



# Fysikalisk förklaring

## Bakgrund: Elektroner i metaller

För att förstå Seebeckeffekten behöver vi först förstå hur elektroner beter sig i en metall.

**Metallgittret:** I en metall sitter atomkärnorna (med sina inre elektroner) ordnade i ett regelbundet mönster — ett kristallgitter. De yttersta elektronerna, *valenselektronerna*, är inte bundna till enskilda atomer utan delas av alla atomer i metallen.

**Elektronhav:** Dessa delade elektroner bildar ett "hav" av fria elektroner som kan röra sig genom hela metallen. Det är detta elektronhav som gör metaller elektriskt ledande — elektronerna kan förflytta sig när ett elektriskt fält appliceras.

**Energiband:** I kvantmekaniska termer säger man att elektronerna befinner sig i *energiband*. I metaller överlappar *valensbandet* (där valenselektronerna normalt finns) med *ledningsbandet* (där elektroner kan röra sig fritt). Denna överlappning är anledningen till att metaller leder ström — elektroner kan lätt "hoppa" mellan banden.

**Jämförelse med isolatorer:** I isolatorer (som glas eller plast) finns ett energigap mellan valens- och ledningsbandet. Elektronerna sitter "fast" i valensbandet och kan inte röra sig fritt, vilket gör materialet icke-ledande.

## Grundläggande mekanism

I en metall finns fria elektroner som rör sig slumpmässigt i alla riktningar. Hastigheten beror på temperaturen — vid den varma änden har elektronerna högre termisk energi och rör sig snabbare.

**Diffusion mot den kalla änden:** Elektroner vid den varma änden rör sig åt alla håll, men de som rör sig mot den kalla änden har mer energi än de som kommer från den kalla sidan. Resultatet blir ett netto-flöde av elektroner mot den kalla änden — precis som parfym sprider sig från en öppnad flaska mot områden med lägre koncentration.

**Elektriskt fält byggs upp:** När elektroner ansamlas vid den kalla änden uppstår ett elektronöverskott där (negativ laddning) och ett elektronunderskott vid den varma änden (positiv laddning). Detta skapar ett elektriskt fält som pekar från varm till kall. Fältet utövar en kraft på elektronerna som trycker dem tillbaka mot den varma sidan.

**Jämvikt i en enskild tråd:** Efter en kort stund (mikrosekunder) nås jämvikt: diffusionskraften som driver elektroner mot kylan är exakt lika stark som den elektriska kraften som trycker dem tillbaka. Nu flyter ingen ström — men det finns en mätbar spänningsskillnad mellan ändarna.

**Vad händer i en sluten krets?** Om man skapar en sluten slinga av två olika metaller med *två fogar vid olika temperaturer*, flyter faktiskt en kontinuerlig ström! Den varma fogen "pumpar" elektroner i en riktning, den kalla fogen pumpar svagare (eller åt andra hållet), och nettoresultatet blir en cirkulerande ström. Detta är principen bakom termoelektriska generatorer.

**Varför använder vi multimeter istället?** I vårt experiment ersätter multimetern den "andra fogen". Multimetern har mycket hög inre resistans (megaohm), så nästan

ingen ström flyter — den mäter bara spänningen. Detta är faktiskt en fördel: spänningen "förbrukas" inte av att driva en ström, så vi får en stabil avläsning. Om vi istället hade slutit kretsen med en metallfog skulle strömmen vara mycket liten (mikroampere) eftersom spänningen är låg och trådarnas resistans begränsar flödet.

### Varför behövs två metaller?

Om man gör en sluten krets av *samma* metall uppstår identiska spänningar i båda halvorna av kretsen — de tar exakt ut varandra och nettospänningen blir noll.

**Vad skiljer metaller åt på atomnivå?** Olika metaller har olika elektronstruktur: olika antal fria elektroner per atom, olika starkt bundna till kristallgittret, och olika lätt för elektronerna att röra sig. Detta ger varje metall en unik *Seebeckkoefficient* — ett mått på hur starkt elektronerna reagerar på en temperaturskillnad.

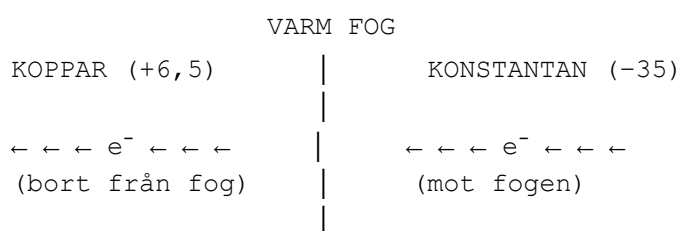
**Termisk rörelse vs elektrisk ström:** Elektroner i en metall rör sig alltid kaotiskt i alla riktningar — detta är *termisk rörelse*. Ju varmare, desto snabbare. En *elektrisk ström* uppstår när det finns en svag *nettoriktning* ovanpå detta kaos — lite fler elektroner rör sig åt ett håll än åt det andra. Seebeckeffekten omvandlar temperaturskillnad till just en sådan nettoriktning.

**Två pumpar med olika styrka:** Tänk dig att varje metall är en "pump" som försöker flytta elektroner från varm till kall. I koppar kanske denna pump är svag, medan den i järn är starkare. När du kopplar ihop dem i en krets arbetar pumparna mot varandra — och den starkare vinner. Resultatet blir att elektroner cirkulerar kontinuerligt runt kretsen så länge temperaturskillnaden upprätthålls.

**Matematiskt:** nettospänningen blir proportionell mot *skillnaden* mellan de två metallernas Seebeckkoefficienter. Ju större skillnad, desto högre spänning får man ut.

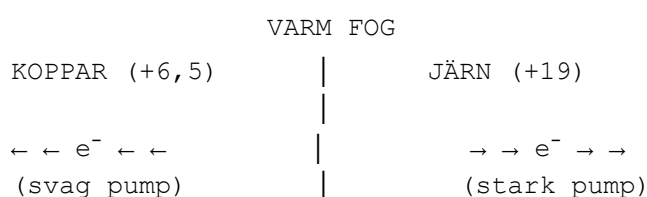
### Vad händer vid fogen? Två exempel

#### Exempel 1: Koppar (+6,5) och konstantan (-35) — olika tecken



I koppar knuffas elektronerna bort från fogen (positivt tecken = mot kall ände). I konstantan knuffas de *mot* fogen (negativt tecken = mot varm ände). Resultatet: båda "pumparna" skickar elektroner åt samma håll runt kretsen — effekterna **adderar**. Skillnad:  $6,5 - (-35) = 41,5 \mu\text{V/K}$ .

#### Exempel 2: Koppar (+6,5) och järn (+19) — samma tecken



Här knuffas elektronerna bort från fogen i *båda* metallerna (båda har positivt tecken). Men de knuffar åt *olika håll i kretsen!* Det blir en "dragkamp" vid fogen — järn pumpar hårdare och vinner. Netto: elektroner dras från kopparsidan till järnsidan. Skillnad:  $6,5 - 19 = -12,5 \mu\text{V/K}$  (svagare än exempel 1).

## Fördjupning: Varför negativa värden?

*Detta avsnitt är för dig som vill förstå fysiken på djupet.*

Vi har sagt att elektronerna "knuffas" från varm till kall, och att olika metaller knuffar olika hårt. Men varför knuffar vissa metaller *åt andra hållet*? Svaret handlar om **elektronhål**.

**Vad är ett elektronhål?** I ett kristallgitter finns platser där elektroner "borde" finnas men saknas. Denna tomma plats kallas ett *hål*. När en elektron hoppar in i hålet, lämnar den ett nytt hål bakom sig. Resultatet ser ut som om hålet rör sig — fast åt motsatt håll mot elektronen!

Tänk dig en rad med människor i en biosalong där en stol är tom. Om personen till höger flyttar till den tomma stolen, ser det ut som om den "tomma platsen" flyttade åt vänster. Hålet rör sig åt motsatt håll mot personen.

**Elektroner vs hål vid uppvärmning:** När en metall värms upp får *både* elektroner och hål mer energi. Men de reagerar olika:

- **Elektroner** (negativ laddning) diffunderar mot den kalla sidan → skapar *positiv* Seebeckkoefficient
- **Hål** (positiv laddning) diffunderar mot den kalla sidan → skapar *negativ* Seebeckkoefficient

**Vad avgör tecknet?** I de flesta metaller finns både elektroner och hål som kan leda ström. Vilket tecken Seebeckkoefficienten får beror på vilken typ som *dominerar* och hur de sprids vid kollisioner med kristallgittret.

I koppar, silver och guld dominerar elektronerna → positivt tecken. I nickel och konstantan dominerar hålen (eller så sprids elektronerna på ett sätt som ger samma effekt) → negativt tecken.

**Bandstruktur — den djupaste förklaringen:** Tecknet bestäms ytterst av metallens *bandstruktur* — hur elektronernas energinivåer är fördelade. Nära *Fermi-nivån* (den högsta energinivå som elektroner normalt fyller) avgör kurvans lutning om elektroner eller hål dominerar transporten.

Om det finns fler tillgängliga tillstånd *ovanför* Fermi-nivån än under, beter sig materialet som om det har fler elektroner → positivt tecken. Om det finns fler tillstånd *under* Fermi-nivån, beter det sig som om det har fler hål → negativt tecken.

Detta är anledningen till att man inte kan förutsäga Seebeckkoefficienten bara genom att titta på hur bra en metall leder ström — man måste känna till den detaljerade elektronstrukturen.

**Halvledare:** I halvledare är detta ännu tydligare. Man kan *dopa* materialet (tillföra orenheter) för att skapa antingen elektron-dominerade (*n-typ*, negativ Seebeck) eller hål-dominerade (*p-typ*, positiv Seebeck) material. Därför har halvledare mycket

högre Seebeckkoefficienter än metaller — man kan optimera dem för termoelektriska tillämpningar.

## Formler

### Termoelektrisk spänning:

$$V = (S_A - S_B) \times \Delta T$$

där  $S_A$  och  $S_B$  är Seebeckkoefficienterna för de två metallerna (i  $\mu\text{V/K}$ ) och  $\Delta T$  är temperaturskillnaden i Kelvin eller Celsius.

**Exempel:** Koppar–järn vid  $\Delta T = 100 \text{ K}$ :

$$V = (6,5 - 19) \times 100 = -1250 \mu\text{V} \approx -1,25 \text{ mV}$$

(Det negativa tecknet anger polariteten – i praktiken läser multimetern absolutvärdet beroende på hur ledarna är anslutna.)

## Seebeckkoefficienter

Tabellen visar Seebeckkoefficienten för olika material vid rumstemperatur, relativt platina. **Storleken** (absolutvärdet) anger hur starkt elektronerna i materialet reagerar på en temperaturskillnad — ju högre värde, desto starkare "pump". **Tecknet** anger polariteten, alltså åt vilket håll spänningen uppstår.

Observera att halvledarna (selen, tellur, kisel, germanium) har mycket högre koefficienter än metallerna — elektronerna i halvledare reagerar starkare på temperaturförändringar eftersom de är färre och mindre "fria" än i metaller.

Metall	Seebeckkoefficient ( $\mu\text{V/K}$ )
Selen (Se)	+900
Tellur (Te)	+500
Kisel (Si)	+440
Germanium (Ge)	+300
Antimon (Sb)	+47
Nikrom (NiCr)	+25
Järn (Fe)	+19
Molybden (Mo)	+10
Kadmium (Cd)	+7,5
Wolfram (W)	+7,5
Koppar (Cu)	+6,5
Silver (Ag)	+6,5
Guld (Au)	+6,5
Aluminium (Al)	+3,5
Platina (Pt)	0 (referens)
Nickel (Ni)	-15
Konstantan (Cu55Ni45)	-35
Bismut (Bi)	-72

**Tips för val av metallpar:** Välj metaller med stor skillnad i koefficient för högre utspänning. Koppar–konstantan ger ca  $40 \mu\text{V/K}$ , järn–konstantan ca  $50 \mu\text{V/K}$ .

**Måste man kombinera positiv och negativ?** Nej! Det viktiga är att koefficienterna är *olika* — ju större skillnad, desto högre spänning. Koppar (+6,5) och järn (+19)

fungerar utmärkt trots att båda är positiva: skillnaden är  $12,5 \mu\text{V/K}$ . Men koppar (+6,5) och konstantan (-35) ger ännu högre spänning eftersom skillnaden blir  $41,5 \mu\text{V/K}$ . Det är därför konstantan är så populärt i kommersiella termoelement — dess stora negativa värde ger stor skillnad mot de flesta vanliga metaller.

## Tillämpningar

### Termoelement för temperaturmätning

Den vanligaste tillämpningen av Seebeckeffekten är **termoelement** (thermocouples) för temperaturmätning. Genom att kalibrera spänningen mot kända temperaturer kan man mäta allt från  $-200 \text{ }^\circ\text{C}$  till över  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ , beroende på metallkombination. Termoelement används i industriugnar, motordiagnostik, processindustri och vetenskapliga experiment.

### Termoelektriska generatorer (TEG)

En termoelektrisk generator omvandlar värme direkt till elektricitet utan rörliga delar. Den mest kända tillämpningen är **RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator)** som används i rymdsonder.

**Voyager-sonderna** (uppskjutna 1977) är ett fantastiskt exempel. Varje sond har tre RTG:er som använder värmen från sönderfallande plutonium-238 för att generera elektricitet. Vid uppskjutningen producerade de cirka  $470 \text{ W}$  elektrisk effekt från  $2400 \text{ W}$  termisk värme — en verkningsgrad på ungefär **6–7%**. Nästan 50 år senare fungerar de fortfarande och levererar cirka  $220 \text{ W}$ , tillräckligt för att skicka data från interstellärt rum!

RTG:er har inga rörliga delar och är extremt tillförlitliga. De används där solpaneler inte fungerar — i yttre solsystemet, på Mars (Curiosity, Perseverance), och tidigare i avlägsna fyrar i Arktis.

### Peltier-kylare

Seebeckeffekten är reversibel. Om man istället *tillför* ström till ett termoelement, får man en temperaturskillnad — detta kallas **Peltiereffekten**. En sida blir kall, den andra varm.

Peltier-element används för: kylning av CPU:er och laserdioder, bärbar kylboxar, exakt temperaturkontroll i vetenskapliga instrument, och avfuktare (genom att kyla luft så att fukt kondenserar).

## Varför används inte termoelektricitet i större skala?

En naturlig fråga uppstår: om värme finns överallt — i industrier, bilavgaser, geotermiska källor — varför använder vi inte Seebeckeffekten för storskalig elproduktion? Svaret handlar om **verkningsgrad**.

### Det termoelektriska dilemmat

Ett materials termoelektriska prestanda beskrivs av **ZT-värdet** (figure of merit):

$$ZT = (S^2 \times \sigma / \kappa) \times T$$

där S är Seebeckkoefficienten,  $\sigma$  är elektrisk ledningsförmåga,  $\kappa$  är termisk ledningsförmåga, och T är absolut temperatur.

**Problemet:** För hög verkningsgrad vill man ha *hög* elektrisk ledningsförmåga (så strömmen flyter lätt) men *låg* termisk ledningsförmåga (så temperaturskillnaden bevaras). I metaller är dessa egenskaper kopplade — material som leder elektricitet bra leder också värme bra (Wiedemann-Franz lagen). Detta sätter en fundamental begränsning.

## Verkningsgrad i praktiken

De bästa kommersiella termoelektriska materialen (som vismuttellurid,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) har ZT-värden runt 1–2 vid rumstemperatur. Detta ger verkningsgrader på endast **5–8%**, jämfört med 30–40% för konventionella ång- och gasturbiner.

För att termoelektrisk elproduktion ska bli konkurrenskraftig i stor skala behövs ZT-värden runt 4, vilket skulle ge cirka 40% av Carnot-verkningsgraden. Forskare arbetar med nanostrukturerade material för att uppnå detta, men det är fortfarande en utmaning.

## Där termoelektricitet ändå vinner

Trots den låga verkningsgraden är termoelektriska generatorer överlägsna i vissa nischer:

- **Inga rörliga delar** — extremt hög tillförlitlighet (Voyager har fungerat i nästan 50 år)
- **Tyst drift** — ingen vibration eller buller
- **Underhållsfritt** — idealiskt för otillgängliga platser
- **Skalbart** — fungerar från milliwatt till kilowatt
- **Spillvärme** — även låg verkningsgrad är "gratis" om värmen annars skulle gå förlorad

Tillämpningar inkluderar: bärbara laddare som drivs av kroppstemperatur, energiåtervinning från bilavgaser, fjärrsensorer, och naturligtvis rymdmissioner där solpaneler inte är ett alternativ.

## Källor

**Seebeckkoefficienter:** "Seebeck coefficient" – Wikipedia. Ursprungskälla: Lasance, C.J.M. (2006), "The Seebeck Coefficient", *Electronics Cooling*, November 2006.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Seebeck\\_coefficient](https://en.wikipedia.org/wiki/Seebeck_coefficient)

**RTG och Voyager:** "Radioisotope thermoelectric generator" – Wikipedia.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope\\_thermoelectric\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator)

**Termoelektriska material:** "Thermoelectric materials" – Wikipedia.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric\\_materials](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_materials)