofte være udstyret med en lyd giver, som giver lyd, når der konstateres en gennemgang.

Gennemgangstesteren benyttes også til at se, om der er forbindelse mellem to ledninger eller klemmer. Vigtigst er den gennemgangstest, som påviser, at beskyttelseslederen er gennemgående, altså at der er en uafbrudt forbindelse.

8.3.4 Isolationsmåling

Til måling af store modstande, fx isolationsfejl i installationer og maskiner, kan man anvende et instrument med en spændingskilde i området 250 V-1000 V. Det normale universalinstrument (multimeter) har kun en spændingskilde på 9 V, hvilket ikke er tilstrækkeligt til at konstatere isolationsniveauet, inden en elinstallation tages i brug.

Instrumentet kaldes et isolationsprøveapparat eller ofte en ”megger”. Denne funktion findes også i installationstesteren, som er apparatet, man benytter til at verificere en installations funktionsniveau, inden man sætter spænding på installationen. Der er en kort introduktion til installationstesteren senere i dette afsnit.

8.4. Multimeter



Figur 125: *Multimeter*

Multimeteret er, som navnet antyder, et måleinstrument, som kan måle forskellige typer værdier. Primært værdierne spænding, strøm, modstand og gennemgang.

Yderligere er der indstillinger for måling af jævn- eller vekselværdier, og nogle instrumenter har også skalering for værdierne og eventuelt mulighed for måling af forskellige typer elektroniske komponenter.

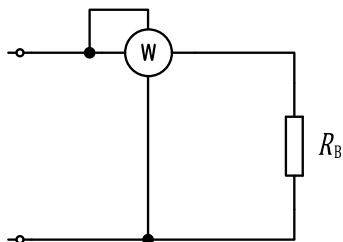
Der er som regel en tilslutning for fælles reference, og de andre tilslutninger er for måling af enten strøm eller spænding. Dette har noget at gøre med, om den indre modstand skal være stor eller lille, og for strømmen kan der være forskellige tilslutninger alt efter strømmens størrelse, da dette afgør, hvilken sikring i instrumentet som skal benyttes.

Man skal være opmærksom her, da fejlindstillinger ofte sker. Specielt er det vigtigt ikke at måle spænding, mens apparatet er klargjort til måling af strøm.

8.5. Wattmeter

8.5.1 Måleprincip

Ved måling af effekt benyttes et wattmeter. Instrumentet tilsluttes som vist på skitsen.



Figur 126: Måling af effekt med wattmeter

Wattmeteret består af både en spændings- og en strømspole. Spændingsspolen tilsluttes parallelt med belastning, og strømspolen tilsluttes i serie. Udslaget gives ved at multiplicere de to værdier vektorielt. Dvs. at udslaget kommer ud i virkeeffekt (watt).

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \text{ [W]} \quad [8.1]$$

8.5.1.1. Effekt i 3-faset belastning

Som det fremgår af ovenstående formel [8.1], er wattmeterets udslag korrigeret for faseforskydningsvinklen. Spændings- og strømspolen skal derfor tilsluttes to relative målinger med reference til samme vinkel.

I 4-lederbelastninger skal spændingsspolen tilsluttes nullelederen, da strømmen i netlederen er i fase med fasespændingen. Tilslutter man spændingsspolen forkert, vil wattmeterets udslag multiplicere spænding og strøm med en forkert vinkel og dermed give forkert udslag. Skal man måle på en 3-lederbelastning, hvor der ikke er fremført en nulleder, bliver man derfor nødt til at tilslutte spændingsspolerne over et kunstigt nulpunkt.

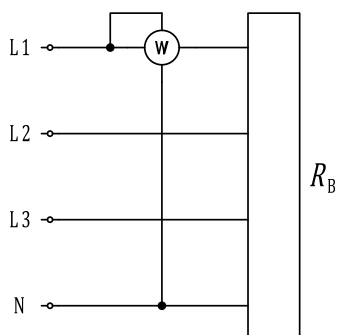
Efterfølgende vises effektmåling for symmetrisk og usymmetrisk belastning med fremført nul.

8.5.1.1.1. Symmetrisk belastning

Ved måling af den samlede effekt i en 4-leder symmetrisk belastning behøves kun et wattmeter. Den samlede effekt findes ved at multiplicere instrumentets udslag med 3.

$$\Sigma P = 3 \cdot P \text{ [W]}$$

[8.2]



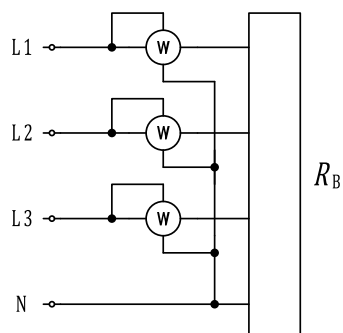
Figur 127: Måling af effekt i symmetrisk belastning

8.5.1.1.2. Usymmetrisk belastning

Skal man finde den samlede effekt i en ikkesymmetrisk belastning, behøves enten tre wattmetre eller et wattmeter til måling på tre faser ad gangen, og til sidst adderer man udslagene.

$$\Sigma P = P_{L_1} + P_{L_2} + P_{L_3} \text{ [W]}$$

[8.3]

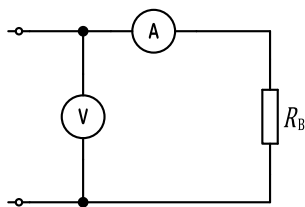


Figur 128: Måling af effekt i usymmetrisk belastning

8.5.1.2. Tilsyneladende effekt (S)

Benytter man nedenstående opstilling med volt- og amperemeter, vil man ved multiplikation af de to værdier få den tilsyneladende effekt (VA). Dette skyldes, at udslaget på amperemeteret er den fulde strøm og ikke vektorielt i samme vinkel som spændingen, og målingen inkluderer derfor også de reaktive værdier.

$$S = U \cdot I \quad [\text{VA}] \quad [8.4]$$



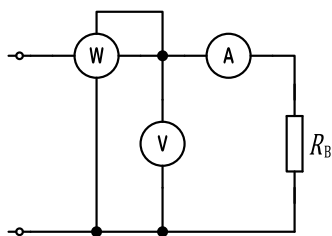
Figur 129: Måling af tilsyneladende effekt med både volt- og amperemeter

I en opstilling med ren ohmsk effekt kan dette godt lade sig gøre, da der ikke er nogen faseforskydning, og $\cos(\varphi) = 1$, og $S = P$.

8.5.1.3. Faseforskydningsvinkel – $\cos(\varphi)$

Hvis der er faseforskydning, så kan man finde faseforskydningsvinklen, $\cos(\varphi)$, ved at benytte begge opstillinger.

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} = \frac{P}{U \cdot I} \quad [\quad] \quad [8.5]$$



Figur 130: Måling for bestemmelse af faseforskydningsvinkel

8.6. Kilowatt-timemåler

Kilowatt-timemåleren er den måler, som man afregner sit strømforbrug efter. Den måler den elektriske energi, som er leveret til installationen over tid.

Ved hjælp af en installeret kWh-måler kan virkeeffekten (P) findes.

Først afbrydes der for den del af installationen og for de brugsgenstande, der ikke skal medtages i målingen. Ved derefter at indkoble måleobjektet i en bestemt tid og samtidig aflæse antal omdrejninger eller blink på måleren kan effekten beregnes, idet måleren er mærket med det antal omdrejninger/blink, der svarer til 1 kWh.

8.7. Valg af instrument og målemetode

8.7.1 Nøjagtighed/klasse

Instrumenter inddeles normalt i klasser, der oplyser om den målenøjagtighed, der kan opnås. Klassen angiver instrumentets målenøjagtighed i procent i forhold til indstillet skala.

Inddelingen sker oftest i følgende klasser: 0,2 / 0,5 / 1,0 og 2,5.

Der findes dog instrumenter i klasser under 0,2 og over 2,5, men disse er mere sjældne og beregnet til specielle formål.

Et instruments klasse angives normalt på instrumentets skala.

Instrumentets klasse kan være forskellig i AC- og DC-område.

Ved manglende angivelse henvises til vejledningen for instrumentet.

Det skal dog siges, at i elektrikerens dagligdag er præcisionen ikke det største problem. Her skal målingen blot vise, om der er noget eller ej, eller værdierne skal give en idé om, hvor niveauerne ligger.

Dette er blandt andet, fordi man aldrig kan få 100 % nøjagtige målinger. Grundet instrumentets indre modstande vil der altid være en lille unøjagtighed. I det følgende anvises opstillinger for, hvilken nøjagtighed man prioriterer mest.

8.7.2 Sand spænding/sand strøm

Da måleinstrumenter i et kredsløb må opfattes som modstande, vil volt- og amperemetres strøm- og spændingsspoler påvirke hinanden indbyrdes og de kredsløb, hvori de indsættes.

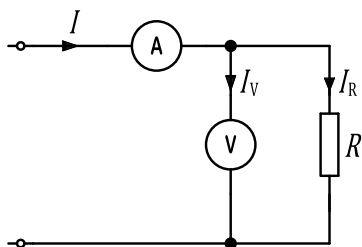
For at begrænse denne påvirkning må der vælges mellem metoderne:

- Rigtig spændingsmåling
- Rigtig strømmåling.

8.7.2.3.1. Sand spænding

På skitsen måles ”rigtig” spænding, hvorimod amperemetret viser ”forkert” strøm, fordi det både måler strømmen gennem modstanden og gennem voltmeteret.

$$R = \frac{U_R}{I_R + I_V} \quad [\Omega] \quad [8.6]$$



Figur 131: Rigtig spændingsmåling

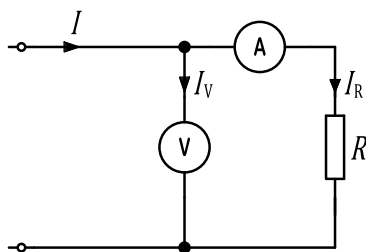
Beregner man modstanden efter Ohms lov, vil man altså beregne en værdi, som er mindre end den faktiske modstand i måleemnet.

Er modstanden i emnet lille i forhold til modstanden i voltmeteret, vil langt den største del af den samlede strøm gå gennem modstanden. Fejlen på den målte strøm vil derfor være så lille, at man kan tillade sig at se bort fra den.

8.7.2.3.2. Sand strøm

På skitsen måles ”rigtig” strøm, hvorimod voltmeteret viser ”forkert” spænding, fordi det måler spændingsfaldet over både modstand og amperemeter.

$$R = \frac{U_A + U_R}{I_R} \quad [\Omega] \quad [8.7]$$



Figur 132: Rigtig strømmåling

Beregner man modstanden efter Ohms lov, vil man altså beregne en værdi, der er større end den faktiske modstand i måleemnet.

Er modstanden i emnet stor i forhold til modstanden i amperemeteret, vil spændingsfaldet over amperemeteret være meget mindre end over modstanden. Fejlen på den målte spænding vil derfor være så lille, at man kan tillade sig at se bort fra den.

8.7.3 Måleværdi

Man skal være opmærksom på, om man indstiller sit måleinstrument til jævn- eller vekselmåling.

For jævnspændinger vil instrumentet vise middelværdien. Hvis man derfor måler på vekselspænding i denne indstilling, så vil udslaget vise 0 V, da middelværdien af en vekselkurve er nul. Det er derfor en af grundene til, at man skal benytte egnede instrumenter til konstatering af spændingsløst anlæg, inden man arbejder på elinstallationer.

For vekselspændinger vil instrumentet vise effektiv værdi, hvilket også er den værdi, man normalt er interesseret i.

Benytter man et billigt instrument, skal man være opmærksom på en ting. Disse instrumenter måler blot middelværdien og ganger derefter resultatet med formfaktoren, 1,1, inden den beregnede effektive værdi vises.

Hvis der er for meget støj og forvrængning på spændingskurven, vil middelværdien ikke være med en faktor 1,1 i forhold til effektivværdien, og den beregnede værdi vil derfor ikke være rigtig. Benytter man i stedet et instrument, som angiver ”True RMS”, så kan man stole på værdien, da udslaget tager forbehold for disse forvrængninger.

8.7.4 Kategori/KAT-klassificering

For at sikre at måleinstrumentet er testet til de kortslutningsniveauer, man arbejder med, er instrumenterne inddelt i kategorier (KAT (CAT)-klassificering: KAT II, KAT III, KAT IV).

Jo tættere man arbejder på forsyningspunktet, og jo højere spændinger man arbejder med, jo større kategori skal instrumentet have.

Arbejder man derfor nede i små elektroniske anlæg, kan man nøjes med en lav kategori, men jo tættere man kommer på forsyningspunktet, jo større kategori. Som elektriker må man ikke gå lavere end KAT III.

Digitale multimeter er klassificeret til forskellige elektriske parametre, så man skal undersøge, om et multimeter har passende KAT-klassificeringer, IP-koder og uafhængige verificeringssymboler,

for at sikre, at det instrument, du vælger, er blevet testet af et uafhængigt laboratorium og er sikkert at bruge til dine målinger.

Selv om man fastslår den korrekte klassificering i forhold til installationskategorien for overspænding (KAT II, KAT III eller KAT IV), bør man altid vælge et værktøj, der er klassificeret til den højeste kategori, man potentielt kan bruge det i, og vælge en spændingsklassificering, der passer til eller overstiger disse situationer.

KAT-klassificerede multimetre er designet til at minimere eller mindske risikoen for, at der opstår en lysbue inde i multimeteret. Klassificeringerne er normalt placeret nær indgangsstikkene.



Figur 133: *Placering af klassificering nær indgangsstikkene*

Der kan være forskellige klassificeringer for et instrument afhængigt af spændingsniveauet. Jo højere spænding, jo lavere klassificering.

Kort sagt, hvis du skal til at måle på en 480 V strømforsyningstavle, skal du bruge et måleinstrument, der som minimum er klassificeret iht. KAT III 600 V. Det betyder, at et måleinstrument klassificeret iht. KAT III 1000 V eller KAT IV 600 V også kan bruges i denne situation.

Måle-kategori	Beskrivelse	Eksempler
KAT IV	Trefase ved anlægstilslutning, alle udendørs ledere Kun begrænset af den anlægstransformer, der føder kredsløbet »50 kA kortslutningsstrøm	”Installationens oprindelse” – hvor lavspændingsforbindelsen (kabler ved serviceindgang) tilsluttes forsyningselskabet. Elmålere, primært overstrømsbeskyttelsesudstyr. Udendørs- og serviceindgang, forsyningsledning fra mast til bygning, fremløb mellem elmåler og tavle. Luftledning til fritliggende bygning, nedgravet kabel til dykpumpe.
KAT III	Trefaset fordeling, herunder enfaset kommerciel belysning «50 kA kortslutningsstrøm	Udstyr i faste installationer, såsom koblingsudstyr og flerfasede motorer. Strømskinne og ledere i industri anlæg. Ledere og korte forgreningskredsløb, enheder, der fødes direkte fra fordelingstavler. Belysningssystemer i større bygninger. Apparatudgange med korte forbindelser til serviceindgangen.
KAT II	Enfasede stikforbundne belastninger «10 kA kortslutningsstrøm	Apparater, bærbare værktøjer og andre husholdnings- og tilsvarende belastninger. Kontakter og lange stikledninger. Kontakter på mere end 10 meter (30 fod) fra KAT III-kilden. Kontakter på mere end 20 meter (60 fod) fra KAT IV-kilden.

Tabel 3: *Inddeling af klassificeringer (KAT)*

8.8. Installationstester

Installationstesteren er et af de mere avancerede instrumenter. Den benyttes til test af en installation, primært inden denne tages i brug. Installationstesteren er et instrument, som vil blive introduceret allerede på elektrikerens grundforløb.



Figur 134: *Installationstester*

I henhold til standarden DS/EN 60364, kapitel 6 om verificering, skal en installation gennemgå nogle tests, både før og efter at den er sat under spænding. Inden idriftsætning af en installation skal den ved en verificering gennemgå følgende tre elementer:

1. Eftersyn
2. Afprøvning (kontrol)
3. Rapportering.

Installationstesteren benyttes bl.a. til følgende tests:

- Isolationstest
- Test af jordelektrodens modstand til jord
- Test af udkobling af fejlstrømsafbrydere, både for strømniveau og udløsertid
- Spændingsmålinger
- Beregning af kortslutningsstrømme
- Eventuel beregning af spændingsfald
- Hukommelse til generering af rapporter
- Og meget mere.

Selv om der er mange funktioner i installationstesteren, så er de fleste udført med en hjælpeskærm, som viser, hvordan man skal tilslutte prøvepindene.

I begyndelsen kan den godt virke uoverskuelig, og man bør starte med at have en ved sin side, som kan sikre korrekt brug. Man skal blandt andet passe på, at man ikke sætter de forkerte tilslutninger på den forkerte side af fejlstrømsrelæet, da man her vil lave en direkte kortslutning, som kan forvolde stor skade, mest personligt.

Installationstesteren vil blive gennemgået i *Lærebog 2, Installationer* under installation og verifikation af elektriske installationer.

