

# Elektronen och elektrotekniken.

Av HANNES ALFVÉN.<sup>1</sup>

Man skulle kunna säga att elektrotekniken utgör det praktiska utnyttjandet av elektronens egenskaper. Då en elektrisk ström består av elektroner i rörelse är det i en elektrisk motor kraftverkningsarna mellan de elektroner, som strömma igenom statorns lindningar och de som gå genom rotorerna, som ge upphov till rörelsen. I en glödlampa eller ett elektriskt värmelement kollidera elektronerna så ofta med ledarens atomer att dessas rörelse blir allt snabbare, vilket betyder, att vi få en uppvärmning. I en glimlampa eller ett neonrör exciteras gasens atomer av elektronerna, som satts i rörelse av ett elektriskt fält, och när de återgå till sitt normala tillstånd utstrålar ett intensivt ljus.

Om man i en koppartråd på andra sidan jordklotet sätter elektroner i rytmiska svängningar, så kunna dessa påverka andra elektroner t. e. i en radioapparat här och det på ett sådant vis, att högtalaren vibrerar på nästan exakt samma sätt som en "sockerbit" i Australien. Och när man lyfter en telefonlur och slår på nummerskivan, sändes billioner elektroner ut, som på ett nästan obegripligt sätt trassla sig igenom en automattelefonstations trådhärvor och reläer och bringa en i förbindelse med den man önskar — eller också talar om att han eller hon är upptagen.

Vad är då dessa elektroner egentligen för någonting? Ja, vad en elektron i själva verket är — det är väl till hälften en filosofisk fråga. Man kan ofta föreställa sig elektronerna som — låt oss säga — små kulor, som ha den minsta massa man känner och också den minsta elektriska laddningen. Men dessutom ha de också en vågnatur och i många fall verkar en ström av elektroner som en vågrörelse.

Om nu dessa små kulor äro så nyttiga tingestår, som vi sett att de äro, så måste man fråga: hur gör man för att framställa dem? Framställningssättet är ganska komplicerat; om man vill framställa dem ur intet måste man använda radioaktiva preparat eller hård  $\gamma$ -strålning. Men lyckligtvis behöver elektroteknikerna ej alls bekymra sig om framställningen. Eftersom elektronerna utgöra en av de mest fundamentala byggstenarna i all materia, så finnas de tillstädes i oerhört stort antal varhelst det finnes någon materia. Och för att framkalla elektriska fenomen behöver man endast sätta dem i rörelse eller flytta över ett antal elektroner från en kropp till en annan. Om man nämligen sätter elektroner i rörelse, får man en elektrisk ström, som kan påvisas t. e. genom det magnetfält den alstrar. Och om man överför ett antal elektroner från en kropp till en annan, är detta det samma som att man laddar kropparna elektriskt. Den kropp från vilken man tagit bort elektronerna blir positivt laddad och den som får överskott av elektroner blir elektriskt negativt.

Om vi nu i elektronen ha en utmärkt tjänare, som arbetar för oss i motorer, lyser oss med elektriska lampor och sjunger — och ljuger — för oss i radio-

<sup>1</sup> Installationsföreläsning den 10 maj 1941 i samband med tillträdet av professuren i teoretisk elektroteknik med mätteknik vid Kungl. tekniska högskolan.

högtalare, så bör man väl vänta sig att det ögonblick när han för första gången presenterades för människorna var mycket högtidligt. Det var det nog också för den människa — J. J. THOMSON — som förrättade presentationen och för dem som närmare följde hans undersökningar. Men knappast däremot för elektroteknikerna. Det fanns nämligen elektrotekniker redan då. Elektrotekniken var högt utvecklad redan när elektronen upptäcktes. Elektriciteten hade länge utnyttjats i praktiken innan man lärde känna dess atomiska struktur, dvs. att den utgjordes av det slags partiklar, som vi kalla elektroner.

Det säges ofta att människan fick sin första erfarenhet av ett elektriskt fenomen, när en av våra håriga stamfäder första gången såg en blix. Det är dock inte helt riktigt, ty då hade elektriciteten redan länge varit i människans tjänst — om än henne själv ovetande.

Människokroppen själv har nämligen ett mycket invecklat elektriskt ledningssystem. Som särskilt de senaste decenniernas undersökningar visat kan nerverna i viss mån anses som elektriska ledningstrådar. Alla våra sinnesintryck och alla order vi sända till våra muskler äro sålunda förmedlade av elektriska — eller korrektere elektrokemiska — impulser. Om en cell i något av våra sinnesorgan retas, sänder den elektriska impulser genom en nervtråd till hjärnan och om en muskel skall kontraheras, utlöses kontraktionen av en serie elektriska impulser från hjärnan via en nervtråd till muskeln. Förutsättningen för att vi skola kunna se en blix, är sålunda att den elektriska kabeln från ögat till hjärnan — alltså synnerven — fungerar. För att vi skola kunna iakttaga det enklaste elektriska fenomenet fordras att människokroppens elektriska system är högt utvecklat.

Om vi med elektroteknik mena de elektriska fenomenens praktiska utnyttjande, så borde vi väl också medräkna deras användning inom människokroppen. I så fall är elektrotekniken lika gammal som människan.

Men ta vi elektrotekniken i dess vanliga bemärkelse, måste vi säga att den är relativt ung. Det var tämligen sent som man fick någon större praktisk användning av elektriciteten. Vid naturvetenskapernas allmänna uppblomstring under 1600- och 1700-talen kom elektricitetsläran visserligen inte alls i skymundan. Den tilldrog sig tvärtom ett mycket stort intresse, men den enda gren av den man kände till var elektrostiken, och än i denna dag har den grenen inte någon större praktisk användning.

Förutsättningen för våra dagars elektroteknik var upptäckten av den galvaniska strömmen och av dess magnetiska verkningar. Genom att utnyttja dessa fenomen blev det möjligt att sända signaler på elektrisk väg. Härmed var grunden lagd för den del av elektrotekniken som man kallar svagströmsteknik. Starkströmstekniken däremot börjar med upptäckten av den elektromagnetiska induktionen. Därigenom blev det nämligen möjligt att alstra så starka strömmar, att en kraftöverföring kunde komma till stånd.

En snabb och storartad utveckling följde nu. Icke utan skäl har man talat om att det var en ny epok — elektricitetens — som började. De stora framstegen i tekniken gjorde omgestaltade vårt dagliga liv i hög grad.

Ser man på den fysikaliska grunden för denna teknik, så finner man att den utgjordes på några enkla lagar: Ohms lag, Joules lag och de lagar, som senare sammanfattades i Maxwells lagar. Hela tiden var det huvudsakligen elektriska strömmar i metalliska ledare som utnyttjades. Vad dessa strömmar bestod utav var av relativt underordnad betydelse och deras växelverknings med ledaren och dess omgivning beskrevs fenomenologiskt genom ett fåtal materialkonstanter: ledningsförmåga, dielektricitetskonstant, permeabilitet.

Det var först när man började studera elektriska strömmar utanför metalliska ledare, som elektricitetens atomistiska struktur kom in i högre grad. Vid urladdningar i gaser och vakuum spelar nämligen elektronens massa och laddning en avgörande roll, och det var ingen tillfällighet, att just studiet av dessa fenomen ledde till upptäckten av elektronen. Ty likaväl som vi nu icke kunna teoretiskt behandla dessa företeelser utan att känna elektronens egenskaper, likaväl kunde man icke länge studera dem utan att komma underfund med elektronens existens. Vid experiment med urladdningar i förtunnade gaser kunde man iakttaga en strålning som utgår från katoden, den negativa elektroden. Dessa katodstrålar studerades och man fann att de påverkades av elektriska och magnetiska fält. Undersökningarna av katodstrålarnas egenskaper ledde till att man måste anta att de utgjordes av negativt laddade partiklar med mycket liten massa, och det är dessa partiklar, som fått namnet elektroner.

Om upptäckten av elektronen och studiet av dess roll vid urladdningar i hög grad intresserade dåtidens fysiker, så torde de ha tilldragit sig ganska litet intresse från teknikernas sida. Dessa intresserade sig för större saker än elektroner och det var icke heller lätt att tänka sig att dessa fenomen skulle få någon praktisk betydelse. Nu — knappt ett halvt sekel senare, när vi ha sett vart studiet av detta område lett — kunna vi kanske tycka, att denna inställning rövde brist på fantasi och förutseende — eller snarare — vi skulle kunna tycka det om icke precis samma inställning fortfarande är så framträdande. Jag läste nyligen i en amerikansk teknisk-fysisk tidskrift hur en fysiker beklagade sig över en mycket allmän uppfattning, att fysiker äro några kurrar, som "spränga atomer" och syssla med kosmisk strålning, men som omöjligt kunna göra någon nytta inom tekniken. Han ville påpeka att de flesta fysiker icke syssla med de nämnda forskningsgrenarna utan bearbeta problem, som ha en ganska omedelbar teknisk användning. Men det bör också påpekas att — sett på lång sikt — det är just den forskning, som icke omedelbart tar sikte på vissa direkta tekniska problem, som har den största tekniska betydelsen. Det är mycket sannolikt att en god del av vad många idag närmast skulle beteckna som l'art pour l'art, forskning med nyfikenheten som enda drivkraft, kommer att bli av fundamental vikt för morgondagens teknik, kanske mycket viktigare än den forskning, som tar sikte på bestämda närlig-

gande uppgifter. Men naturligtvis är det svårt eller omöjligt att ange vilka dessa områden äro, om det är kärnfysik, centimetervågor eller gasurladdningar.

Låt oss nu ett ögonblick se varför det just är elektronen, som fått en så stor betydelse inom de mest skilda områden av elektrotekniken. Fysiken lär oss ju, att det finnes många elementarpartiklar att välja på: elektronen — som ju är negativt laddad — har en positiv tvilling, positronen, som har samma massa, men positiv laddning. Vidare finnes en annan positiv elementarpartikel, protonen, som är 1840 ggr tyngre än elektronen, och så vidare neutronen, en neutral partikel med ungefär samma massa som protonen. Slutligen ha vi de ganska nyupptäckta mesotronerna, positivt eller negativt laddade partiklar med massor som äro ungefär en tiondedel av protonmassan.

Av alla dessa olika elementarpartiklar äro mesotronerna och därefter positronen svårast att komma åt att studera beroende på deras sällsynthet och på att det är vid relativt komplicerade processer som de frigöras. Helt annat är det med elektroner, protoner och neutroner, som äro normala byggstenar i all materia. Atomerna äro ju uppbyggda av en central positivt laddad kärna, som omkretsas av en eller flera negativa elektroner. Atomkärnan i sin tur består av protoner och neutroner.

Då nu elektronerna ligga ytterst i atomen och ofta äro ganska löst bundna till den, är det lätt att frigöra en eller flera elektroner från atomen. Vad som därvid återstår kallar man en positiv jon. Om vi ha en gas, så består den ju av atomer, eventuellt sammanslutna till molekyler. Dessa atomer äro elektriskt neutrala. Om vi utsätta gasen för ett elektriskt fält genom att lägga en spänning mellan två elektroder, så påverkas inte gasens atomer. Det är först om en atom är joniserad, alltså uppdelad i en elektron och en positiv jon, som ett elektriskt fält har någon inverkan. Vi få sålunda en elektricitetstransport genom gasen, en elektrisk ström, som består av positiva joner som vandra i ena riktningen och negativa elektroner, som röra sig åt motsatt håll.

Nu är det ju så, att elektronerna ha en mycket mindre massa än jonerna. Det elektriska fältet ger dem därför en större hastighet än jonerna. Men då både joner och elektroner föra lika stor laddning, betyder detta att största delen av strömmen transporteras av de snabbare elektronerna. Man kan säga att då elektronerna äro mindre än jonerna, ha de lättare att ta sig fram i gasen och få därför ombesörja den huvudsakliga delen av elektricitetstransporten.

Än mera utpräglat är detta förhållande i metalliska ledare. Atomerna ha här normalt avgivit en eller flera elektroner som ha en hög grad av rörelsefrihet inom hela metallen. Å andra sidan äro de positiva atomresterna mycket orörligare än i gaser. De äro fixerade till ett kristallgitter. Ett elektriskt fält ger därför — även om det är svagt — upphov till en strömning av elektroner — en elektrisk ström, men påverkar knappast alls de positiva atomresterna. Den elektriska strömmen i en metall förmedlas helt och hållet av elektroner.

Den tekniska betydelsen av att elektronen har en så liten massa är mest i ögonen fallande vad beträffar elektronrör och katodstråleoscillografer. Den

tid det tar för en elektron att röra sig från en elektrod till en annan i ett elektronrör är av storleksordningen några millarddels sekunder. Så länge vi använda elektronröret för att förstärka förlopp, som äro långsamma i förhållande till denna tidslängd, arbetar röret tröghetsfritt. Men om vi ha mycket snabbt föränderliga förlopp, kommer den tid det tar för elektronen att röra sig mellan elektroderna att spela roll, och gränsen för rörets användbarhet är nådd, när den ström vi önska förstärka, ändrar sig avsevärt under en tid som är av samma storleksordning som elektronernas gångtid. Detta sätter en gräns vid en frekvens på några hundra millioner svängningar per sekund, dvs. vid en våglängd på ungefär en meter.

Om vi i stället för elektroner i röret utnyttjade protoner för att transportera elektriciteten, skulle deras större massa medföra att de rörde sig långsammare. Om övriga förhållanden vore oförändrade, skulle gångtiden ökas ungefär 40 ggr, vilket medför att endast 40-dedelen så höga frekvenser kunna förstärkas. Rörets kortvågsgrens skulle vara 40 m i stället för 1 m. Elektronens lätthet är alltså av en mycket stor betydelse för elektronrörets funktion.

Detta gäller också för katodstråleosillografen. När man konstruerar en oscillograf söker man ge det rörliga systemet så liten tröghet som möjligt för att kunna registrera snabba förlopp. Reduktionen av en slingosillografs tröghet kan emellertid bara ske till en viss gräns. Men om man övergår från denna typ till katodstråleosillografen utbyter man ju en slinga med en liten spegel mot en elektronstråle. Därmed har man nått fram till det mest tröghetsfria som finns — elektronmassan är ju den minsta vi känna.

Ju bättre vi känna ett fenomen och ju säkrare vi kunna behärska det desto större utsikter ha vi att tekniskt kunna utnyttja det. Elektronerna kunna vi använda på mångahanda sätt, tack vare att vi känna lagarna för deras rörelser. Särskilt betydelsefulla äro lagarna för rörelsen i ett elektriskt fält och i ett magnetiskt fält. Det är nämligen genom elektriska och magnetiska fält vi kunna styra elektronerna. Låt oss se hur man principiellt använder detta i olika fall.

I vanliga elektronrör använder man sig av elektriska fält. Genom att ändra gallerspänningen, förändrar man fältet nära katoden, vilket resulterar i att flera eller färre elektroner sugas ut från katoden. Anodströmmens styrka regleras sålunda av ett elektriskt fält. I magnetronrör påverkas elektronerna också av magnetfält.

I katodstråleosillografen är det inte elektronstrålens styrka utan dess riktning som förändras. Sedan man på olika sätt fått fram en tunn stråle av elektroner, avböjer man denna stråle genom ett transversellt elektriskt fält mellan avböjningsplattorna. Härigenom får man katodstrålen att teckna de spänningsförlopp man för till avböjningsplattorna. Även med magnetfält kan man styra katodstrålen.

Det är emellertid inte bara katodstrålens riktning utan även dess intensitet som man kan styra. Om man reglerar strålens avböjning så att den successivt stryker över en hel bildyta helt snabbt och samtidigt låter dess intensitet variera så att de olika punkterna av ytan bli olika intensiva, så få vi en bild. Det är på så sätt man inom televisionen oftast framställer

en bild. Ju större krav man ställer på bildens detaljrikedom, desto snabbare och säkrare måste man kunna styra de elektroner som alstra bilden.

Elektronerna kunna också styras på andra sätt. I fotoceller t. e. regleras strömstyrkan av elektroner utav det infallande ljusets intensitet.

Men ofta är det inte en styrning av elektronerna man eftersträvar. Det är nog om man lyckas accelerera dem till mycket stora hastigheter. Detta är fallet i röntgenrör, vars strålning är hårdare ju större hastighet elektronerna ha.

Den här lilla översikten har kanske kunnat ge det intrycket att man suveränt behärskar elektronerna och kan handskas med dem ungefär som man vill. Ingenting kan vara felaktigare. Beträffande de nys berörda områdena gäller det kanske i ganska hög grad att man kan teoretiskt behandla åtminstone de enklaste och viktigaste fenomenen och därmed också teoretiskt få en viss hjälp vid beräkningen hur de tekniska apparaterna bäst skola konstrueras. Detta beror på att vid alla dessa fenomen påverkas elektronerna endast av yttre fält och av varandra. Men gå vi till sådana fenomen som urladdningar i gaser, stöta vi på svårigheter av en annan storleksordning. Här spelar nämligen positiva joner också en avgörande roll. Även den enklaste teori måste ta hänsyn till dussintals olika effekter: jonisering och excitering av neutrala atomer, återförening av joner och elektroner, krafter från elektronernas och jonernas rymdladdningar osv. Visst ha vi reda på i huvudsak vad som sker i en urladdning och visst finnes det teorier för gasurladdningarna, men knappast några praktiskt användbara teorier annat än för detaljfenomen.

Men området har fått en enorm teknisk betydelse. Kviksilverströmriktare, brytare och högtryckslampor, som ju äro viktiga nyförvärv för tekniken, bygga alla på gasurladdningarnas egenskaper. Som så ofta i vetenskapens och teknikens utveckling har man här fått ett område där tekniken hunnit långt före teorien. Man kan tekniskt behärska fenomenen, som man endast ofullständigt kan behandla teoretiskt. Nå, kan man säga, det spelar inte så stor roll var teorien för fenomenen står om vi bara kunna använda oss av dem, och det kunna vi. Det behöver inte ens hindra den vidare utvecklingen.

Det är alldeles riktigt och det skall inte förnekas att många av de betydelsefullaste resultaten nåtts oberoende av teorier — ibland t. o. m. i strid med gällande teorier. Men lika litet kan man förneka att en användbar teori kolossalt underlättar utvecklingsarbetet på ett område. Helt utan någon tillstymmelse till teori kan man överhuvudtaget ej bearbeta ett komplicerat fenomen. Om fenomenet t. e. beror på 10 parametrar, som alla kan antaga 10 olika värden, måste man nämligen göra bortåt  $10^{10}$  försök för att rent på måfå finna de optimala värdena. Teoriens praktiska uppgift är att reducera detta antal, och om vi hade en fullständig teori för ett område skulle vi kunna reducera antalet försök till 1. Detta dock under förutsättning att teorien inte är uttryckt i en hopplöst svår och obearbetbar formel.

Vad gasurladdningarna beträffa så ha vi säkert mycket långt kvar innan en något så när fullständig teori för dem kan ges. Det är kanske tvivelaktigt om

detta någonsin blir möjligt. Med den stora betydelse dessa fenomen nu ha fått är varje framsteg — experimentellt eller teoretiskt — av stort intresse, vilket också avspeglas i den växande litteraturen på detta gebit. Jag tror nog man kan spå att detta inom kort kommer att räknas till en av de viktigaste delarna inom elektrotekniken.

Som kontrast till utvecklingen på gasurladdningarnas område kan man nämna ett område där utvecklingen huvudsakligen berott på att man medvetet lärt sig behärska elektronernas rörelser. Jag tänker på elektronoptiken. Visserligen har det experimentella arbetet här varit av stor betydelse — kanske så stor som teorierna haft för gasurladdningarna, men inte större. Det är teoretiska beräkningar som visat vägen.

Om man inom den vanliga optiken vill avbilda ett föremål, kan man använda en lins som samlar de ljustrålar, som utgå från en punkt av föremålet, och bryter samman dem till en bildpunkt. Hur linsen skall slipas kan man beräkna om man känner lagarna för ljusets gång. Om i stället för ljus elektroner utsändas från ett föremål (som naturligtvis måste befinna sig i vakuum) så kunna vi beräkna deras rörelse lika exakt som vi kunna beräkna ljusets, eftersom vi känna lagarna för elektronernas rörelse lika bra som lagarna för ljusets. Liksom en lins avböjer en ljustråle, avböjes en elektronstråle av ett elektrostatiskt eller magnetiskt fält, och man kan ge dessa fält en sådan form att de påverka elektronstrålen precis likadant som en lins påverkar en ljustråle. Vi kunna alltså ersätta ljuset med elektroner och linserna med vad man kallar elektronlins.

Det är detta som kallas elektronoptik, och den har utvecklats så att den åtminstone i vissa avseenden överträffar den vanliga optiken. Elektronmikroskopet och bildtransformatorn är hittills de viktigaste tekniska resultaten.

Till sist måste jag anföra det färskaste exemplet på vilka framsteg som gjorts i konsten att behärska elektronernas rörelser. Det är bara ett par månader gammalt. Enligt en kortfattad not skall det ha lyckats en amerikan KERST, att åstadkomma en "elektrontransformator".

Uppslaget är flera år gammalt och har diskuterats och bearbetats på många håll. Det gäller en ny metod att åstadkomma snabba elektroner, vilket ju har en stor betydelse i många hänseenden. Det vanliga sättet att accelerera elektroner är ju att använda ett elektriskt fält. I ett urladdningsrör är den maximala energi en elektron kan få, proportionell mot spänningsskillnaden mellan elektroderna. Man brukar ange energien — i elektronvolt — genom att ange spänningen. Vill man ge elektronerna en mycket stor energi måste man alltså ha höga spänningar. Dessa spänningar kan man åstadkomma genom att likrikta och eventuellt samtidigt multiplicera en högspänd växelström som man i sin tur fått genom att transformera upp en lågspänd växelström.

Elektrontransformatorn innebär en genväg. Man utgår fortfarande från en lågspänd växelström, som man sänder genom primärlindningarna av en transformator. Denna transformator har emellertid sekundärlindningen ersatt med — en elektron. Detta är kanske något paradoxalt uttryckt, men innebär följande.

Om en elektron rör sig vinkelrätt mot kraftlinjerna i ett homogent magnetfält, beskriver den en cirkel. Om vi inte ha något elektriskt fält och magnetfältet är konstant, blir elektronens hastighet också konstant. Nu är det ju så att om det magnetiska flödet genom en slinga — som t. e. kan vara cirkulär — ändras, så induceras en elektromotorisk kraft i slingan. Om vi nu ersätta den cirkulära slingan med den cirkel som vår elektron beskriver, så inser man lätt att för varje varv elektronen tillryggalägger, ökas dess energi med det antal elektronvolt, som svarar mot den spänning som inducerades i slingan. Om elektronen snurrar runt ett stort antal varv och det magnetiska flödet genom cirkelns yta hela tiden växer, får elektronen därför en stor energi. Den strävar då att öka cirkelbanans radie, men om magnetfältet vid cirkelns periferi samtidigt växer på lämpligt sätt kan detta kompenseras.

Man kan lätt visa, att om elektronen hinner snurra låt oss säga 100 000 varv under den tid som magnetfältet växer från sitt minimivärde nära noll till sitt maximivärde, så får den samma spänning som man skulle fått i en sekundärlindning med 100 000 varv. Man kan alltså säga att sekundärlindningen är ersatt med en elektron som är "upplindad" kring det magnetiska flödet.

Man måste säga att elektrontransformatorn utgör en utomordentligt elegant lösning av problemet att åstadkomma snabba elektroner. Men det är också uppenbart vilka enorma svårigheter man möter vid förverkligandet av idén. Först måste man åstadkomma ett magnetfält, som dels håller elektronen i en cirkel av riklig storlek och dels ger den flödesändring, som skall ge accelerationen. Så måste man vid rätt tid och på rätt plats föra in ett stort antal elektroner, som skola accelereras och vidare — och det är det allra svåraste — styra dem så att de kunna löpa 100 000-tals varv utan att gå förlorade. Och så till sist skall man utnyttja dem när de ha fått maximal energi. — En mycket svår uppgift, som många misslyckats med.

Vår förmåga att hantera elektroner och få dem att röra sig så som vi vilja har emellertid vuxit så mycket att även så besvärliga problem numera kunna bemästras, som ju visas av att ett första experiment med elektrontransformatorn lyckats. Man har redan nått energier på över 2 millioner volt, och jag tror man kan vänta sig 10 eller kanske 100 gånger mera. Det är mycket sannolikt att denna metod får en stor betydelse och kanske är det signifikativt att uppfinnaren så fort hans preliminära försök lyckats flyttade över till ett stort industrilaboratorium.

Det här exemplet visar hur långt man kommit i konsten att behärska elektronens rörelser.