

AARHUS TEKNIKUM  
SVAGSTRØMSAFDELINGEN

# MODSTANDE.

TILSKRIFT

SVAGSTRØMSTEKNISKE KOMPONENTER OG MATERIALER

T-MTL 1

SV. E. JENSEN  
AUGUST 1979.  
Revideret juni 1981.

INDHOLDSFORTEGNELSE.

	Side
Modstande, generelt	1
Temperatur- og spændingsafhængighed	2
Støj	3
Strømfortrængning	4
Termokraft	5
Størrelse og effekt	5
Stabilitet	5
 Lineære modstande	 6
Ikke-trådviklede modstande	11
Kulmassemstande	11
Kulfilmmodstande	14
Metalfilmmodstande	16
Metaloxidmodstande	17
Metal-glaze modstande	18
Trådviklede modstande	18
Variable modstande	20
Pålidelighed	23
 Ulineære modstande	 25
NTC-modstande	25
PTC-modstande	26
VDR-modstande	28
LDR-modstande	29

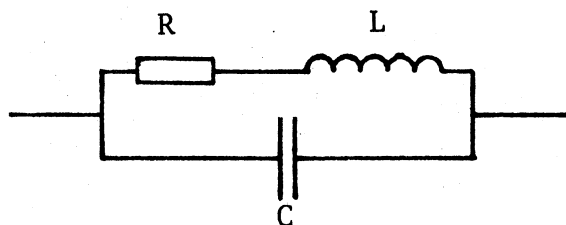
## MODSTANDE.

### GENERELT.

Vi vil i det følgende beskrive komponenten "en modstand". Herunder vil vi beskrive en række udførelsesformer og disses egenskaber med henblik på at lette valget af modstandstype til en forelagt opgave.

Grunden til at modstande fremstilles efter mange forskellige metoder er, at der til forskellige anvendelser stilles forskellige krav, og at komponenten "en modstand" ikke lader sig beskrive ved en enkelt parameter, som vi har gjort det i kredsløbsteorien.

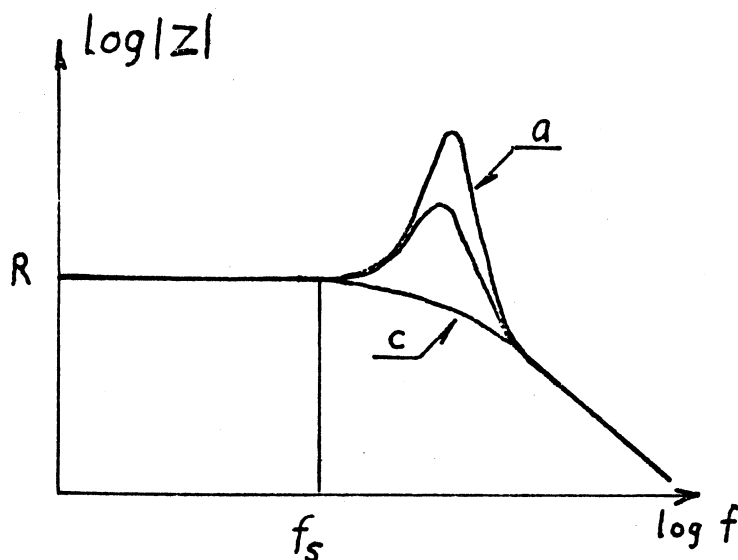
Hvis en modstand skal bruges i et bredt frekvensområde må man tage hensyn til både det elektriske- og det magnetiske felt omkring den. En grov model kan opstilles ved, at der i serie med den rene modstand indsættes en selvinduktion  $L$  og i parallel med denne serieforbindelse en kapacitet  $C$ , fig. 1. Størrelserne  $L$  og  $C$  kaldes rest-, parasitiske- eller residuelle parametre, og de er



Figur 1.

i høj grad afhængige af modstandens fremstillesmetode og dens montering i det aktuelle kredsløb. Bliver frekvensbåndet meget bredt, må modstanden beskrives som et kredsløb med fordelte parametre.

Figur 2 viser karakteristiske kurver over svagstrømsmodstandens impedansforhold som funktion af frekvensen. Ved frekvenser større end  $f_s$  er det de parasitiske parametre der bestemmer impedansforløbet.



Figur 2: Impedansforløb for modstande.

- a) Karakteristisk forløb for lave modstandsværdier,
- c) karakteristisk forløb for høje modstandsværdier.

#### Temperaturafhængighed.

Begrebet en modstands temperaturkoefficient er kendt. Det viser sig, at de materialer, som danner modstandsbanerne i svagstrømsmodstande hyppigt har en ulineær sammenhæng mellem modstand og temperatur, inden for det temperaturområde som forekommer i praksis.

#### Spændingsafhængighed.

De materialer, der anvendes til fremstilling af modstande udviser endvidere en modstand, som til en vis grad afhænger af spændingen. Analogt til temperaturkoefficienten  $\alpha$  indføres spændingskoefficienten  $k$  defineret ved ligningen:

$$R(U) = R(0) (1 + kU) \Rightarrow k = \frac{R(U) - R(0)}{R(0)} \cdot \frac{1}{U} \Rightarrow k = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{U}$$

I praksis ligger  $k$  mellem nul og  $200 \cdot 10^{-6} /V$ .

Ulineariteten bestemmes ved at tvinge en meget ren sinusformet strøm gennem modstanden. Effektivværdien  $U_{3e}$  af den tredje harmoniske af spændingen over modstanden måles. Som et mål for en modstandstypes linearitet benyttes da størrelsen:

$$A_3 = 20 \log \frac{U_{1e}}{U_{3e}}$$

Støj.

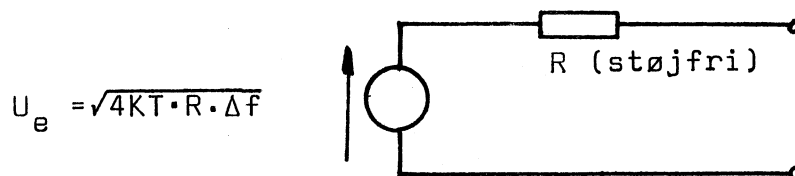
## Termisk støj.

I enhver leder vil ladningsbærernes termiske bevægelser give anledning til, at der opstår en støjspænding imellem lederens ender. Ifølge Nyquist er den maximale støjeffekt, der kan overføres fra en støjende modstand til en støjfri (fiktiv) modstand.

$$P_n = K \cdot T \cdot \Delta f$$

hvor  $K$  er Boltzmann's konstant,  $T$  lederens absolutte temperatur og  $\Delta f$  det frekvensbånd, støjspændingen måles over.

Da maximal effekt overføres, når belastningsmodstanden er lig generatormodstanden, kan der for en given modstand  $R$  angives følgende ækvivalentdiagram



der tilfredsstiller ovenstående ligning.

Støjspændingen har ingen diskrete frekvenskomponenter, men er fordelt over et kontinuert frekvensspektrum. Spændingens simple middelværdi er nul, og  $U_e$  kan betragtes som en fiktiv spænding, der kan behandles som en normal effektivværdi.

Spændingsgeneratoren kan på normal vis ækvivaleres med en strømgenerator. Den termiske støjspænding er den teoretisk nedre grænse for støjen i en modstand.

Når der løber en strøm igennem en modstand, bliver støjen stærkere end den termiske støj, som følge af to fænomener.

## Haglstøj.

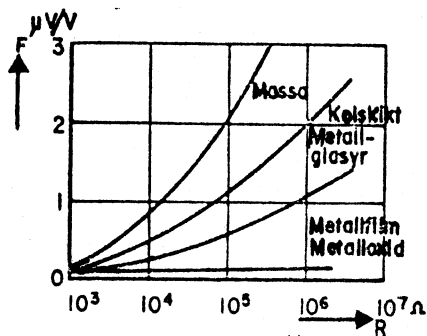
Da strømmen bæres af diskrete ladningsbærere, vil der, som følge af at ladningstransporten foregår uordnet omkring en middelværdi, opstå et bygefænomen kaldet hagleffekten, eller shot-noise. Elektrisk viser dette sig som en støjspænding over modstanden. Haglstøjen er ligesom den termiske støj fordelt over hele frekvensspektret - såkaldt "hvid støj".

Haglstøj forekommer i pn-overgange, d.v.s. den optræder i dioder og transistorer. Den mærkes ikke i metalliske ledere men svagt i homogene halvledere.

### Strømstøj.

Ved lave frekvenser virker der i halvledere og dermed beslægtede materialer tillige en strømstøj, eller  $\frac{1}{f}$ -støj. Denne støj søges forklaret ved, at der ved konstant temperatur opstår variation i materialets ledningsevne som følge af, at der i middel, men ikke i hvert øjeblik, er fuldstændig ligevægt imellem generation og rekombination af elektron-hulpar.

I modstande er det strømstøjen, der på afgørende måde gør sig gældende (ud over den termiske støj). Da strømstøjen er proportional med strømmen gennem modstanden, kan dens størrelse angives dimensionsløst som f.eks.  $\mu\text{V}/\text{V}$ . Ifølge IEC (International Electrotechnical Commission) måles strømstøjen i frekvensbåndet 600 - 1600 Hz. Figur 3 viser karakteristiske støjkurver for nogle modstandstyper.



Figur 3.

Strømstøjfaktoren  $F$  for forskellige modstandstyper som funktion af modstandsværdien.

Strømstøj og termisk støj adderes som to effektive spændinger med forskellig frekvens, d.v.s. som kvadratroden af summen af kvadraterne af de to spændinger.

### Strømfotrængning (skineffekt).

Ved høje frekvenser vil strømmen i en leder på grund af det dannede magnetfelt blive trængt ud til lederens overflade, således at den effektive modstand forøges. Strømmens indtrængningsdybde  $\delta$ , d.v.s. den ækvivalente tykkelse af det yderste lag af lederen, hvori strømmen tænkes jævnt fordelt, kan beregnes af

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}$$

hvor  $\rho$  er lederens specifikke modstand (resistiviteten),  $f$  er frekvensen,  $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$  H/m og  $\mu_r$  er materialets relative permeabilitet. For kobber er

$$\delta_{Cu} = \frac{0,067 \text{ [m]}}{\sqrt{f \text{ [Hz]}}}$$

Af denne grund fremstilles modstandslegemet i mange modstandstyper som en tynd film, hvis tykkelse er mindre end indtrængningsdybden ved de højeste frekvenser, ved hvilke modstanden skal bruges.

#### Termokraft.

Ved overgangen fra det materiale en modstand er lavet af og til et andet materiale, f.eks. kobberledninger, kan der på grund af Seebeck-effekt opstå små spændinger, som undertiden kan være af betydning. F.eks. kan de to kontaktsteder ved en shunt for et instrument antage forskellige temperaturer og dermed give anledning til fejlvisning.

#### Størrelse og effekt.

Enhver modstand karakteriseres af modstandens størrelse (resistans) og af en effekt  $P$ . Effekten - eller belastningen - er en mærkestørrelse, som angiver den højest tilladelige kontinuerlige belastning af modstanden ved en foreskreven omgivelsestemperatur (f.eks.  $70^{\circ}\text{C}$ ).

Det er karakteristisk, at modstande af samme konstruktion og dimensioneret til samme effekt har samme fysiske størrelse (og pris, dog afhængig af tolerance) uanset modstandsværdiens størrelse.

#### Stabilitet.

En modstands stabilitet,  $\frac{\Delta R}{R} \cdot 100 \%$ , angiver, hvor meget modstandens værdi på irreversibel måde ændrer sig i løbet af en vis tid. Fabrikanten garanterer ofte, at stabiliteten er bedre end en vis værdi efter 1000 timers belastning af modstanden med mærkeeffekt ved en given omgivelsestemperatur (f.eks.  $70^{\circ}\text{C}$ ). Det viser sig, at stabiliteten bliver væsentlig bedre, hvis modstanden belastes mindre end mærkeeffekten. Dette hænger sammen med Arrhenius's lov, der siger at den kemiske reaktionshastighed er:

$$K = a \cdot e^{\frac{E}{RT}}$$

hvor E er en for materialet karakteristisk aktiveringsenergi, R er gaskonstanten og T den absolutte temperatur. Jo større effekt jo større bliver temperaturen - hot spot temperaturen - i de materialer, der er ansvarlige for dannelsen af strømbanen. Når temperaturen vokser foregår uønskede kemiske og metallurgiske omdannelser tilsvarende hurtigere (hyppigt fordobles reaktionshastigheden hver gang temperaturen stiger med  $10^{\circ}\text{C}$ ), hvorved den hastighed, hvormed modstandsværdien ændres, vokser.

I det følgende gives en kort gennemgang af de forskellige svagstrømsmodstandes hovedegenskaber - anvendelsesmæssige fordele og ulemper.

Svagstrømsmodstande kan opdeles i to hovedgrupper - lineære og ulineære modstande, og de lineære modstande kan igen deles i ikke-trådviklede og trådviklede modstande.

## LINEÆRE MODSTANDE.

Tabel 1 og 2 giver en oversigt over nogle af de lineære modstandes egenskaber.

	IEC typ	Konstruktion	Resistansområde	Effektområde (W)	Toleransområde (%)	Temperaturområde ( $^{\circ}\text{C}$ )	Max tillåten spænding (V)	Stabilitet ( $\Delta R$ %)
Massamotstånd ....	2	"ikke homogen" kol	2 ohm—25 Mohm	0,1—5	$\pm 5, 10, 20$	$-40/+107$	150—750	$< \pm 25$
	2	"homogen" kol	2 ohm—22 Mohm	0,1—2	$\pm 5, 10, 20$	$-55/+150$	150—750	$< \pm 10$
	2	grafitskikt	10 ohm—22 Mohm	0,25—2	$\pm 5, 10, 20$	$-55/+125$	250—500	$< \pm 10$
Metallfilmmodstånd	1	Ni-Cr eller ädelmetallfilm	1 ohm—2 Mohm	0,1—2	$\pm 0,1-5$	$-65/+175$	150—1 000	$< \pm 1$
Metalloxidfilm-motstånd .....	1	tennoxidskikt	10 ohm—0,5 Mohm	0,25—2	$\pm 0,5-10$	$-65/+150$	250—750	$< \pm 2$
	2	"	1 ohm—5 Mohm	0,5—20	$\pm 5-20$	$-55/+250$	250—2 000	$< \pm 10$
Metallglasymot-motstånd .....	1	ädelmetall/glasyskikt	10 ohm—5 Mohm	0,1—1	$\pm 2-20$	$-65/+150$	150—500	$< \pm 2$

Tabel 1: Faste ikke trådviklede modstande - generel oversigt.



Benämning	IEC typ	Konstruktion	Resistansområde	Effektområde (W)	Toleransområde (%)	Temperaturområde (°C)	Max tillåten spänning (V)	Tempkoeff (10 <sup>-4</sup> /°C)	Stabilitet (ΔR %)
Precisionsmotstånd ...	1	sektioner lager	10 ohm—6 Mohm	0,1—1,5	± 0,01—1	— 55/+ 145	150—1 000	± 2—± 10	< ± 0,1
	1		0,1 ohm—1 Mohm	0,1—1	± 0,01—5	— 55/+ 145	150—1 000	± 3—± 20	< ± 0,5
Effektmotstånd	2	plast cement emalj	1 ohm—250 kohm	0,5—50	± 0,02—1	— 65/+ 275	100—1 000	± 20	< ± 1
	2		0,1 ohm—100 kohm	1—100	± 1—20	— 40/+ 250	250—1 000	± 50	< ± 1
	2		0,1 ohm—250 kohm	2—500	± 1—20	— 55/+ 350	500—3 000	— 50/+ 100	< ± 2
Inställbara motstånd ...	2	emalj	0,5 ohm—100 kohm	10—300	± 5—20	— 55/+ 275	350—2 000	— 50/+ 100	< ± 2

Tabel 2: Faste trådviklede modstande - generel oversigt.

Normer.

IEC = International Electrotechnical Commission har angivet normer vedrørende modstande. Heraf kan nævnes spring i modstandsværdier samt mærkning.

Modstandsstørrelserne er givet ved afrundede værdier af geometriske rækker med kvotient

$$\sqrt[2]{10} = 1,10 \quad \text{E24 rækken}$$

$$\sqrt[12]{10} = 1,21 \quad \text{E12 rækken}$$

$$\sqrt[6]{10} = 1,468 \quad \text{E 6 rækken}$$

Disse tre rækker er de almindeligste, men også E 48, E 96 og E 192 rækkerne vist i tabel 3, kan anvendes.

IEC har også standardiseret en ny kort måde at angive modstandsværdierne, tabel 4.

Ved flere typer modstande anvendes dog normalt en farvekode, som vist i tabel 5 og 6.

# IEC Standard Values

E 6	E 12	E 24
1.0	1.0	1.0
		1.1
	1.2	1.2
		1.3
1.5	1.5	1.5
		1.6
	1.8	1.8
		2.0
2.2	2.2	2.2
		2.4
	2.7	2.7
		3.0
3.3	3.3	3.3
		3.6
	3.9	3.9
		4.3
4.7	4.7	4.7
		5.1
	5.6	5.6
		6.2
6.8	6.8	6.8
		7.5
	8.2	8.2
		9.1

E 48	E 96	E 192	E 48	E 96	E 192	E 48	E 96	E 192	E 48	E 96	E 192	E 48	E 96	E 192
100	100	100	162	162	162	261	261	261	422	422	422	681	681	681
		101			164			264			427			690
	102	102		165	165		267	267		432	432		698	698
		104			167			271			437			706
105	105	105	169	169	169	274	274	274	442	442	442	715	715	715
		106			172			277			448			723
	107	107		174	174		280	280		453	453		732	732
		109			176			284			459			741
110	110	110	178	178	178	287	287	287	464	464	464	750	750	750
		111			180			291			470			759
	113	113		182	182		294	294		475	475		768	768
		114			184			298			481			777
115	115	115	187	187	187	301	301	301	487	487	487	787	787	787
		117			189			305			493			796
	118	118		191	191		309	309		499	499		806	806
		120			193			312			505			816
121	121	121	196	196	196	316	316	316	511	511	511	825	825	825
		123			198			320			517			835
	124	124		200	200		324	324		523	523		845	845
		126			203			328			530			856
127	127	127	205	205	205	332	332	332	536	536	536	866	866	866
		129			208			336			542			876
	130	130		210	210		340	340		549	549		887	887
		132			213			344			556			898
133	133	133	215	215	215	348	348	348	562	562	562	909	909	909
		135			218			352			569			920
	137	137		221	221		357	357		576	576		931	931
		138			223			361			583			942
140	140	140	226	226	226	365	365	365	590	590	590	953	953	953
		142			229			370			597			965
	143	143		232	232		374	374		604	604		976	976
		145			234			379			612			988
147	147	147	237	237	237	383	383	383	619	619	619			
		149			240			388			626			
	150	150		243	243		392	392		634	634			
		152			246			397			642			
154	154	154	249	249	249	402	402	402	649	649	649			
		156			252			407			657			
	158	158		255	255		412	412		665	665			
		160			258			417			673			

Tabel 3.

# Designation of resistance values according to IEC 62

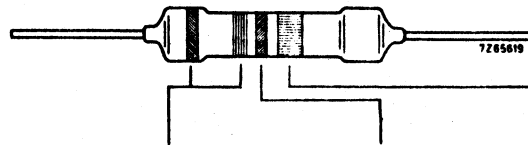
Formerly	IEC
0,1 Ohm	R 10
1 Ohm	1 R0
10 Ohm	10 R
100 Ohm	100 R
1 000 Ohm	1 K0
10 K Ohm	10 K
0,1 M Ohm	100 K
1,0 M Ohm	1 M0
10,0 M Ohm	10 M

Tabel 4.

## CARBON FILM RESISTORS

### Marking

The nominal resistance value and the tolerance are marked on the resistors by means of four coloured bands according to I.E.C. publication 62: "Colour code for fixed resistors"



colour	significant figures	multiplier	tolerance
black	0	1 x	± 2%
brown	1	10 x	
red	2	100 x	
orange	3	1 000 x	
yellow	4	10 000 x	
green	5	100 000 x	
blue	6	1 000 000 x	
violet	7	-	± 10%
grey	8	-	
white	9	-	
silver		-	
gold		0.1 x	± 5%

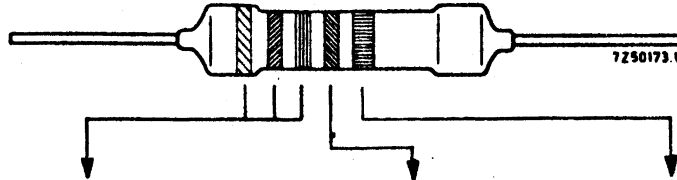
Tabel 5.

# METAL FILM RESISTORS

## Marking

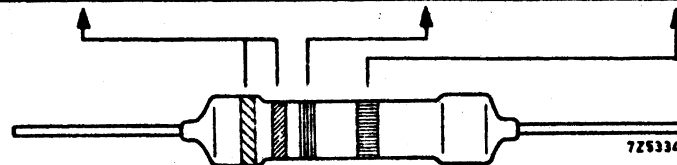
The nominal resistance value and the tolerance are marked on these resistors by means of four or five coloured bands according to I. E. C. publication 62 "Colour code for fixed resistors" (see also I. E. C. publication 115 clause 1.5).

for E96 series



colour	significant figures	multiplier	tolerance
black	0	1 x	± 1% ± 2%
brown	1	10 x	
red	2	100 x	± 2%
orange	3	1 000 x	
yellow	4	10 000 x	
green	5	100 000 x	
blue	6	-	
violet	7	-	
grey	8	-	
white	9	-	
silver		0.01 x	
gold		0.1 x	

for E24 series



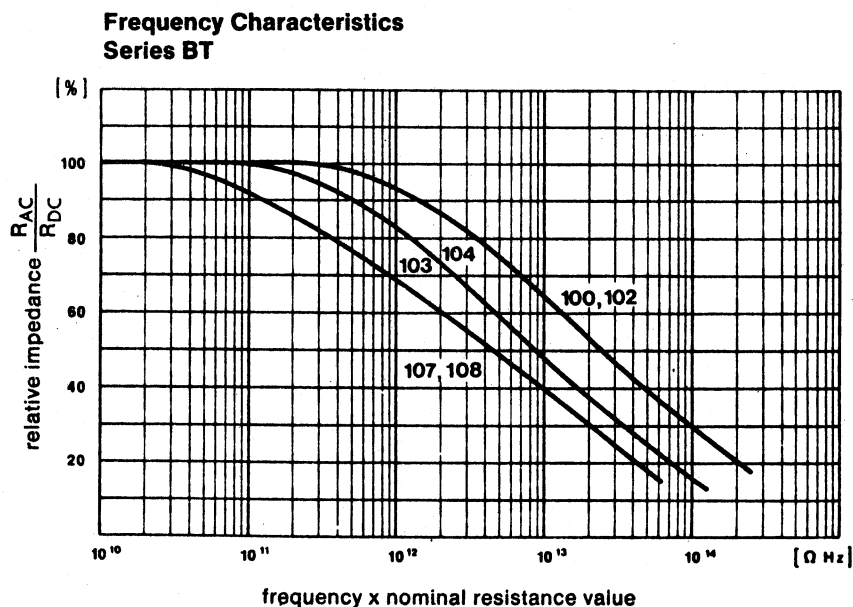
Tabel 6.

## IKKE-TRÅDVIKLEDE MODSTANDE.

### KULMASSEMODSTANDE.

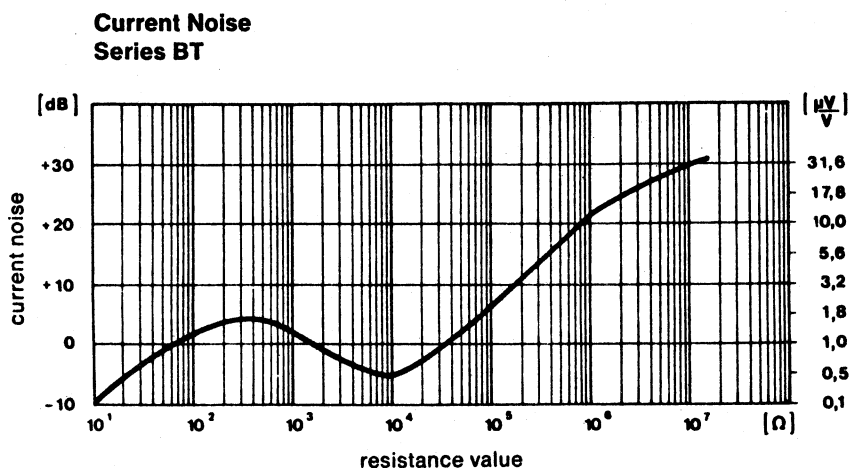
Kulmassemodstanden er den billigste svagstrømsmodstandstype. Derfor anvendes den meget, selv om det også er den type, der i de fleste tilfælde har de dårligste egenskaber. På et par anvendelsesområder har den dog bedre egenskaber end de øvrige ikke-trådviklede modstandstyper.

Hvis der i det færdige apparat stilles krav om stor pålidelighed, forstået på den måde, at modstanden hverken må fejle ved at blive afbrudt eller ved at kortslutte (disse fejltyper tilhører en klasse, der undertiden benævnes "bratfejl"), er kulmassemodstandstypen et godt valg. Højfrekvensegenskaberne vil også - bortset fra modstandene med de største modstandsværdier - være gode. Se fig. 4. Typenumrene refererer til modstande med forskellige tilladte effekter.



Figur 4.

Modstandstypen har meget høj egenstøj. Dette er en følge af, at modstandsmaterialet, der består af sammenkittede kulkorn, har en stærkt tidsafhængig ledningsevne, som følge af at berøringen mellem de forskellige kulkorn ikke er tidsuafhængig, men fluktuerer p.g.a. termiske bevægelser. Se fig. 5.

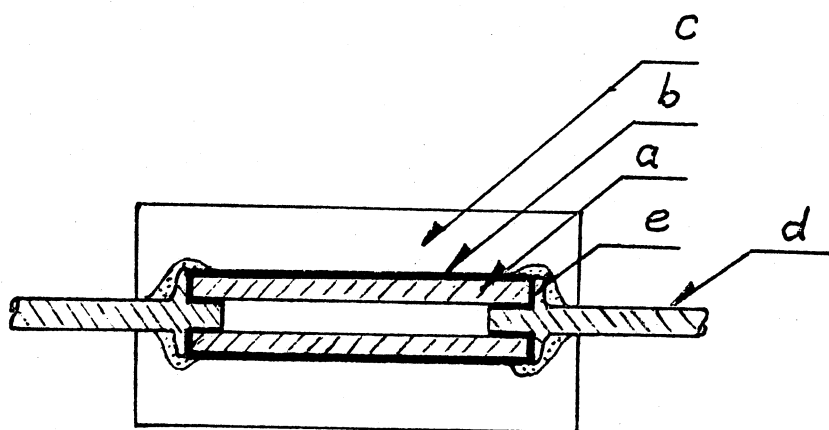


Figur 5.

Langtidsstabiliteten for kulmassemodstandene er ringe. Dette forklares ved at bindemidlet, der binder kulkornene sammen, æl-des og dermed ændrer egenskaber. Overbelastning af modstanden - med deraf følgende overophedning - vil fremskynde denne ældnings-proces, og bør derfor undgås.

Skal modstanden arbejde i fugtige omgivelser, vil fugten altid - før eller senere - trænge ind til selve modstandslegemet. Binde-midlet vil herved kvælde op, og den elektriske forbindelse mel-lem de enkelte kulkorn vil blive ringere. Dette medfører, at mod-standsværdien vokser. Processen er dog reversibel: Hvis modstan-den igen bliver tør, antager den sin gamle værdi.

Den mekaniske konstruktion af kulmassemodstandene afhænger af fa-brikatet. Et eksempel på en konstruktion er vist i figur 6.



Figur 6.

Eksempel på opbygning af kulmassemodstand. a) glaserør, b) modstandsmateriale af sammenkittede kulkorn, c) bakte-lit indstøbningsmasse, d) opstukkede terminaler og e) ledende lim der fastholder terminalerne til glaserøret samt sørger for den ledende forbindelse mellem terminalerne og modstandslegemet.

I en anden udførelse føres begge terminaler ud til en side, så modstanden er let at anbringe i printplader.

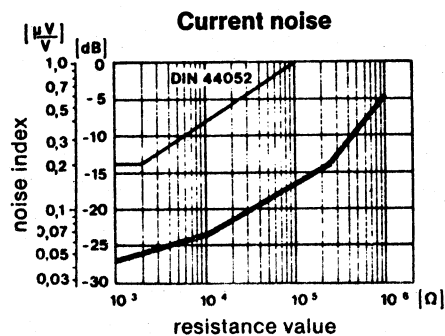
Til kredsløb, hvori indgår modstande med stor ohmværdi, der udsættes for meget høje spændinger (op til 10 kV), fremstilles modstande, hvor kullaget er lagt i spiralform på et keramisk rør.

I nogle udførelser består selve modstandslegemet af en kulstang i stedet for et kullag.

## KULFILMMODSTANDE.

Kulfilmmodstande består af en cylindrisk keramikkærne, hvorpå der ved pyrolyse\* af kulbrinter lægges et lag af rent krystallinsk kulstof. Modstandens størrelse bestemmes dels af kulletets tykkelse, dels derved at en del af kulletet ved hjælp af laserstråler fjernes, så laget bliver spiralformet. Processen kan udføres automatisk med samtidig modstandsmåling. Metalhætter presses på modstandselementet, og terminalerne svejses til hætterne.

Strømsøjlen i denne type modstande er meget mindre end i kulmassemodstandene. Se fig. 7.



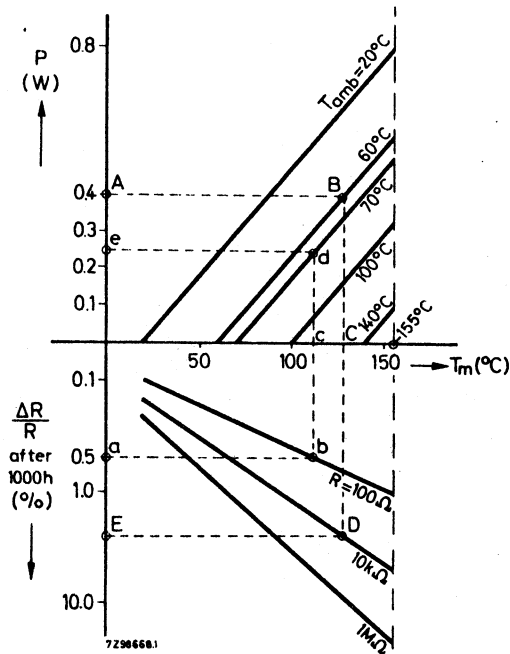
Figur 7.

Enhver modstand vil, når den belastes, udvikle varme, og dens temperatur vil derved stige til en værdi, der er bestemt af den afsatte effekt, den omgivende temperatur og modstandens varmemodstand, der igen er bestemt af modstandens mulighed for at afgive varme. Her er dimensionerne naturligvis af afgørende betydning. Den højeste temperatur optræder normalt midt i modstanden, det såkaldte hot-spot. Høje temperaturer vil i almindelighed bevirke, at modstandsværdien vil ændre sig mere med tiden end ved lavere temperatur.

Dette forhold kan specificeres ved hjælp af kurver. Se fig. 8.

\* Pyrolyse: Sønderdeling af kemiske forbindelser ved indvirken af varme.





Performance nomogram (for a fictitious resistor) illustrating the new way of specifying the performance of film resistors.

Figur 8.

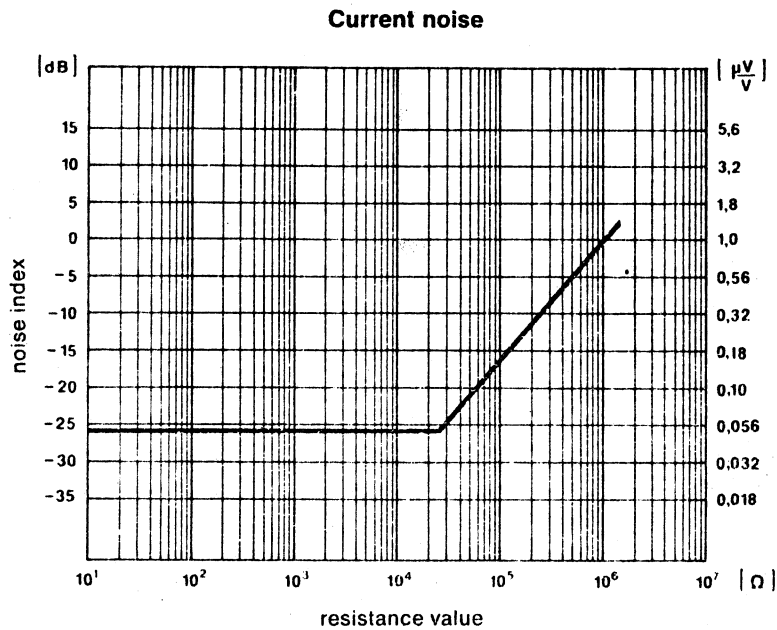
Princippet forklares lettest ved et eksempel:

En modstand på  $10\text{ k}\Omega$  udsættes for en effekt på  $0,4\text{ W}$  (A). Den omgivende temperatur er  $60^{\circ}\text{C}$  (B). På x-aksen aflæses nu hot-spot-temperaturen  $T_m$  til ca.  $125^{\circ}\text{C}$  (C) og via "D" til "E" aflæses, at modstandsændringen  $\frac{\Delta R}{R}$  efter 1000 timer i 95% af modstandene højest vil andrage ca. 2 %. Man kan naturligvis også gå modsat vej som antydnet ved a-b-c-d-e og finde ud af maximal effekt, hvis man tillader en vis modstandsændring ved givne  $R$  og  $T_{amb}$ .

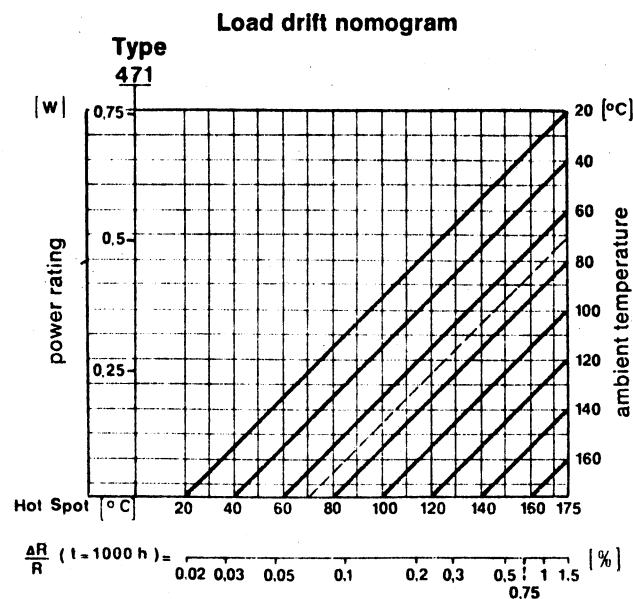
## METALFILMODSTANDE.

Denne modstandstype er opbygget af en metaltyndfilm pådampet en glas- eller keramikstav i vacuum. Ledermaterialet er enten ædelmetal eller en nikkelkrom legering.

Egenstøjen for metalfilmmodstandene er lille og langtidsstabiliteten god. Se fig. 9 og 10.



Figur 9.



Figur 10.

Mange metalfilmmodstande har endvidere lille temperaturkoefficient. Metalfilmene kan, af teknologiske årsager, ikke fremstilles i så store modstandsværdier som kulmassemodstandene.

Irreversible ændringer i modstandsværdierne skyldes hovedsagelig omkrystalliseringer i modstandsmaterialet, ændringer i de mekaniske spændinger og oxidering af ledermaterialet. Hvis fugt kan trænge ind til metalfilmen, vil denne være udsat for korrosion, hvorfor det er meget vigtigt, at metalfilmmodstande, der skal anvendes i fugtige omgivelser, er ekstra godt beskyttet mod fugtindtrængning.

Anvendelsesområde: Overalt i elektronisk udstyr, hvor der kræves en god langtidsstabilitet og ringe egenstøj af modstandene, f.eks. i indgangsspændingsdelerne i elektronisk måleudstyr.

### METALOXIDMODSTANDE.

I denne modstandstype består modstandsmaterialet af en tyndfilm af tinoxid - undertiden dopet med antimonoxid for at forbedre temperaturegenskaberne og pålideligheden. Temperaturkoefficienten afhænger af modstandsmaterialets tykkelse. Ved en bestemt tykkelse af modstandslegemet er temperaturkoefficienten nul, en egenskab der udnyttes ved konstruktionen. Iøvrigt ligger metaloxidmodstandens egenskaber mellem kulmassemodstandenes- og metalfilmmodstandenes egenskaber.

## METAL-GLAZE MODSTANDE (METALGLASUR).

Dette er en ret ny modstandstype. Modstandsfilmen fremstilles ud fra en pasta bestående af metaloxid, et ædelmetal og glasur - alle ingredienser i pulverform. Det hele er opslemmet i en passende væske (metaloxidet og metallet er ofte sølvoxid og palladium eller vismutoxid og ruthenium). Pastaen påsmøres en aluminiumoxid stav eller skive (ved en silketryks lignende teknik) og brændes ved 700 - 1000 °C. Metaltykfilmens tykkelse er ens for samtlige modstandsværdier (ca. 15 µm). De forskellige modstandsværdier fremstilles ved at vælge forskellige sammensætninger af pastamaterialerne og ved at ændre på tykfilmens geometri (længde, bredde og spiralisering). Finjusteringen foretages ved bortslibning af modstandsmateriale ved sandblæsning. Langtidsstabiliteten af metal-glaze modstandene er næsten på højde med metal-filmmodstandenes.

Anvendelsesområde: Metal-glazemodstande vil p.g.a. de bedre egenskaber overalt kunne erstatte kulmassemodstande, blot koster de 3 til 4 gange det en kulmodstand koster. Da de samtidig er væsentlig billigere end tilsvarende metalfilmsmodstande, benyttes metal-glaze modstandene ofte til at udfylde "tomrummet" mellem de to andre modstandstyper.

## TRÅDVIKLEDE MODSTANDE.

De trådviklede præcisionsmodstande anvendes i kredsløb, hvor der stilles store krav til lille egenstøj, små temperaturkoefficienter, stor linearitet og stor langtidsstabilitet. Disse parametre vil for omhyggeligt fremstillede trådviklede modstande ofte nærme sig til de teoretiske nedre grænser.

De trådviklede effektmodstande anvendes, hvor den krævede mærkeeffekt er større end den, der kan opnås med kulmassemodstandene.

De trådviklede modstande er i praksis uanvendelige ved frekven-

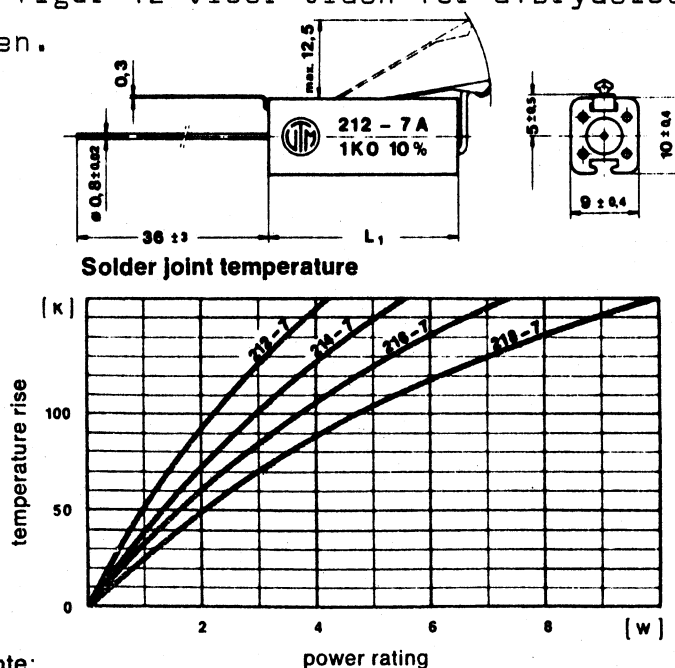
ser over 10 - 100 kHz p.g.a. de relativt store serie-selvinduktionskoefficienter og shunt-kapaciteter.

De trådviklede præcisionsmodstande vikles, af omhyggeligt ældet manganintråd, omkring et porcelænsrør eller en "spoleform". Skal modstanden overholde stabilitetsspecifikationen er det vigtigt, at den aldrig overbelastes termisk.

De trådviklede effektmodstande har relativt store mekaniske dimensioner. Indstøbningsmassen er gerne en blanding af cement og kvartssand eller emalje, idet disse materialer kan tåle de relativt høje temperaturer, der opstår, når modstandene arbejder ved deres mærkeeffekt.

En speciel type effektmodstand er forsynet med en "afbryder", der afbryder kredsløbet, modstanden indgår i, når den i modstanden afsatte effekt overstiger en vis værdi. "Afbryderen" består af et loddepunkt mellem et fast punkt og en fjedrende tråd. Når temperaturen stiger til loddetinnetssmeltepunkt, springer den fjedrende tråd fra. Man kan på denne måde i mange tilfælde opnå en betydelig bedre afsikring af et kredsløb end med en smeltesikring, idet modstandens relativt store varmekapacitet bevirker, at eventuelle kortvarige startstrømstød ikke afbryder kredsløbet.

Figur 11 viser opbygning og loddepunktets temperatur ved normal drift, og figur 12 viser tiden for afbrydelse som funktion af belastningen.



Figur 11.

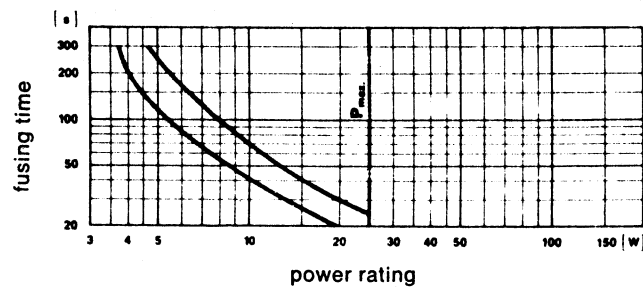
Note:

Temperature at solder joint should never exceed 150° C under normal working conditions. Solder joint temperature is defined as sum of ambient tempera-

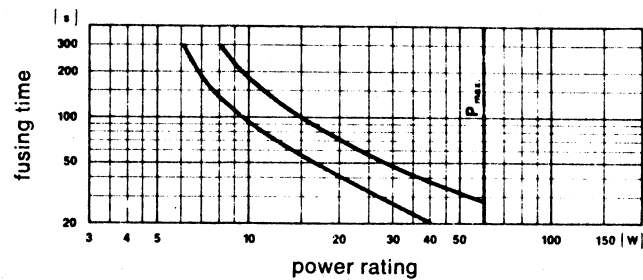
ture and temperature rise caused by applied load. After fusing, the fusible solder joint can be repaired with regular solder 60/40 Sn/Pb.

## Fusing times vs. load

Type 212-7



Type 214-7



Figur 12.

VARIABLE MODSTANDE (POTENTIOMETRE).

De variable modstande er i princippet almindelige modstande med forskydeligt udtag. De fremstilles som kulmasse-, metal- glaze-, metalfilm- og trådviklede modstande. En generel oversigt over varierende modstande er vist i tabel 7.

Benämning	IEC typ	Konstruktion	Resistansområde	Effekt- område (W)	Tolerans- område (%)	Temperatur- område (°C)	Stabilitet ( $\frac{\Delta R}{R}$ %)	Mekanisk livslængde 10 <sup>6</sup> cykler	Linjærhet (%)
Massamotstånd, sprutade ..	2	grafitskikt	10 ohm—5 Mohm	0,1—2	± 20	— 40/+ 85	± 30	0,025	—
Massamotstånd, gjutne ..	2	massiv kol	100 ohm—5 Mohm	0,25—2	± 10—20	— 55/+ 125	± 10	0,05	—
Plastmotstånd .....	1	ledende plast	100 ohm—0,1 Mohm	0,5—3	± 5—10	— 65/+ 125	± 2	10	± 0,5
Cermet-motstånd .....	1	metallglasyr	100 ohm—2 Mohm	1—10	± 1—5	— 65/+ 200	± 1	5	± 0,2
Metallfilmmotstånd .....	1	ädelmetallfilm	100 ohm—0,1 Mohm	0,5—2	± 0,5—5	— 65/+ 125	± 1	0,1	± 0,1
Trådl. motstånd, små ....	2	plaststomme	1 ohm—0,5 Mohm	0,5—5	± 2—10	— 65/+ 125	± 2	0,1	ca ± 2
Trådl. motstånd, trimtyp ..	2	skruvmatning	10 ohm—0,1 Mohm	0,2—3	± 5—10	— 65/+ 125	± 2	0,0005	ca ± 1
Trådl. motstånd, større ..	2	keramikstomme	0,1 ohm—0,5 Mohm	1—300	± 5—10	— 55/+ 330	± 1	0,1—0,5	ca ± 1
Precisionsmotstånd, trådl.	1	ett — flere varv	10 ohm—5 Mohm	1—10	± 1—5	— 65/+ 125	± 0,5	1—10	± 0,2

Tabel 7.

Variable modstande - generel oversigt.

Opløsningsevnen  $\frac{\Delta R}{R}$  - d.v.s. den mindste modstandsændring, der kan foretages - er en vigtig parameter for de variable modstande. Generelt kan det siges, at de ikke trådviklede modstande har bedre opløsningsevne end de trådviklede.

Kontaktmodstanden mellem modstandsbanen og det bevægelige udtag er en uønsket størrelse, der ofte kan volde problemer, især ved potentiometre, der arbejder ved lave spændinger.

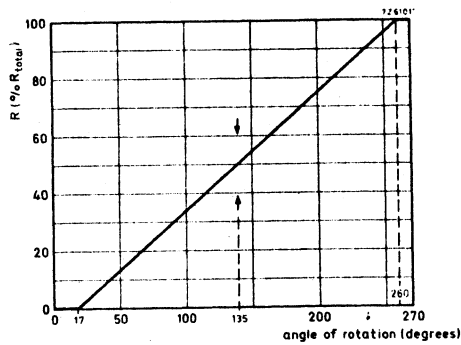
De variable modstande fremstilles normalt enten som lineære skydepotentiometre eller som cirkulære drejepotentiometre.

Nogle potentiometre har levetider på nogle få hundrede mekaniske bevægelser.

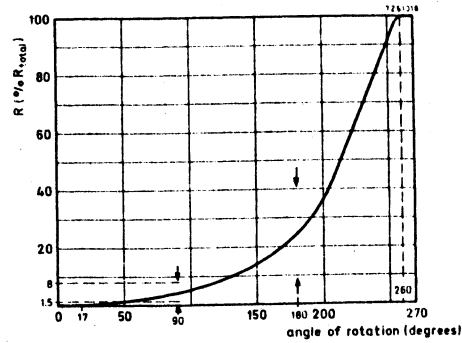
Modstandens variation som funktion af forskydningen eller drejningen kan antage forskellige former. Fig. 12 viser nogle eksempler.

Potentiometre laves undertiden som drejeomskifttere med mange stillinger. Modstandene kan beregnes, så man får en vilkårlig kurveform, f.eks. log., så man får et vist antal dB pr. trin.

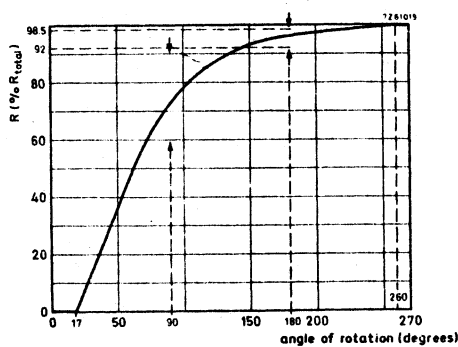
## CARBON POTENTIOMETERS



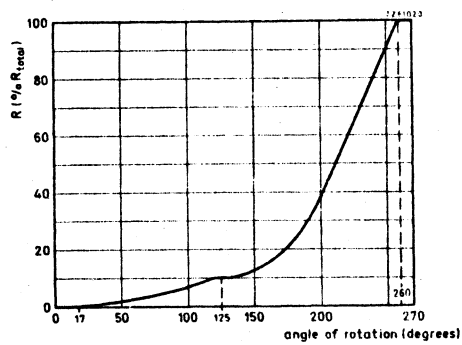
Linear resistance law,  
single potentiometers.



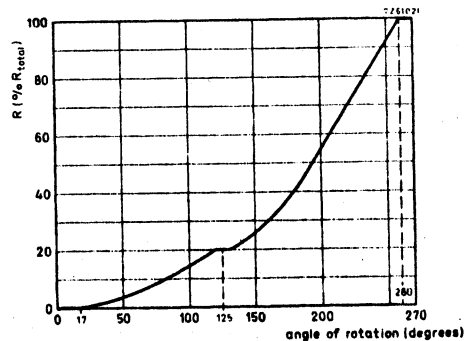
Logarithmic resistance law,  
single potentiometers.



Reversed logarithmic  
resistance law, single  
potentiometers.



Resistance law, tap at 10%,  
single potentiometers.



Resistance law, tap at 20%,  
single potentiometers.

Figur 12.

Nogle trimmepotentiometre består af et skydepotentiometer, hvor skyderen aktiveres ved hjælp af en gevindspindel, således at der bliver mulighed for adskillige omdrejninger ved indstillingen.



## PÅLIDELIGHED AF SVAGSTRØMSMODSTANDE.

Nogen generel pålidelighedsanalyse af svagstrømsmodstande vil vi ikke foretage her. Vi vil nøjes med at fremdrage nogle faktorer, der kan være årsag til funktionssvigt hos modstande.

En kvantitativ pålidelighedsbehandling af modstande er særdeles vanskelig bl.a. fordi det er umuligt at definere en generel grænse for, hvornår en modstand fejler. Ved nogle anvendelser vil en modstand fungere tilfredsstillende, blot dens modstandsværdi ligger inden for  $\frac{1}{10}$  af - og 10 gange dens nominelle værdi. Ved andre anvendelser vil en afvigelse fra nominel værdi på 0,5% medføre fejlfunktion.

Fejlhyppigheden hos variable modstande er generelt set væsentlig større end hos faste modstande. Dette skyldes kontaktsvigt ved den bevægelige kontakt, samt at det er vanskeligere at beskytte de variable modstande mod fugt og oxiderende atmosfærer, end det er for de faste modstande.

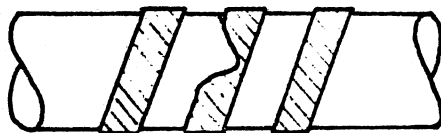
En reduktion af omgivelsestemperaturen fra 70°C til 25°C vil hyppigt reducere fejlhyppigheden 5 til 10 gange. På samme måde vil en reduktion af den i en modstand afsatte effekt reducere fejlhyppigheden væsentlig. Fugt vil, som tidligere sagt, for kulmassemødstandene resultere i en modstandsforøgelse (en såkaldt gradfejl), for metalfilmmødstandene vil fugtindtrængning ofte medføre, at modstandslegemet bliver afbrudt som følge af korrosion (bratfejl).

Inden for samme modstandstype er der store forskelle i pålideligheder fra fabrikat til fabrikat (denne forskel modsvarer normalt ikke af en tilsvarende prisforskel). Hvad værre er: en "pålidelig" fabrikant kan pludselig blive "upålidelig", som følge af en ændring i produktionsprocessen eller en uheldig produktionsserie (som det er for kostbart for modstandsfabrikanten at kassere).

Inden for en bestemt modstandstype viser det sig ofte, at de helt store - og helt små modstandsværdier har større fejlhyppigheder end de mellemliggende modstandsværdier. Dette er en følge af, at grænserne for de fremstillede modstandsværdier inden for en mod-

standstype er fastlagte ud fra, hvad det er teknologisk muligt at fremstille. De helt store og helt små modstande er det kun lige netop muligt at fremstille.

Figur 13 viser for en metalfilmmodstand en fejl i modstandsbanen, der meget let vil kunne medføre, at modstanden pludselig bliver afbrudt. Høje modstandsværdier for metalfilmmodstande fremstilles ved at pådampe et meget tyndt metallag på keramikstaven. Derefter spiraleres det pådampede metal i en meget lang og tynd spiral. Sandsynligheden for, at der optræder svage punkter af den her viste type, er væsentlig større for den meget lange og tynde spiral end for den noget kortere og tykkere spiral. Derfor: store modstandsværdier medfører større fejlhyppigheder.



svagt område i modstands-  
belægningen på metalfilmmodstand.

Figur 13.

## ULINEÆRE MODSTANDE.

### NTC-MODSTANDE.

NTC-modstande = Negative Temperature Coefficient, kaldes på tysk Heissleiter, da de leder bedre i varm end kold tilstand. Et tredje navn er Thermistor. NTC-modstande fremstilles ved sintering af metaloxider med tilsætning af mindre mængder af forskellige stoffer, så materialet optræder som halvledere med egenskaber, der i princippet ligner doteret silicium. Modstandens variation som funktion af temperaturen kan indenfor et stort temperaturområde beskrives med

$$R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}}, \text{ eller omformet } R_T = R_N \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N}\right)}$$

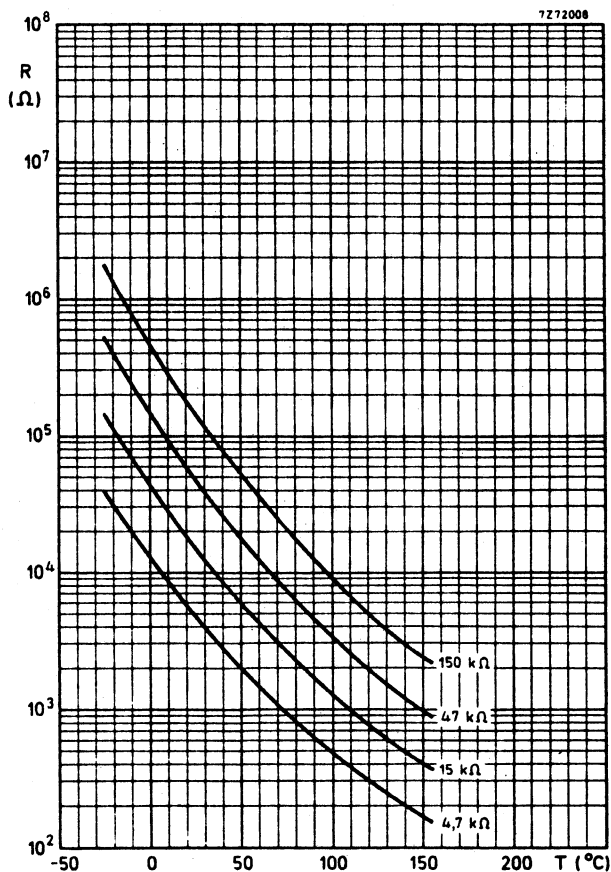
hvor A og B er konstanter og T måles i K.

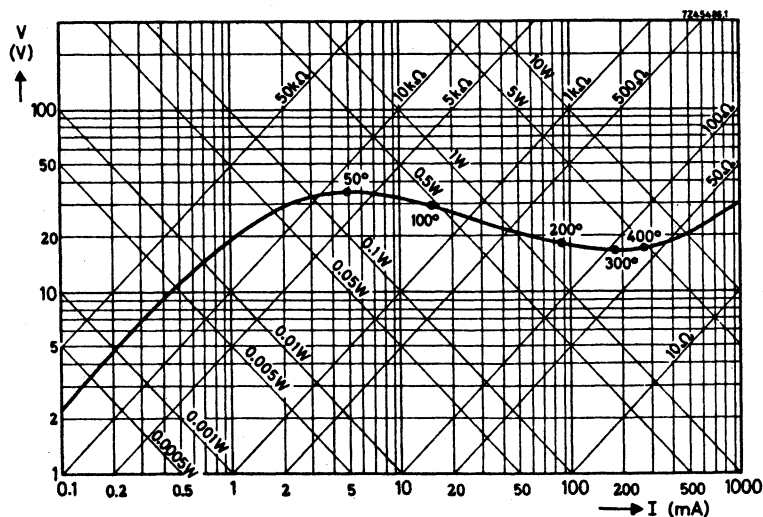
Temperaturkoefficienten for en NTC-modstand findes af ovenstående til

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$

NTC-modstandes egenskaber kan afbildes grafisk med  $R = f(T)$ , se figur 14 eller  $V = f(I)$ , idet temperaturen bestemmes af varmeudviklingen i modstanden, figur 15.

Figur 14.





Voltage versus current characteristics of an NTC thermistor.

Figur 15.

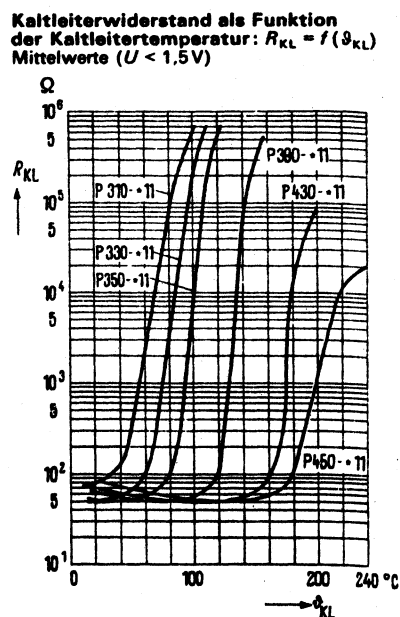
NTC-modstande fremstilles i stærkt varierende dimensioner fra cylindriske stænger med en længde af nogle cm til små perler med en vægt på få mg. Opvarmningen af modstandene kan ske ved den omgivende luft eller andet fluidum og/eller ved den effekt, der afsættes i dem, alt efter formålet.

Anvendelsesområderne er mange. I flæng nævnes: Temperaturmåling, temperaturstabilisering, spændings- eller strømstabilisering, forsinkelse af relæer, nedsættelse af startstrømstød. Til mange anvendelser spiller modstandens varmekapacitet en tidsmæssig rolle. Der findes typer med indirekte opvarmning ved hjælp af en varmetråd, der er elektrisk adskilt fra NTC-modstanden.

### PTC-MODSTANDE.

PTC-modstande = Positive Temperature Coefficient, kaldes på tysk Kaltleiter, da de leder bedre i kold end varm tilstand. PTC-modstande fremstilles ved sintring på omtrent samme måde som NTC-modstande. En væsentlig bestanddel er Titan-forbindelser. Materialet er polykrystallinsk og mellem de enkelte krystaller dannes der spærrelag, hvis varierende potentialbarrierer medvirker stærkt til modstandsændringen som funktion af temperaturen. Den positive

temperaturkoefficient kan antage meget store værdier, fra 10-40%/°C men det er kun indenfor et relativt smalt temperaturinterval, den store temperaturkoefficient optræder. Ved højere og lavere temperatur er den enten nul eller negativ. Til gengæld kan man ved konstruktionen forskyde dette interval. For at angive begyndelsen af området opgives for de enkelte typer normalt en temperatur, switch-temperaturen eller Bezugstemperaturen, der angiver den temperatur, hvor modstanden er steget til det dobbelte af minimumsmodstanden. Modstandene kan konstrueres med switch-temperatur fra -30°C til +240°C. Desuden angives modstandsværdien ved en bestemt temperatur. Modstandsvariationen kan normalt ikke beskrives med en simpel formel, hvorfor man må anvende grafisk fremstilling som vist på fig. 16.



Figur 16.

En almindelig udførelse er cylindriske skiver med  $d = 5-10$  mm.

Anvendelsesområderne er i mange tilfælde de samme som for NTC-modstande: Strømstabilisering, relæforsinkelse, beskyttelse mod overspænding og kortslutning, tidsforsinkelse, vædskeniveaubestemmelse, temperaturstabilisering i transistor kredsløb (forhindring af thermal run-away). Ved frekvenser over 1-5 MHz er PTC-modstanden uden virkning.

## VDR-MODSTANDE.

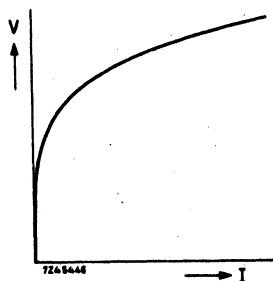
VDR-modstande = Voltage Dependent Resistor, på tysk Varistor.

VDR-modstande fremstilles også ved en sintringsproces, hvor hovedbestanddelen tidligere var siliciumkarbid, medens der nu også - og med betydelig bedre resultater anvendes zinkoxid eller titanoxid. Den elektiske karakteristik for en VDR-modstand er bestemt af et stort antal krystalkontakter, som danner et kompliceret netværk af serie- og parallelforbindelser af ensretterkontakter. Relationen mellem spænding og strøm for en VDR-modstand kan med tilnærmelse beskrives ved

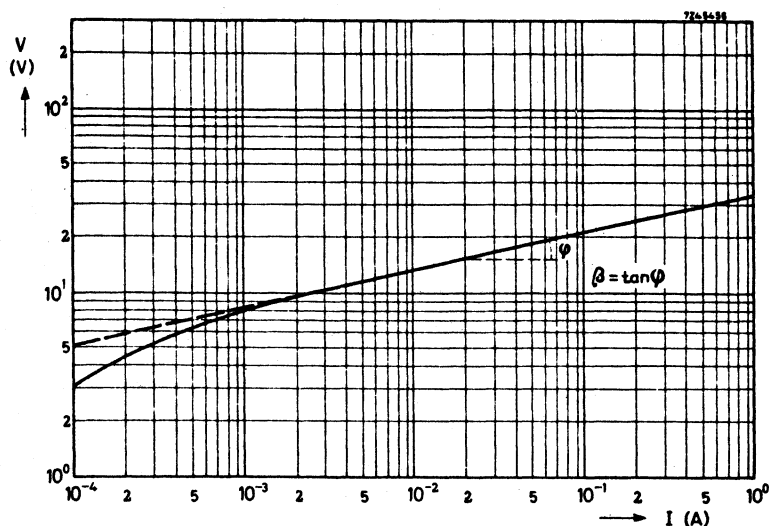
$$V = C \cdot I^{\beta}$$

hvor  $V$  er spændingen i volt,  $I$  strømmen i amp. og  $C$  og  $\beta$  er konstanter. Denne funktion er i fig. 17 og 18 afbildet i henholdsvis lineær målestok og dobbelt logaritmisk målestok.

Shape of the voltage/current characteristic of a VDR when plotted on a linear scale.



Figur 17.



Voltage/current characteristic of a VDR plotted on a logarithmic scale.

Figur 18.

C og  $\beta$ -værdierne afhænger af VDR-modstandens materiale, medens C yderligere afhænger af dimensionerne.  $\beta$  ligger i praksis mellem 0,02 og 0,40, medens C ligger mellem 14 og få tusinde.

VDR-modstandene fremstilles hyppigst som skiver eller stænger.

VDR-modstande anvendes til overspændingsundertrykkelse, f.eks. kontaktbeskyttelse og gnistslukning, spændings- og strømstabilisering i mange forskellige kredsløb. VDR-modstanden er ikke polariseret og kan derfor virke som ensretter, når den udsættes for usymmetriske pulser. Både NTC-, PTC- og VDR-modstande kan serie- eller parallelforbindendes med ohmske modstande, hvorved man kan ændre karakteristikkene.

### LDR-MODSTANDE:

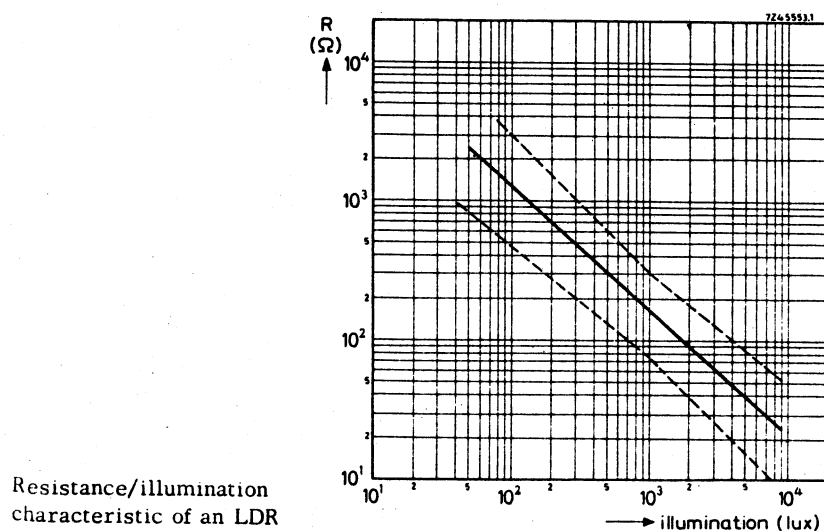
LDR-modstande = Light Dependent Resistors er lavet af kadmium-sulfid, som hvis det holdes i fuldstændig mørke, kun indeholder ganske få frie elektroner og derfor har en meget høj modstand.

Når det absorberer lys, frigøres elektroner, og materialets ledningsevne stiger. Elektronerne er kun frie en kort tid, således at modstanden ændrer sig proportionalt med belysningen, dog med en lille tidsforsinkelse, især ved faldende belysning.

Modstanden kan med god tilnærmelse udtrykkes ved

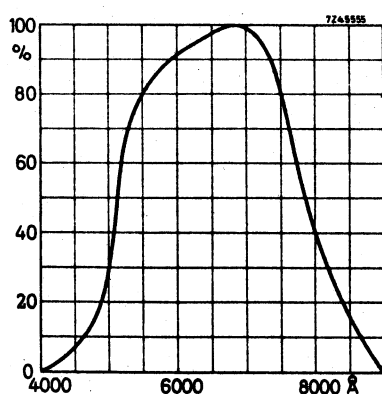
$$R = A \cdot L^{-\alpha},$$

hvor R er modstanden i  $\Omega$ , L er belysningsstyrken (illuminationen) målt i lux og A og  $\alpha$  er konstanter. Typisk værdi for  $\alpha$  er 0,7 - 0,9. Fig. 19 viser et eksempel på ovenstående relation. De stippled linier angiver tolerancer.



Figur 19.

LDR-modstandes virkning er kun effektiv for lys indenfor et begrænset frekvensinterval, se fig. 20, der viser, at den maximale virkning opnås ved en bølgelængde på omkring 6800 Ångstrøm = 680 nm svarende til en frekvens  $f = 4,4 \cdot 10^{14}$  Hz, hvilket er i den røde ende af spektret.



Spectral response characteristic of an LDR

Figur 20.

LDR-modstande laves normalt som skiver med diameter omkring 10 mm. Data angiver modstand i mørke og modstand ved en belysning på 1000 lux. Endvidere modstandsændringen pr. sek., når modstanden flyttes fra lys til mørke.