

MIKROBØLGEOVNENS FYSIK



Malte Olsen

Fysikforlaget

MIKROBØLGEOVNENS FYSIK

Malte Olsen

Mikrobølgeovnens fysik
af Malte Olsen

Fysikforlaget
Slotsgade 2³
2200 København N

Tilrettelæggelse: Claus H. Christensen og Kaj Gregersen
Tryk: Budolfi Tryk, Aalborg

Mekanisk, fotografisk eller anden gengivelse af denne bog
eller dens enkelte dele er ikke tilladt uden lovlig hjemmel.

ISBN 87-7792-007-4

Forord

Denne bog er inspireret af et privat indkøb af en mikrobølgeovn. Der viste sig at være en række interessante forhold omkring den fysik, som vedrørte ovnen. Denne fysik afklares ikke i de gængse manualer til ovnen. Det bevirkede, at Ørsted Laboratoriet anskaffede den her anvendte ovn til øvelser, og den efterfølgende forsøgsrække blev udarbejdet. Under udarbejdelsen blev det klart, at den tilgængelige undervisningslitteratur er begrænset, og at der er megen god og forståelig fysik på gymnasieniveau indenfor emnet. Desuden har emnet en tilknytning til hverdagen. Der blev vist demonstrationsforsøg over emnet på den 15 LMFK kongres i Århus sommeren 1993. Det har været en bestræbelse at holde teoriniveauet på et plan, hvor det var bredt tilgængeligt. Det betyder, at der er snævre grænser for den teoretiske behandling specielt omkring opvarmningsprocessens detaljer f.eks. vekselvirkningen imellem emnerne i ovnen og den elektromagnetiske bølge såvel som indtrængningsdybder mm.

Bogen er tænkt som en inspirationskilde for de lærere, der ønsker at inddrage emnekredsen i undervisningen, og som opslagsbog og idébank for særligt interesserede elever bl.a. i forbindelse med eksperimentelle projekter.

Jeg vil gerne takke lektor Ove Østergaard og lektor Claus H. Christensen samt en lang række medarbejdere ved Ørsted Laboratoriet for kritik, gode råd og frugtbare diskussioner om bogens indhold. Endelig en tak til Moulinex for velvilligt at stille diagrammer mm. til rådighed.

Efteråret 1993

Malte Olsen
Ørsted laboratoriet
Niels Bohr Institutet

INDHOLD

HISTORISK BAGGRUND	5
Tandlæge Loomis var den første til at sende	5
James Maxwell opdagede elektromagnetiske bølger teoretisk Heinrich Hertz gav det eksperimentelle bevis på Maxwells teorier	6
Den videre historie	6
Demonstration 1, »Hertz forsøg«	7
HULRUMSMAGNETRONENS INDRETNING	7
MIKROBØLGEOVNEN	8
Lidt historie	8
KONSTRUKTION AF MIKROBØLGEOVNEN	8
MIKROBØLGER I DIELEKTRIKA	8
Næringsmidler	11
Indtrængningsdybde	11
Anvendelige materialer	11
BIOLOGISKE VIRKNINGER	11
MIKROBØLGEOPVARMNING, INDUSTRIELLE FORMÅL	12
NYTTEVIRKNING AF MIKROBØLGEOVNEN	12
Demonstration 2. Mikrobølgeovnens indretning	13
FORSØG MED MIKROBØLGEOVNEN	13
Undersøgelse af ovnen for utætheder	13
Måling af mikrobølgeovnens nyttevirkning	13
Måling af effektfordelingen i ovnrummet 1	13
Måling af effektfordelingen i ovnrummet 2	14
Måling af indtrængningsdybde af mikrobølgerne	14
Undersøgelse af den elektriske ledningsevnes betydning for opvarmningen	14
Undersøgelse af stofafhængigheden ved mikrobølgeopvarmningen	14
Undersøgelse af opvarmning af faste stoffer	15
Smeltning af is	15
Undersøgelse af bølgelængden af mikrobølger	15
Metals afskærmende virkning	15
Forsøg med mikrobølgeskåle og udstyr	16
Bestemmelse af CURIE-temperaturen for nikkel (og Jern Analogforsøg med andre opvarmningsmidler)	16
SUPPLERENDE FORSØG MED 3 CM MIKROBØLGER	16
Undersøgelse af mikrobølgers polarisation	16
Reflektion og transmission fra metalflader og dielektrika	17
Bølgelængde i luft, stående bølger 1	17
Bølgelængden i luft, stående bølger imellem metalflade og dielektrikum	18
Michelsoninterferometeret. Bølgelængde i luft, stående bølger 2	18
Transmissionsledninger	18
Bølgelængde i bølgeleder	18
Reflektion og transmission fra et metalgitter	19
Bølgelængden i glas	19
Bølgelængden i dielektrikum, brydning	20
Bølgelængden i flydende dielektrika	20
Forsøg med bølgelængde i vand	20
AFSLUTNING	20
ELEKTROMAGNETISKE BØLGER SAT I HISTORISK PERSPEKTIV	22
ANVENDT LITTERATUR	24

UNITED STATES PATENT OFFICE.

MAHLON LOOMIS, OF WASHINGTON, DISTRICT OF COLUMBIA.

IMPROVEMENT IN TELEGRAPHING.

Specification forming part of Letters Patent No. 129,971, dated July 30, 1872.

To all whom it may concern:

Be it known that I, MAHLON LOOMIS, dentist, of Washington, District of Columbia, have invented or discovered a new and Improved Mode of Telegraphing and of Generating Light, Heat, and Motive-Power; and I do hereby declare that the following is a full description thereof.

The nature of my invention or discovery consists, in general terms, of utilizing natural electricity and establishing an electrical current or circuit for telegraphic and other purposes without the aid of wires, artificial batteries, or cables to form such electrical circuit, and yet communicate from one continent of the globe to another.

To enable others skilled in electrical science to make use of my discovery, I will proceed to describe the arrangements and mode of operation.

As in dispensing with the double wire, (which was first used in telegraphing,) and making use of but one, substituting the earth instead of a wire to form one-half the circuit, so I now dispense with both wires, using the earth as one-half the circuit and the continuous electrical element far above the earth's surface for the other part of the circuit. I also dispense with all artificial batteries, but use the free electricity of the atmosphere, co-operating with that of the earth, to supply the electrical dynamic force or current for telegraphing and for other useful purposes, such as light, heat, and motive power.

As atmospheric electricity is found more and more abundant when moisture, clouds, heated currents of air, and other dissipating influences are left below and a greater altitude attained, my plan is to seek as high an elevation as practicable on the tops of high mountains, and thus penetrate or establish electrical connection

with the atmospheric stratum or ocean overlying local disturbances. Upon these mountaintops I erect suitable towers and apparatus to attract the electricity, or, in other words, to disturb the electrical equilibrium, and thus obtain a current of electricity, or shocks or pulsations, which traverse or disturb the positive electrical body of the atmosphere above and between two given points by communicating it to the negative electrical body in the earth below, to form the electrical circuit.

I deem it expedient to use an insulated wire or conductor as forming a part of the local apparatus and for conducting the electricity down to the foot of the mountain, or as far away as may be convenient for a telegraph-office, or to utilize it for other purposes.

I do not claim any new key-board nor any new alphabet or signals; I do not claim any new register or recording instrument; but

What I claim as my invention or discovery, and desire to secure by Letters Patent, is—

The utilization of natural electricity from elevated points by connecting the opposite polarity of the celestial and terrestrial bodies of electricity at different points by suitable conductors, and, for telegraphic purposes, relying upon the disturbance produced in the two electro-opposite bodies (of the earth and atmosphere) by an interruption of the continuity of one of the conductors from the electrical body being indicated upon its opposite or corresponding terminus, and thus producing a circuit or communication between the two without an artificial battery or the further use of wires or cables to connect the co-operating stations.

MAHLON LOOMIS.

Witnesses:

BOYD ELIOT,
C. C. WILSON.

Figur 1, Patentbevis.

HISTORISK BAGGRUND

Tandlæge Loomis var den første til at sende.

I 1864 beskæftigede den amerikanske tandlæge Mahlon Loomis (1826-1886) sig med telegrafen. Hans idé var, at efter samme recept som man var gået fra to ledninger til én ledning og jord, måtte det være muligt at overføre telegrafi uden ledninger dvs. via jord og luft. Det lykkedes ham som den første (registrerede) at overføre elektromagnetiske signaler d. 21/6 - 1864 (Virginia, USA), over en afstand på 22 km. Han arbejdede med emnet i en årrække, og i 1868 demonstrerede han sit system i overværelse af en række videnskabsmænd og kongresmedlemmer. Hans sender og modtager var 2 drager med snore af metaltråd. Når han rørte jord med den ene metalsnor slog en galvanometerenål forbundet til den anden dragestråds ud. Han sendte over en afstand på 18 miles. Som energikilde anvendte han »den atmosfæriske elektricitet«. Han udtog patent på ideen, og fik det d. 30/6 -1872 (U.S.P.O no. 199 971). På figur 1 ses den første tekstsider af patentet. I 1873 fik han \$ 50 000 fra kongressen til videreudvikling af opfindelsen, men manglede iøvrigt økonomisk opbakning, såvel som forståelse af fænomenet. Han døde inden han fik opfindelsen videreudviklet.

James Maxwell opdagede elektromagnetiske bølger teoretisk

I 1860 blev skotten James Clerk Maxwell (1831-1879) udpeget som professor ved Kings College i London. Her færdiggjorde han sin farveteori og udviklede teorien for elektricitet og magnetisme. Uden kendskab til Loomis opdagelse udviklede han i 1859-1864 sine elektrodynamiske ligninger, der gav matematisk form til Faradays opfattelse af elektriske fænomener herunder hans geniale kraftliniebegreb. Maxwell inddrog også Coulombs lov, Ørstedes forsøg, Ampères arbejder, Ohms love, Lenz lov, osv. Fra 1865 til 1873 udarbejdede han teksten til sin Treatise. Den udkom i 1873 i en bog: **A Treatise on Electricity and Magnetism**. Denne bog er for elektrodynamikken, hvad Newtons Principia 200 år før havde været for mekanikken. Fra 1871 var Maxwell professor i det nyetablerede Cavendish laboratorium.

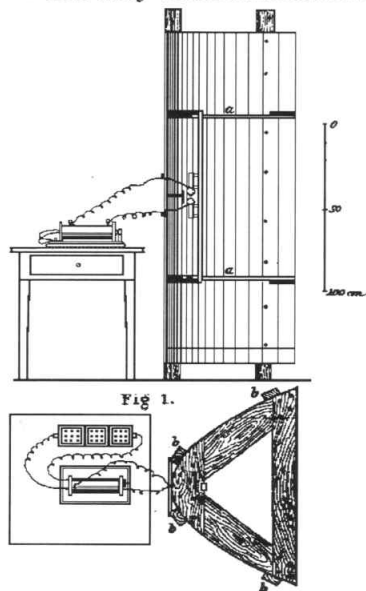
Han tog som udgangspunkt i sin teori en analogi med elasticitetsteori, at

der fandtes en elastisk »ether«, hvori de elektriske virkninger udbredte sig, svarende til elastiske bølger i en fysisk væske. Ud af hans teoretiske værk kom en beskrivelse af elektrodynamikken herunder et helt nyt begreb »forskydningsstrømmen«, som giver anledning til en forudsigelse af elektromagnetiske bølger. Det skulle svare til elastiske bølger i hinder, men de var ikke kendt på det pågældende tidspunkt som et elektrodynamisk fænomen. Han beskriver for første gang sine elektrodynamiske teorier i en note fra 1865 (i Kings College): **A Dynamical Theory of the Electro-magnetic Field** (Philosophical Transactions vol 155, 1865).

Heinrich Hertz gav det eksperimentelle bevis på Maxwells teorier

Da ingen forbandt Loomis arbejde med Maxwells arbejder, kom teorien til at stå uden eksperimentelt bevis i en årrække. Heinrich Hertz (1857-1894) var ingeniør fra den tekniske højskole i Dresden. I 1878 blev han ansat i Berlin og studerede hos H. Helmholtz (1821-1894) og G. Kirchhoff (1824-1887). I 1885 blev han professor ved den tekniske højskole i Karlsruhe. Det var her, han udførte sine eksperimenter med elektromagnetiske bølger, som han publicerede i **Annalen Der Physik Und Chemie, bd XXXVI s 769 ff (1889): Über Strahlen electricher Kraft**

Annalen d. Phys. u. Chem. N.F. Bd. XXXVI.

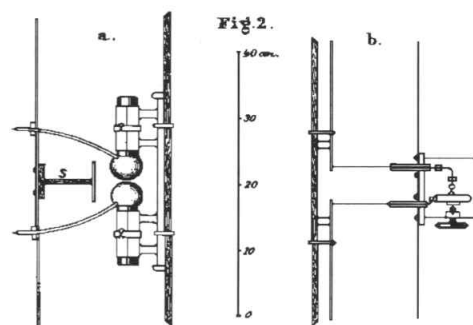


På figur 2, vises Hertz apparatur fra hans afhandling. Her efterviste han alle væsentlige egenskaber ved elektromagnetiske bølger: produktion af bølger, spejling, retlinet udbredelse, polarisation. Han udviklede antenner, måler bølgelængde, men kunne kun sende op til ca. 10 m. Senderen

var en gnistsender, med en antenne i form af en dipol (som derfor kaldes en Hertzdipol). Modtageren var ligeledes en Hertzdipol, med et lille gnistgab på 1/10 mm, som tillod, at man kunne se, om der kom et signal. Dette markeredes ved en gnist over gnistgabet. Hertz forsøg var den eksperimentelle bekræftelse på Maxwells ligninger, og blev begyndelsen til en ny æra, som skabte radio, fjernsyn, radar o.s.v.

Den videre historie

I 1897 sendte Italieneren Guglielmo Marconi (1874-1937) 14 km med sin gnisttelegraf, i 1901 sendte han over Atlanten. I 1902 opdagede Oliver Heaviside (1850-1925) de såkaldte Heavisidelag i ionosfæren, som tillader, at man sender kortbølger, der følger jordens krumning, idet bølgerne spejles i de ioniserede lag. I 1902 opfandt danskeren Valdemar Poulsen (1869-1942) den højfrekvente buesender, som sendte med højere frekvenser end tidligere metoder, og med meget større effekt. Samtidigt gav den en mere pålidelig forbindelse (den største buesender blev opstillet på Java i 1933 og havde en sendereffekt på 4 MW). I 1935 gav tyskerne O. Heil og A. Arsenjawa-Heil udkast til Klystronen, i 1938 udviklede englænderne den første radarvarslingskæde (det var umiddelbart før 2. Verdenskrig). Den videre udbygning i Eng-



Figur 2, Hertz opstilling.

land ledes af Wattson-Watts. Bølgelængden af den engelske radar (**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging) var da over 1 m. I 1939 opfandt amerikanerne W. C. Hahn, George Forrest Metcalf, R. H. Varian, S. F. Varian refleksklystronen. I 1939/40 opfandt englænderne J. T. Randall og Henry Albert Howald Boot i en gruppe under ledelse af M. L. Oliphant på Birmingham University i England, hulrumsmagnetronen. Den blev videreudviklet især i Telecommunications Research Establishment i Malvern.

Hermed er vi fremme ved den opfindelse, som er afgørende for mikrobølgeovnen, idet mikrobølgerne i husholdningsovn frembringes af en hulrumsmagnetron (i industrianlæg ofte ved hjælp af klystroner, med en længere bølgelængde for at få større indtrængningsdybde). Tyskerne havde også før anden verdenskrig udviklet en radartype med gnistsendere og noget længere bølgelængde (decimeterbølger) end de få cm, man anvender med magnetronen. De havde såvel landbaseret radar (langtrækkende) som flyvende radar (f.eks. på deres natjagere, rækkevidde ca. 1 km) under 2. verdenskrig. Før 2. verdenskrig sendte de luftskibet Hindenburg på et spiontogt rundt om England. Der blev målt i decimeterbølgeområdet, for at undersøge om englænderne havde radar. Konklusionen var, at det havde de ikke, idet tyskerne ikke forestillede sig, at der kunne anvende så lange bølgelængder, som englænderne faktisk gjorde. Det bør tilføjes, at englænderne i 1940 havde den første operative kortbølgeradar. Videoreudviklingen af magnetronen skete især i Amerika, idet englænderne sendte magnetronen over Atlanten som en modydelse i en aftale om hjælp fra USA (låne-og lejeloven). Englænderen R. Kompfner i 1943 opfandt et andet mikrobølgerør, vandrebølgerøret (patent 1946). Det første

radarekko fra månen blev set i 1948 af John Bardeen, USA.

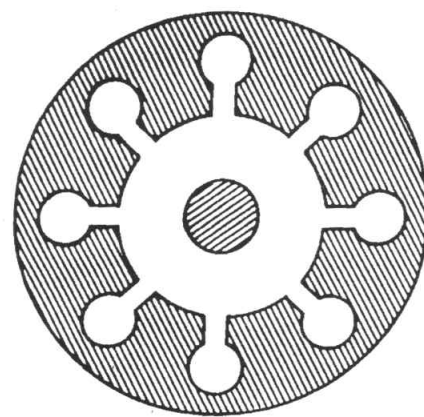
At mikrobølger kan anvendes til opvarmning blev opdaget flere steder. Et af stederne var på magnetronfirmaet Raytheon Manufacturing Compagny (Massachusetts) af Dr. Percy L. Spencer. Spencer fik ideen, da en chokoladestang smeltede i hans lomme under magnetronforsøg. Han lavede den første mikrobølgeovn af en mælkekande af metal, hvor han skar hul til magnetronen. Låget blev anvendt som ovndør. Ideen blev senere videreudviklet, og de første ovne til højfrekvens blev taget i brug i store køkkener i 1947. Dette skete specielt i Sverige og USA.

Demonstration 1, »Hertz forsøg«

Se Figur 3. Senderen, der opstilles, er en Hertz-dipol, hvor grenene er 4-5 mm tråd/rør af kobber eller messing 50 - 75 cm lange (1 - 1,5 m ialt). Imellem inderenderne af stængerne laves et gnistgab på ca. 1 mm. Den strømforsynes fra et kraftigt induktionsapparat. På ledningerne fra induktionsapparatet laves luftspoler ved at vikle ledningerne op om en træblyant som form lige før senderen, så der er ca. 10 vindinger, der fungerer som spærrekreds. Modtageren er et par tilsvarende antenner og spærrespoler.

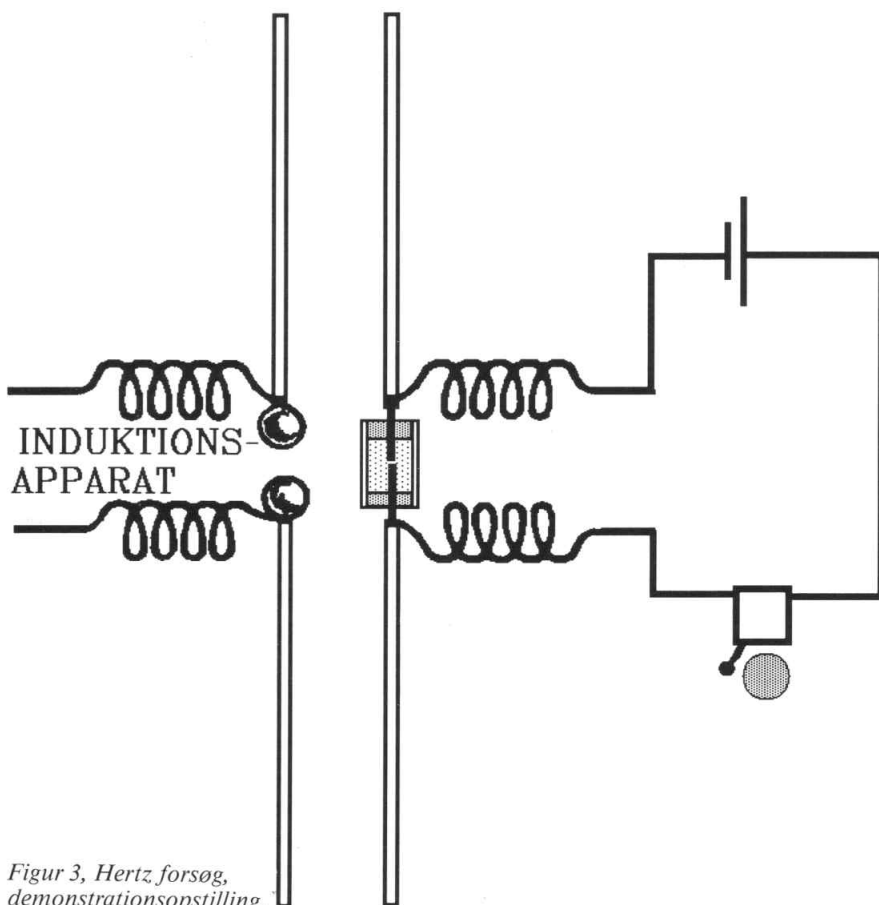
Imellem enderne i modtageren er der en såkaldt kohære, der virker som detektor. Kohæren udformes her som et lille glasrør med korkprop i begge ender. Igennem propperne (eller igennem den ene) stikkes et par kobberledninger uden lak, så de er få mm fra hinanden. Der fyldes nikkelstøv (filspåner fra nikkel) i røret til ledningerne befinder sig inde i nikkelstøvet. Denne modtager forbindes i en seriekreds bestående af modtagerenheden, et ringeapparat og et batteri, samt et par hjemmelavede spoler som før. Modtageren stilles som start ca. 1 m fra senderen (eller nærmere). Det kan være nødvendigt at ændre ledningslængde på dipolen for at opnå resonans. Når der modtages elektromagnetiske bølger, begynder apparatet at ringe. Rystes kohæren stoppes ringningen. Skal dette automatiseres, kan ringeapparatet ryste kohæren. Senderen har en rækkevidde på ca. 1-5 m. Kohæren virker som detektor, idet det tynde iltlag på spånerne bliver brændt punktvis igennem af højfrekvensfeltet i berøringspunkterne imellem nikkelkornene. Disse afbrændte punkter tillader så jævnstrøm at løbe i pulveret. Når pulveret så rystes, flyttes kontaktpunkterne fra hinanden. Den blev opfundet og brugt til at beskytte datidens telegrafer, som jo havde luftledning, ved lynnedslag. Ved at forbinde kohæren til luftledningen og jord afledes transiensen fra fjerne lynnedslag.

HULRUMSMAGNETRONENS INDRETNING



Figur 4, Hulrumsmagnetron, snit.

På figur 4 ses et principdiagram for en magnetron. I midten har man katoden, som afgiver elektroner. Yderbeholderen med hulrummene er anoden, som har en positiv spænding, V_a , i forhold til katoden (fra 500 til ca. 20 000 V). Dette giver et elektrisk felt E_r imellem anoden og katoden.



Figur 3, Hertz forsøg, demonstrationsopstilling.

Langs akse er der et homogent magnetfelt, B_0 , vinkelret på det elektriske felt (ind i eller ud fra papirets plan). Dette er normalt fremkaldt af permanente magneter (idag som oftest to alnicomagneter, returfluxen går idag igennem ophængsbeslaget). Elektronen, der frigøres fra katoden, tilføres energi, idet de vil blive accelereret over imod anoden af det elektriske felt. Elektronen påvirkes så af Lorentzkraften fra magnetfeltet, som vil afbøje den i en cirkelbane i mellemrummet imellem anode og katode.

I ydersiden af magnetronen er der en række hulrum. Dette er i virkeligheden resonatorer (de kan svinge elektromagnetisk svarende til en flaske, som man blæser hen over, og som så kan svinge akustisk). Når elektronerne kommer forbi en resonator, kan de eventuelt bremses eller accelereres af feltet ved hulrumsresonatoren. Bremses elektronen afgiver den energi til svingningen i hulrumsresonatoren, accelereres den tager den energi fra denne. Geometri og resonatorer bestemmer altså frekvensen magnetronen svinger på.

Energien tages ud af magnetronen ved at anbringe en lille antenne eller en spole med 1 vinding (en »transformator«) i en af resonatorerne. I radaranlæg arbejder magnetroner som oftest i pulser, hvor der leveres stor effekt, og hvor røret arbejder i f.eks. 1/1000 sek eller mindre. Magnetronen står stille til den næste puls skal udsendes. Man taler så om den afgivne middeleffekt, dvs. energien der afgives i et langt tidsrum (mange pulser) divideret med tidsrummet. Desuden taler man om spidsværdien dvs. effekten i pulsen. Denne sidste kan i radaranlæg være f.eks. 25 kW eller 200 kW eller mere. Middeleffekten for den amerikanske radar i Thule var i 1975 omkring 600 kW. Neonrør lyser op ved ca. 0,006 W/cm², og kan bruges som feltindikatorer. Det samme kan lavenergilystofrør eller -pærer (uden for meget metal påmonteret). For mikrobølgeovne til hjemmebrug ligger de typiske middeleffekter til ovnrummet på 400 - 800 W, men der findes også ovne på 1,5 og 2 kW. Industrioovne kan have effekter i 100 kW-området.

MIKROBØLGEOVNEN

Lidt historie

- 1945 Spencer m.fl. opfinder mikrobølgeopvarmning.
- 1947 Spencer bruger som den første 2,45 GHz til opvarmning.
- 1949 Stiefel anvender mikrobølger

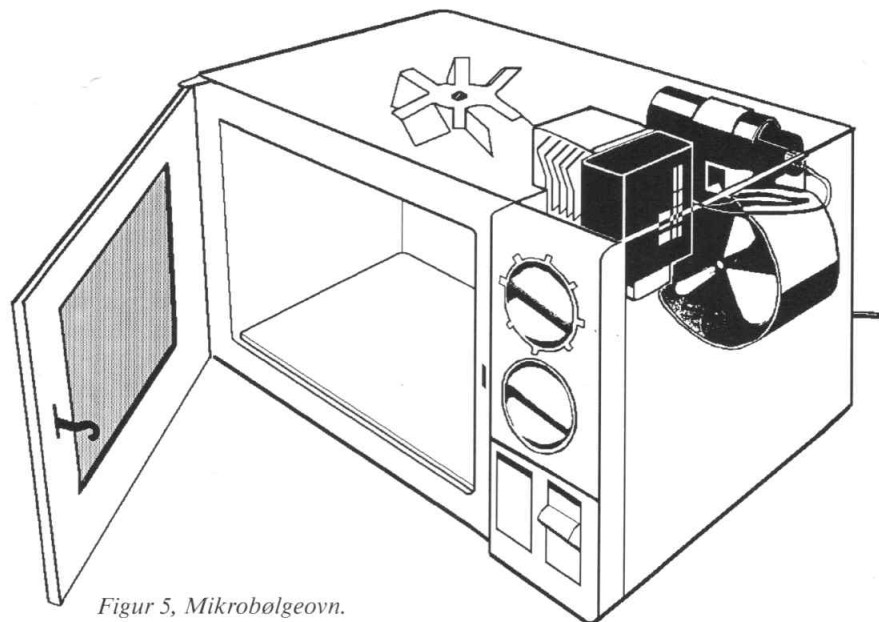
til madopvarmning.

- 1950 Gross tager patent på mikrobølger til kogning (første rigtige ovn).
- 1950 Gross og Hall foreslår flere forbedrede ovndørkonstruktioner.
- 1952 Gross og Hall foreslår en effektfordeler (metalmølle, se senere).
- 1955 Gross og Hall får en række patenter vedrørende mikrobølgeovne, 1952-55.
- 1958 Praktisk og teoretisk design af til optimale ovnrum, form mm.
- 1968

1976 Japanerne førende i ovndesign og dele.

1978 Oguro (Japan) designer letvægts-magnetronen.

I 1978 er japanerne producenter af 90% af magnetronerne til mikrobølgeovne. Produktionen er i 1980 på $4,5 \cdot 10^6$ magnetroner pr. år. Nu er der på verdensplan ca. 50 000 000 mikrobølgeovne i brug. Af lister med producenter af magnetroner til mindre mikrobølgeovne (330-1600 W) med magnetrontyper er der 20 japaniske storproducenter og 3-5 andre lande repræsenteret.



Figur 5, Mikrobølgeovn.

KONSTRUKTION AF MIKROBØLGEOVNEN

Ovn, se figur 5, består af en kasse af metal med en dør i den ene side. Metal reflekterer de elektromagnetiske bølger, og ovnkassens formål er at sikre, at mikrobølgerne ikke kommer ud i omgivelserne og at give maksimal amplitude i den stående bølge i de midterste dele af ovnrummet (rimelig økonomi). I dørvinduet er der anbragt et net, som har samme funktion. Bølgerne kan ikke gå igennem huller, der er meget mindre end deres bølgelængde, se forsøg 11 og B8. Ovnrummet er derfor helt lukket og døren som oftest tætnet med metal-metal-kontakt eller zig-zag-spalte, så mikrobølgerne ikke kan komme ud igennem sprækken. Der er monteret sikkerhedsafbrydere mm., så ovnen kun kan tændes, når ovndøren er lukket. Man må ikke ændre på ovnen og dens sikkerhedsanordninger.

I den ene side er der et betjeningspanel med et ur, en knap til regulering af middeleffekten, afbrydere mm. Bag dette panel sidder magnetronen. I de

fleste ovne er magnetronen beskyttet imod overbelastning. Den bliver for varm, hvis den ikke kan slippe af med energien. En termosikring slukker så automatisk. Magnetronen sender bølgerne ind igennem et rør (en bølgeleder), som normalt går ind i toppen af ovnen. Magnetronen køles af en blæser. Luften fra denne fortsætter forbi energifordeleren, igennem ovnen og ud. Den fjerner derved vanddamp. I toppen af ovnen sidder energifordeleren, der idag normalt er en aluminiumspropel. Den drives rundt af luftstrømmen fra blæseren. Mikrobølgen sendes ind imod dennes vinger, så bølgen fordeles på forskellige måder i ovnen efter vingens rotation. Derved sikres det, at energien fordeles nogenlunde jævnt. Når bølgerne sendes ind i ovnen, reflekteres de fra metalfladerne og danner stående bølger i ovnen i forskellige mønstre afhængigt af propellens stilling. Ved computerberegninger kan man finde mere end 2000 stående mikrobølgemønstre i en almindelig mikrobølgeovn, afhængig af propellens stilling. Man sætter også ofte det, der

skal opvarmes, på en roterende platform inde i ovnen for at opnå mere ensartet energifordeling. Kombinationen af de to energifordelingsmetoder er en bedre løsning. Timeren bestemmer, hvor længe der er højspænding på magnetronen, f.eks. fra få sekunder til $\frac{1}{2}$ time. Knappen som regulerer, hvor mange procent middeleenergi der afsættes, slår højspændingen fra og til. Det sker normalt ved hjælp af en elektronisk afbryder på primærsiden af højspændingstransformatoren. Der er tændt for mikrobølgen i en kortere eller længere del af tiden, f.eks. 25%, 50%, 75% eller 100%. Varmer man 5 min. med 50% vil ovnen f.eks. være slået til på maksimumeffekt de første 30 sek, slået fra de næste 30 sek osv., til der er gået 5 min. Som tommelfingerregel skal man ved fremstilling af måltider på 1 kg generelt regne med ca. 8 min opvarmningstid ved 100% med 700-800 W nytteeffekt (dvs. den effekt som afsættes på emner i ovnrummet eller fra et fysisk synspunkt effekttabet i ovnrummet). Det er ca. 2 min. pr. portion ved færdigmåltider. Mange ovne drives med enkeltensrettet vekselstrøm, så magnetronen svinger rent faktisk kun halvdelen af tiden, men røret giver i arbejdsperioderne mere end dobbelt så meget effekt som middeleffekten.

Magnetronerne i husholdningsmikrobølgeovn har en frekvens på 2.450 GHz med en usikkerhed på 50 MHz. Det kræves internationalt, at spredt udstråling udenfor ovnen skal være mindre end 1 mW/cm^2 , når ovnen er ny og ikke over 5 mW/cm^2 noget sted 5 cm fra overfladen, når den er brugt. Fra bølgeligningen og Maxwells ligninger fås:

$$\lambda \cdot f = c$$

og for dielektrika

$$\lambda_{\text{diel}} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{\text{relativ}}}}$$

hvor c er lyshastigheden, som er defineret til $299\,792\,458 \text{ m/s}$. Ved at bruge magnetronfrekvensen fås ved indsættelse, at bølgelængden af mikrobølgen i luft er på $\lambda = 12,24 \text{ cm}$.

MIKROBØLGER I DIELEKTRIKA

I vand bliver den principielle bølgelængde af mikrobølgerne knap 9 gange mindre (eller her ca. $1,4 \text{ cm}$) end i luft, idet den relative dielektricitetskonstant $\epsilon_{\text{relativ}} = 81$ for vand.

Frekvensen er uændret og bølgelængden ændres ifølge Maxwells ligninger.

Dielektricitetskonstanten for vand er ved DC-felter ca. 81 (0 Hz), hvilket den også er ved lave frekvenser, se også figur 7. Den falder med stigende frekvens. Brydningsforholdet for vand i synligt lys er ca. 1,33, hvilket giver en dielektricitetskonstant som er ca. $1,77$ ved ca. $5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ (synligt lys). Anbringes et dielektrikum i en kapacitor, og lægges der en vekselspænding over kondensatoren med den karakteristiske tidskonstant:

$$\tau = \frac{4\pi\eta a^3}{kT}$$

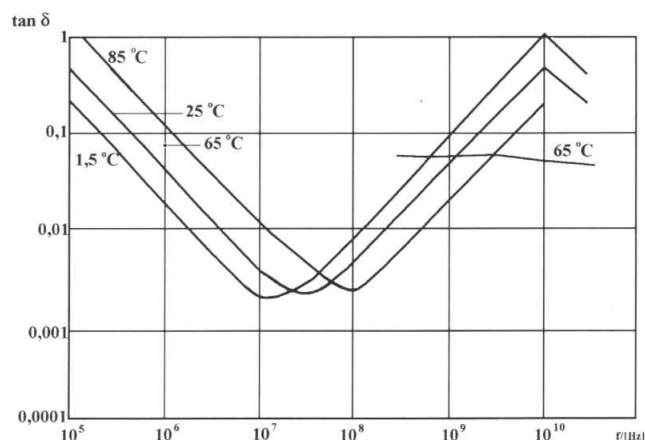
vil strømmen, der går igennem kapacitoren kunne deles i to komponenter, en (måske meget lille) der er i fase med spændingen, en »ohmsk« strøm som giver anledning til tab (*tabsstrøm*), og en strøm 90° forud for spændingen, en »kapacitiv« strøm (*opladningsstrøm* for kondensatoren). Tabsvinklen δ defineres ved

$$\tan \delta = \frac{\text{tabsstrøm}}{\text{opladningsstrøm}}$$

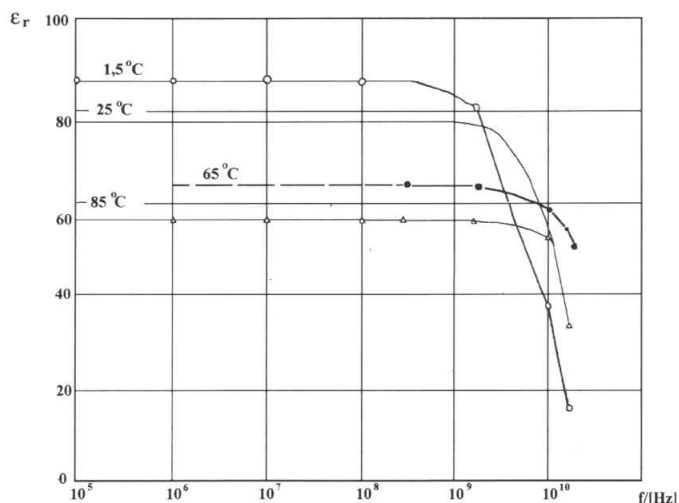
Den del af strømmen, som er ohmsk, vil give anledning til et tab, som er $P = U \cdot I_{\text{ohmsk}}$. Dette kan altså skrives som

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \tan \delta$$

idet ω er vinkelfrekvensen for strømmen (her ca. $1,5 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$) og C er kapaciteten af den kapacitor, dielektrikumet sidder i, og dens størrelse er proportional med den relative dielektricitetskonstant, $\epsilon_{\text{relativ}}$. Størrelsen $\epsilon_{\text{relativ}} \cdot \tan \delta$ er således fysisk set et mål for tabets størrelse ved en given frekvens, dvs. den mikrobølgeeffekt der afsættes i de fødeemner, der er i ovnrummet. Set fra en brugers synspunkt, er det nytteeffekten. Dvs. ved konstante størrelser for materialeegenskaberne iøvrigt vokser tabet proportionalt med frekvensen. I databog i fysik og kemi 1992 udgaven findes en oversigt for vand på side 171. På kurverne figur 6 og figur 7 ses



Figur 6, Tab, $\tan \delta$ som funktion af frekvens og temperatur for vand.



Figur 7, Dielektricitetskonstanten for vand som funktion af frekvens og temperatur.

vands dielektricitetskonstant og $\tan\delta$ som funktion af frekvensen. Hvornår er tabet mindst henholdsvis størst?

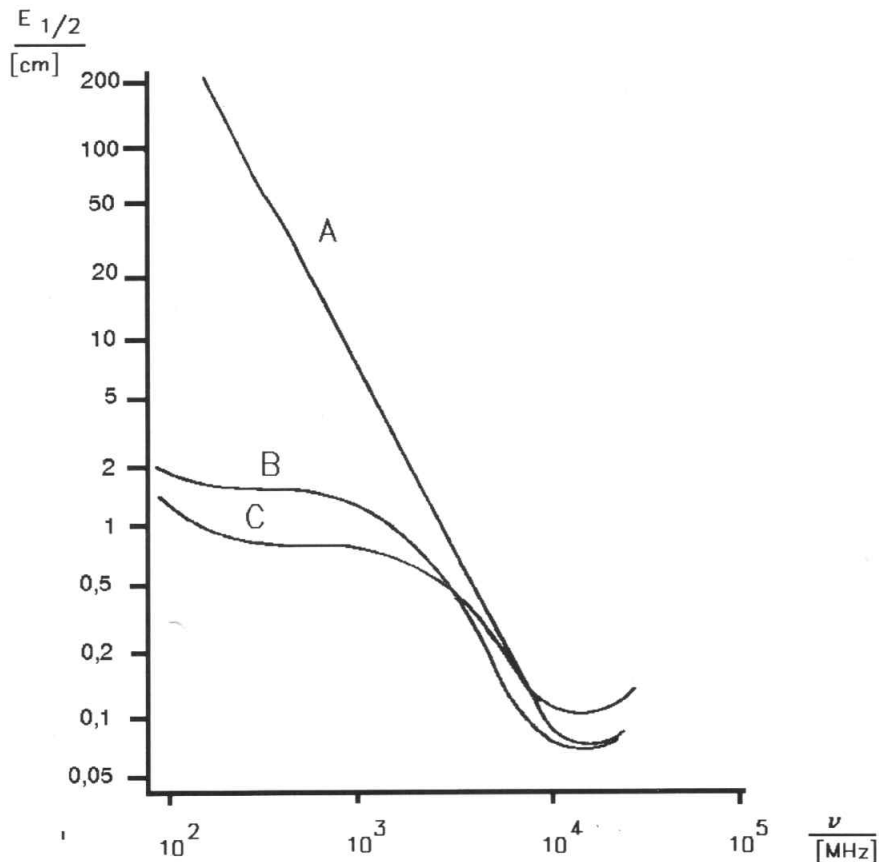
Når man vælger frekvens til en mikrobølgeovn, er man ikke interesseret i størst eller mindst mulige tab, men en balance mellem tab, dvs. udnyttelse af mikrobølgeenergien, og indtrængningsdybde, se figur 8. Man er ikke interesseret i kun at varme madden i overfladen, som det sker på en stegepande. Mikrobølgerne varmer stoffet op ved at sætte molekylerne eller atomer/atomgrupper i stoffet i svingninger. Energien af mikrobølgekvanterne er:

$$E = h \cdot f = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 2,450 \cdot 10^9 \text{ J} \\ = 1,62 \cdot 10^{-24} \text{ J} = 1,01 \cdot 10^{-5} \text{ eV.}$$

Disse små energier kan anslå rotationsfrihedsgrader i molekylerne. Ionisation sker først omkring 10^{14} Hz eller ved 100 000 gange højere frekvens og dermed energi.

Ved tilstrækkeligt høje frekvenser vil gnidningen i væsken (vand) imod ioner, molekylsvingninger o.s.v. gøre sig gældende og give et energitab ved at bremse disse molekyler. Dielektricitetskonstanten vil så falde.

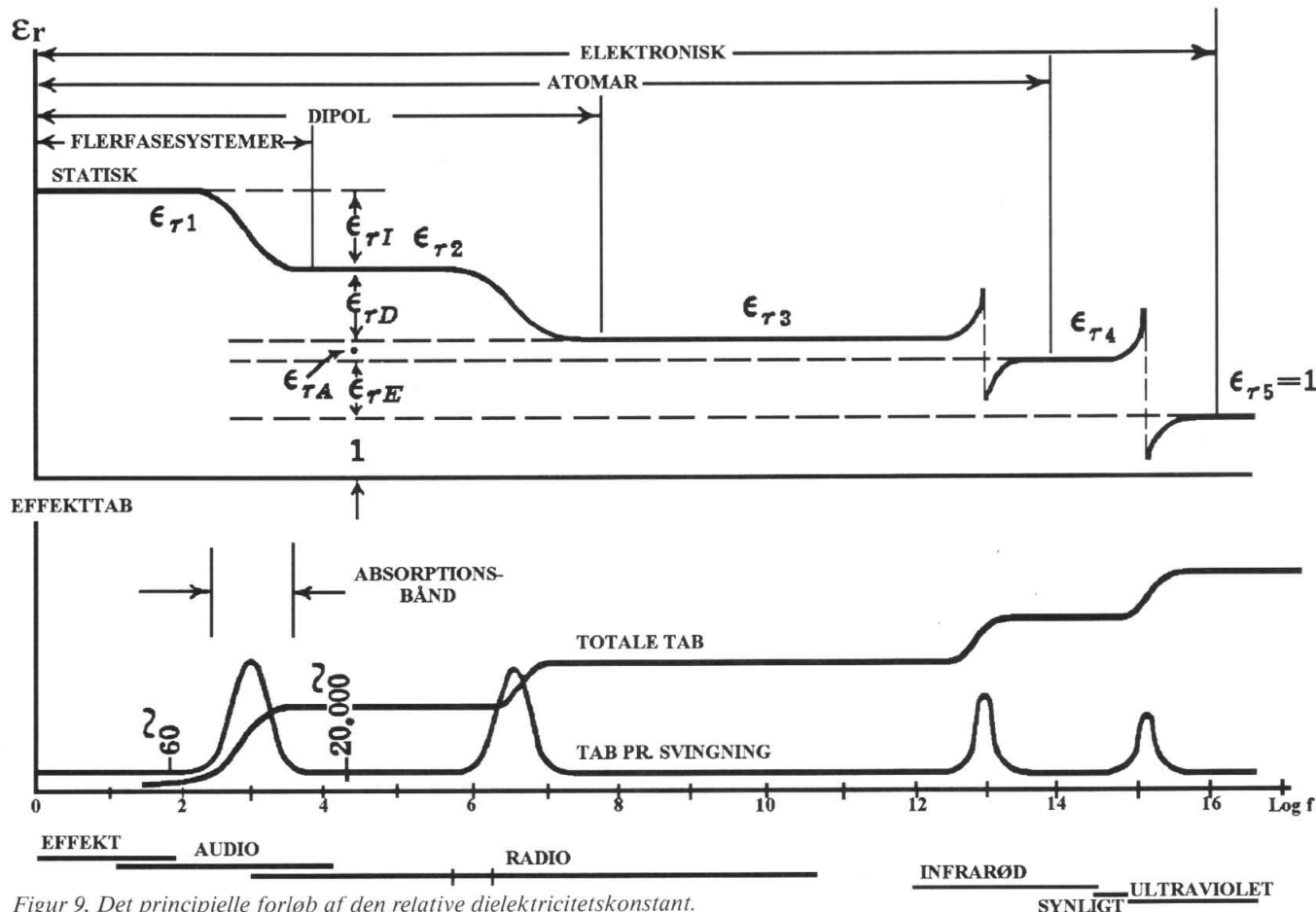
Det karakteristiske tidsforløb hvor dette sker kan beskrives som relaxationstiden, τ , se formel ovenfor. Figur 9 viser at der er kraftig absorption ved



Figur 8, Indtrængningsdybden som funktion af frekvensen i A) Vand, B) 0,1 N opløsning af NaCl ved 25°C, C) 0,1 N opløsning af NaCl ved 66°C.

frekvenser der findes som $1/\tau$. Tilsvarende forøges tabene når stoffets øvrige relaxationstider nås. Indsættes i formelen for τ med $\eta=0,001$

[Pa · s] som er vands viskositet, T den absolut temperatur (300 K), a en karakteristisk størrelse på molekylet ca. 10^{-10} m. Dette giver relaxationstiden



Figur 9, Det principielle forløb af den relative dielektricitetskonstant.

$\tau = 3 \cdot 10^{-10}$ sek. eller en frekvens på $f = 3,3$ GHz. Ved højere frekvenser vil svingninger i molekylerne dæmpes, senere vil atomerne ikke kunne følge med, og til sidst vil elektronerne heller ikke kunne følge med (lysfrekvenser). Hver gang gnidning (tab) stopper en svingning falder dielektricitetskonstanten. Se og diskuter den principielle figur 9. Det ses af figur 7, at den relative dielektricitetskonstant ved 2,5 GHz er sidst i 70-erne. Skitser en graf over absorptionen, som funktion af frekvensen i det område kurverne dækker. Vand, HOH gruppen, kan svinge med små tab op til frekvenser på ca. $5 \cdot 10^8$ Hz (se graf fig 6). Over denne frekvens begynder tabene i form af gnidningstab. Kurverne figur 8, viser indtrængningsdybden i vand, idet de beskriver, hvor dybt man skal ind for at have den halve effekt. Figuren viser de tilsvarende kurver for vand med NaCl ved to temperaturer. Absorptionen går igennem et maksimum (absorptionsbånd), som hænger sammen med relaxationstiden ved $\nu = 1/\tau$. Dette maksimum er specifikt for en given dipol, i et givet medium. For vand er dette i området 0,61 - 3,37 cm ($5 \cdot 10^{10}$ - $9 \cdot 10^9$ Hz), se forsøg B12, når temperaturen aftager fra 75° til 0° C. Der er minimale tab for vand i frekvensområdet 10^7 - 10^8 Hz (30 m - 3 m bølgelængde), stigende ret skarpt imod 2 cm svarende til 10^{10} Hz.

Man kan også få fremkaldt varme i ledende materialer ved at inducere hvirvelstrømme, som giver opvarmning jævnfør joules lov $P = R \cdot I^2$. Dette kan bevirke, at skåle, tallerkner med guld, metalting mm., bliver varme. Det udnyttes i specielle stegefade, som kan købes til mikrobølgeovne, og som har en rimelig stor elektrisk ledningsevne.

Næringsmidler

Da normale næringsmidler indeholder fra 60 - 98 % vand, kan der effektivt afsættes energi. Det betyder i praksis, at mikrobølgerne stoppes i overfladen af maden. Karakteristisk halveringsdybde for effektafsættelsen er 2 cm, se figur 8. Opvarmning længere inde sker ved varmeledning. At det i ikke ringe grad er vandet i produktet, der er ansvarlig for opvarmningen, betyder, at helt tørre produkter er svære at opvarme. Frosset vand, is, er derimod gennemtrængelig for mikrobølger (energihalveringstykkelse 15-20 m), fordi molekylerne sidder ret fast, og derfor absorberer dårligt. Det betyder, at frosne produkter varmes langsomt, men helt ensartet op,

da mikrobølgefluxen er ret ensartet. I samme øjeblik noget smelter, f.eks. at der kommer der vand på overfladen. øges tabene kraftigt, der hvor vandet er. Isblokken smelter udefra. Sættes magnetronens driftprocent ned til ca. 25%, kan denne overfaldesmelting undgås, idet der sker udligning af temperaturen ved varmeledning, som er en langsom proces. (Tænk på forskellen i tid når man dypper en kobberstang i varmt vand, inden den bliver for varm til at holde på, og når man stikker den i stikkontakten inden man får stød). En frosset blok kan smeltes og senere varmes i en arbejds-gang. Der vil være store forskelle på dielektrikas tab i afhængighed af frekvens og dielektrikaets art. F.eks. giver glimmer og pyrexglas kun meget små tab. Væsker som paraffin, voks, benzen, carbon tetraklorid og carbon dioxid er eksempler på ikke polariserbare substanser, se forsøg B9-B11.

Proteiner, som er store molekyler, udviser normalt også rimelig stor dielektricitetskonstant. Energooverførsel kan altså ske ved ohmske tab, dielektriske effekter eller polarisations-effekter. De tre effekter har maksimum forskellige steder og har forskellig betydning ved forskellige frekvenser. Opvarmningen af større legemer afhænger af mikrobølgernes indtrængning i stoffet. Generelt forøges indtrængningsdybden med aftagende frekvens. Næsten 100 % af mikrobølgeenergien der sendes ind imod mademner absorberes (ingen refleksion), hvorimod der er høj refleksion fra metaller.

Indtrængningsdybde

Effekten som funktion af dybden kan skrives $P = P_0 \cdot e^{-2\alpha d}$. Her er P_0 den indkomne effekt, P effekten i dybden d og α attenuationsfaktoren, der er en konstant afhængig af stof, tilstandsform, temperatur og frekvens. Tages den naturlige logaritme på begge sider for indtrængningsdybden fås: $d = 1/2\alpha$. Man udtrykker bedst indtrængningen som halveringsdybden. Her sættes $P/P_0 = 1/2$, og ved indsættelse fås $d = \ln 2 / 2\alpha = 1/2,885\alpha$. (Mange bøger angiver indtrængningsdybden, som den dybde, hvor effekten er faldet til $1/e$. Det er ca. 37%, og giver $d = 1/2\alpha$, se også figur 8).

Anvendelige materialer.

Det anbefales at anvende pyrexglas eller plastikbægre (isolerede drikkebægre af polystyren) ved forsøg med væsker i mikrobølgeovn. De specielle

plastbeholdere til mikrobølgeopvarmning af mad har også lave tab. For pyrexglas eller Vycorglas er absorptionen ca. 0,9 W/kg, for porcelæn ca. 4-8 W/kg. Plastiktyper som methylpentene (stabil til 235° C), polycarbonat (stabil over for alkalier og aromatiske forbindelser) og lineær polyethylen har gode dielektriske egenskaber. Til forsøg på undervisningsbasis er polystyren og papir/pap godt, idet det enten kan formes eller fås i bægerform, som er meget anvendelig til forsøg. En lang række meget dyre forbindelser som polyester, epoxi, teflon (polytetrafluoroethylene) og siliconeplastik er også velegnede, men de er kommercielt for bekostelige. Alle materialer med guldkanter og ledende glasur eller påmaling bør undgås, undtagen til forsøg over disse effekter. En række materialer baseret på ferritter kan anvendes til absorption af mikrobølger. De kan legeres, så de ophører med at absorbere ved en given temperatur. De kan virke som »termostatfader«. Dette gælder en legering, som kaldes Heuslers legering (mangan, tin, kobber, eller mangan, aluminium og kobber). De stabiliseres ved Curiepunktet (hvor legeringen bliver ikke-magnetisk), f.eks. ved 150° C, men kan designes i området 60 - 538 ° C. til f.eks. stegning, ristning m.v. Tilsvarende kan man stege i elektrisk ledende glas op til 250° C.

BIOLOGISKE VIRKNINGER

En vigtig del af opvarmningsfunktionen i al mad at dræbe mikroorganismer. Mikroorganismer er overalt, i fødevarer og på spisebestik, tallerkner mm. Med mikrobølger er der i princippet visse problemer:

- 1) Organismer på metalvæggene i ovnen eller på beholdere (som ikke bør være af metal) bliver ikke opvarmet, dvs. deres antal reduceres ikke.
- 2) Opvarmning af mikrobølgekar og fader kan være meget lille, så mikroorganismerne bliver ikke meget reduceret i antal.
- 3) Bakteriesporer, er mere resistente over for opvarmning end bakterierne selv og vil ofte ikke blive destrueret.
- 4) På grund af stående bølger, mikrobølgens polarisering mm., kan der være områder, der varmes mindre, hvor mikroorganismerne ikke destrueres (energifordeleren råder til dels bod på dette forhold).

Ved normal stegning kan overfladerne normalt anses for steriliseret, når temperaturen er over 121 °C. Dette gør ikke det indre af fødevarerne sterile. Det viser sig, at mikrobølger

til en vis grad er i stand til at destruere de komplicerede molekyler i levende organismer ved påvirkningerne fra det elektriske felt, (såkaldt dielektrisk opvarmning) dvs. ikke ved en simpel opvarmning. I modsat fald ville mikrobølgers anvendelse til opvarmning af fødevarer hurtigt blive afsluttet på grund af sundhedsrisikoen. Små celleprøver anbragt i mikrobølgefelter fra en sender (ca. 7 mikrowatt bestrålingseffekt indstrålet i et lukket metalsystem) viser, at celleprøverne ikke døde, men at de ikke kan formere sig ved celledeling, når de var under bestråling. Cellevæksten blev hæmmet. Undersøgelser af den korte opvarmningstid på madprøver viser, at de mikroorganismer i føden, som blev opvarmet i 4-5 min., blev reduceret med 2/3, mens konventionel kogning kun destruerede kun 1/3 af organismerne.

Den korte kogetid har i alle tilfælde den fordel, at en række værdifulde stoffer ikke så let ødelægges eller udledes af fødevarer, herunder en række vitaminer. Denne påvirkning af komplicerede molekyler betyder på den anden side, at det ikke kan afvises, at mikrobølgerne påvirker komplicerede smags- og lugtstoffer i maden (akkurat som stegning og kogning også gør det på andre måder). Kvanteenergien for mikrobølger er meget lav (se tidligere). Ionisation fremkaldes først af stråling i det synlige område eller endnu kortere bølglængder dvs. mindst ca. 100 000 gange højere frekvenser. Mikrobølger kan derfor næppe fremkalde skader ved ionisering som røntgenstråling, UV-stråling og γ -stråling. For mikrobølger er absorptionstværsnittet for et menneske som helhed ca. 50% af den dosis, der måles med fysisk energimåleudstyr. Et meget følsomt organ for mikrobølger er øjet. Minutters bestråling ved nogle hundreder milliwatt pr. cm^2 kan bevirke mindre gennemsigtighed i øjet i et par uger. Dette skyldes linsens fokuserende virkning kombineret med lille blodgennemstrømning og dårlige varmeledningsevne.

MIKROBØLGEOPVARMNING, INDUSTRIELLE FORMÅL.

Mikrobølger fra magnetroner (og til dels klystroner) anvendes til mange andre opvarmningsformål, helt bortset fra mikrobølgers anvendelse til radar (som er under stadig udvikling). Der er ofte meget store energier til rådighed (150 - 240 kW). Den industri-

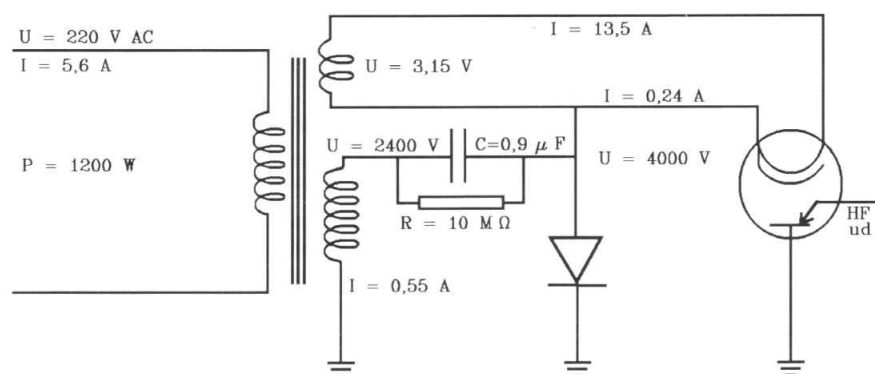
elle procestid kan i mange tilfælde nedsættes med en faktor 10, fordi varmen afleveres direkte i produktet og ikke skal ind ved varmeledning. Dette giver ofte forbedret kvalitet. For andre produkter er der simpelthen ikke tilsvarende processer, som kan anvendes uden at beskadige varen. Specielt smeltning af store partier frosset mad (tilberedning af portioner og pakninger), eller opvarmning til nær frysepunktet, hvor man kan behandle produktet, er en proces som er egnet for mikrobølger, idet hele portionen smeltes på en gang og hurtigt. De anlæg som mikrobølgerne anvendes i, er ofte mere kompakte end de gammeldags anlæg, og for f.eks. pasta kan store mængder i flere lag tørres på en gang (1,5 timers tørretid imod 8 timer, 8,2 m maskinstørrelse imod 14,6 m maskine, 20 - 25 % mindre energi).

Tilsvarende er procestiden ved fremstilling af Frankfurterpølse skåret ned fra 90 min. til 2 min. (produktion ved denne metode årligt ca. $1 \cdot 10^9$ kg). Mikrobølger anvendes naturligvis i storkøkkener, hvor der skal varmes mange portioner mad, det kan gøres kontinuert »på samleband«. Derudover kan nævnes anvendelse i tørringsanlæg, det være sig frysetørringsanlæg eller vacuumtørringsanlæg (produkter som tørrede krydderier, rejer, fisk, bær, frugter, svampe mm.), i mejerier til pasteurisering af yoghurt mm., til brød (langtidsholdbarhed efter pasteurisering), til sterilisation af langtidsholdbar mælk og

behandle (op til 50%) større portioner, er mindre energikrævende (besparelse op til 50 %), hurtigere (op til 90% tidsbesparelse), mere gennemtrængende og mere styrbare. Metoden stiller mindre ventilationskrav (ikke så meget spildevarme), og er mere skånsom ved en række produkter, idet den ikke nedbryder så mange værdifulde stoffer. Ulemperne er i hovedsagen større anskaffelsespris, samt at systemerne skal vedligeholdes grundigt, hvis der ikke skal være alvorlige risici.

NYTTEVIRKNING AF MIKROBØLGEOVNEN

Nyttevirkningen af magnetronen dvs. energien i mikrobølgefeltet i ovnen divideret med den energi der optages fra nettet, er som regel ca. 50 %; dvs. optager ovnen 1200 W er der ca. 600 W til rådighed. Almindelige ovne har lavere nyttevirkning, da de opvarmer gryder, vægge, plader osv. (ca. 15-25%). I den anvendte ovn (Moulinex 1505 E) er forbrugseffekten fra nettet ca. 1200 W, spændingen på magnetronen er ca. 4000 V, strømmen til anoden er ca. 0,24 A, spændingen fra den indbyggede transformator, som har en effektivværdi på 2400 V, ensrettes og udglattes med en kondensator på 0,9 F og giver derved spidsværdien $2400 \cdot \sqrt{2}$ volt = 3394 V (se diagram figur 10). Tabet er bl.a.



Figur 10, Det normalt anvendte elektriske kredsløb i en mikrobølgeovn.

af færdigmåltider, i serieproduktion inden for bageindustrien (brød, kager mm.), til ristning af præparater som nødder, kaffebønner, kakaobønner, til blanchering af majs, kartofler og frugt samt til smeltning af fedt og talg. Mikrobølger anvendes også en del i den kemiske industri, gummiindustrien (vulkanisering) og olieindustrien. Det skønnes, at der i 1984 var 6 - 8 millioner industrielle anlæg i drift, og der solgtes over 1 million pr. år. De er altså mindre pladskrævende, kan

opvarmningen af glødetråden, som kræver 3,15 V, 13,5 A. Dette er ca. 43 W. Resten af tabet er til lys i ovnen (ca. 15 W) og især til opvarmningen af magnetronen (som tidligere nævnt er den blæserkølet, for at bortskaffe varmen fra anodetabet) og energien til blæseren. Kapacitoren aflades af en 10 Mohm modstand. Bemærk, at det tager nogen tid efter, at ovnen er slukket, før kondensatorspændingen er ufarlig, knapt 1 min. Hvis modstanden er brændt af, meget længere.

Kapacitoren bør kortsluttes under betryggende omstændigheder, hvis ovnen åbnes. Som det ses, vil der ikke være spænding over magnetronen i den positive halvperiode, så magnetronen sender kun 1/100 sek med en pause på 1/100 sek.

I bunden af ovnen er der normalt en ret tyk glasplade. Denne tjener til at forhindre, at det der ønskes opvarmet, er for tæt på metalfladen i bunden. Refleksionsbetingelsen for mikrobølger fra en metalflade giver store strømme i fladen, men det elektriske felt på overfladen skal være nul, da det er en leder. Dvs. at fødevarer nær en metalflade varmes kun ved ledning, se forsøg B2. Maksimal opvarmning sker i afstanden $\lambda/4$ fra metalfladerne i ovnen.

Ovnen **bør aldrig startes uden nogen belastning**. Som belastning anvendes vand i ovnrummet. Brug mindst 1 kopfuld vand (ca. 100 ml). Uden absorption i ovnrummet dannes stående bølger, som reflekteres tilbage i magnetronen. Denne kan da beskadiges. Energifordeleren, propellen i toppen af ovnrummet, kan i de fleste ovne stoppes kortvarigt (med et stykke plastik eller træ). Dette bør kun gøres, hvis ovnen har en termisk sikring på magnetronen (ring evt. til importøren). Der bør ikke anbringes større metalgenstande eller aluminiumsfoliestykker i ovnen. Specielt bør skarpe kanter og hjørner undgås nær ovnens metalflader. Høres det under drift, at der opstår gnistudladninger, bør ovnen slukkes og opstillingen rettes.

Pas på: Levende organismer får koaguleret æggehviden i cellerne, hvis de er i ovnen under mikrobølgebestråling. Det vurderes, at effekter på 10^{-6} W/m² er grænseværdien for levende væv. Man må af denne grund ikke lægge ledninger, termoelementer m.v. ind i ovnen, hvis de skal ud igennem en sprække ved døren eller tilsvarende. Det kræver særlige forholdsregler, hvis ledningerne skal føres ind i en mikrobølgeovn, og det frarådes på det kraftigste, hvis der ikke er specialviden på området. Der kan fås specielle termometre, som er beregnet til brug indeni mikrobølgeovne. Enkelte ovne er udstyret med et indbygget termometer.

Tiderne i de følgende forsøg måles med stopur. Vær opmærksom på, at opvarmningen starter kort efter, at ovnen tændes (se forsøgsbeskrivelser, brug tidspunktet, hvor effektmåleren/et amperemeter pludselig stiger henholdsvis falder til start/stop). De anførte tider er for en ca. 650 W ovn.

I alle forsøg skal ovnens bundplade af glas blive i ovnen.

Demonstration 2. Mikrobølgeovnens indretning

Før demonstrationen skal ovnen helst have stået slukket i f.eks. 1/2 time (på grund af kapacitoren. Den bør i alle tilfælde kortsluttes, før noget berøres). Stikket til nettet trækkes ud. Derefter fjernes overkappen på ovnen, og de forskellige komponenter udpeges. Kappen skal monteres med alle skruer, før ovnen igen tilsluttes. Ovnen må under ingen omstændigheder anvendes i åben tilstand både på grund af risikoen ved mikrobølgerne, ved højspændingen, og fordi køleforholdene med den ændrede blæserkøling kan bevirke skader på ovnen.

FORSØG MED MIKROBØLGEOVNEN

Forsøg 1. Undersøgelse af mikrobølgeovnen for utætheder

Modtagerdipolen med detekterdiode fra et 3 cm mikrobølgeanlæg forbindes til den tilhørende audioforstærker, eller til et millivoltmeter. Dipolen føres nu rundt langs en tændt ovns samlinger (vand i ovnen som belastning) og inde under ovnen, idet den holdes med dipolen parallelt med ovnens overflader, ca. 5 cm fra ovnen, og drejes den i de to resterende retninger, så stråling af begge polarisationsretninger vil kunne detekteres. Med passende forstærkning vil man som regel kunne modtage et signal.

Dette sammenlignes med signalet lidt inde i hornet på 3 cm senderen, som for flere mærkers vedkommende giver 10 - 25 mW som udgangseffekt til hornet (slå op i katalog). Man skal gøre sig klart, at denne modtager er i resonans med 3 cm bølger, men ikke med 12 cm bølger. Vil man foretage en bedre sammenligning må dipolgrene forlænges med et par 3 cm lange kobberstænger/tråde på 2-3 mm tykkelse (så halvbølgedipolen bliver 6,1 cm ialt i længde med en diode i midten se fig 11). Man kan så sammenligne signalstyrken med den lange dipol ved mikrobølgeovnen med den tilsvarende med den korte dipol ved 3 cm senderen. Denne sammenligning kan kun give et groft skøn, idet dioden næppe er lineær i hele området, kalibreringen er yderst tvivlsom, men det vil nok kunne give et skøn i den rigtige størrelsesorden på den udstrålede effekt.

Forsøg 2. Måling af mikrobølgeovnens nyttevirkning

På mikrobølgeovnens netledning sættes en energimåler, som kan klare mindst 5 A og 220 V. Dette måler den fra nettet forbrugte effekt P_{ind} . Der sættes et overdækket (glas eller plastlåg) bægerglas med 1000 mL rent vand i ovnen, temperaturen måles, ovnen tændes i ca. $\tau = 120$ sek. Målt med stopur, med ovnen på 100% effekt. Ovnens ur er normalt ikke præcist nok til forsøget. Vandet må ikke komme nær kogepunktet, da man så også skal medregne fordampningsvarme. Temperaturen måles hurtigt efter forsøgets afslutning ved at åbne ovnen og måle temperaturen på normal vis. Den tilførte energi kan nu beregnes, massen af vandet kaldes M , massen af glasset (uden overdækning) kaldes m , den specifikke varmecapacitet af vand kaldes c_{vand} og af glas c_{glas} , starttemperaturen t_1 , sluttemperaturen t_2 . Heraf:

$$E_{modtaget} = (M \cdot c_{vand} + m \cdot c_{glas}) \cdot (t_1 - t_2)$$

Af dette fås

$$\langle P \rangle = E_{modtaget} / \tau.$$

Nyttevirkningen er så:

$$\eta = \frac{\langle P \rangle}{P_{ind}} = \frac{E_{modtaget}}{E_{ind}}$$

Forsøget gentages med 2000 mL i ca. 240 sek. og 500 mL i ca. 60 sek.

Afhænger den afsatte effekt af den anvendte vandmængde? Gentag forsøget med 1000 mL, dobbelt tid og med effektknappen på 50%.

Opvarmningen afhænger lidt af dielektricitetskonstanten. Udfør et forsøg med 2 L vand ved lidt over 0°C og tilfør energi så vandet opvarmes ca. 10 K. Den tilførte energi måles med en energimåler. Gentag forsøget med vand opvarmet til 75 - 80°C og tilfør præcis samme energi. Sammenlign temperaturstigningerne i de to tilfælde.

Forsøg 3. Måling af effektfordelingen i ovnrummet 1

En papplade, der har nogenlunde samme form som bundpladen i ovnen, oversmøres med et lag lim (f.eks. kunstharpikslim), og silicageel (tøremiddel) presses ned i limen. Når det er tørt, holdes pladen ind i vanddamp eller vandtåge, så gelen bliver lyserød (hvis den ikke er det). Pladen lægges i bunden af ovnen, som tændes kortvarigt (der skal være ca. 100 mL vand i et overdækket glas som

»belastning« i ovnen hele tiden). Af-skærm målepladen med en papplade det sted, hvor blæseren blæser luft ind i ovnen. Fotografer eller tegn fordelingen af røde og blå partier på pladen. Gør pladen »rød« igen. Hæv den ca. 3 cm over bunden, og gentag forsøget. Fortsæt opefter til toppen for hver 3 cm. Forsøg at kortlægge steder med maksimal og minimal energiafsætning i ovnen på denne måde.

Kan energifordeleren (propellen) i toppen af ovnen standses kortvarigt (spørg evt. importøren), bør forsøget gentages med stoppet propel, hvorved der fremkommer tydeligere stående bølger i ovnrummet. På den anvendte ovn er toppladen en kunststofplade, som kan tages af indefra, hvorefter der kan slås et par små huller til en pind eller plastikstykke til at stoppe energifordeleren.

Tag pappladen ud og læg et minilysstofrør eller en »slagtet« lavenergi-pære (kun røret) kortvarigt i ovnen og se på lyset. I stedet kan anvendes geislerrør, neonrør etc. uden for mange spidser eller kanter, idet der fremdeles skal være vandbelastning i ovnen.

Forsøg 4. Måling af effektfordelingen i ovnrummet 2

Ca. 15 bægerglas eller isolationsbægre (polystyren) på ca. 50 mL vejes tomme, og derefter fyldes de med vand fra et stort glas, hvor der er foretaget en grundig omrøring og hvis vandtemperatur, t_1 , er målt. Glassene mærkes med et nummer. På ovns bundplade lægges et stykke papir, der passer på denne plade. Glassene stilles nu fordelt på papiret, og placeringen afmærkes på papiret med nummer. Ovnens startes derefter i ca. 3 min. (10-50 K temperaturforøgelse), og der fortsættes som forsøg 2. Temperaturen fra hvert glas noteres, Energitilvæksten i hvert glas beregnes. Dermed kan energiafsætningen som funktion af stedet kortlægges. Sammenlign med resultatet fra forsøg 2. Desuden udregnes den samlede energi, effekten beregnes som i forsøg 2, og resultaterne sammenlignes.

Forsøget kan gentages ved at lave en papbund løftet ved hjælp af et glas eller papstativ. På denne plade placeres bægrene. Man kan også anbringe noget mikrobølgeomæssigt ret neutralt til støtte under bundpladen.

Forsøg 5. Måling af indtrængningsdybde af mikrobølgerne.

En vandsugende oasisklods (let grønt produkt som anvendes til blomster-

dekorationer. Det kan købes i de fleste supermarkeder) ca. 23x11x8 cm skæres i stykker, så man har et stykke ca. 12x11x8 cm. Det sættes i en skål fuld af vand og skal nu »trække« vand op i mindst 1 time, helst mere. Når det er mættet, dryppes det kortvarigt af, temperaturen indeni måles med et tyndt elektronisk termometer. Der lægges nu aluminiumsfolie (køkkenfolie) på de 5 sider, så den udækkede top er 12x11 cm, og det lægges derefter straks i en plastpose, som lukkes med en klemme, en knude eller noget tilsvarende som lukke. Plastposen er nødvendig for at hindre fordampning. Systemet opvarmes i 2-3 min. i mikrobølgeovnen med den udækkede side opad. Derefter tages den ud og termometeret stikkes ind midt i toppladen af klodsens igennem posen (termoelement fra et elektrisk termometer), og der måles rimeligt tid for hver cm nedad, indtil termometeret er helt inde. Det samme kan gøres fra en sideflade ved at stikke termometeret ind med ca. 1 cm mellemrum (men det tager længere tid). Da der sker en varmefordeling, skal forsøget gennemføres nogenlunde hurtigt. Resultatet plottes såvel på lineært papir som enkeltlogaritmisk papir med temperaturændringen, som funktion af dybden. Hvor langt skal man ind, før man kun får afsat den halve energi af energien i yderlaget? Der sammenlignes med figur 8. Forsøget gentages (nok gerne med et andet stykke oasis) med en klods mættet med koncentreret saltvand.

Forsøget kan naturligvis også gennemføres med f.eks. tyk grød i en cylinderformet plasticdåse med folie udenom (af de typer der kan anvendes til mikrobølgeovne), en roe med folie (diameter større end 8 cm), billigt kød, sirup og vådt sand indelukket i en rimelig stor beholder og med folie på alle sider på nær en. Det skal være substanser, som har lagtykkelser større end 8 cm, adgangsåbningen for mikrobølgestrålingen skal være af samme størrelsesorden som bølgelængden. Materialet skal være dårlig varmeleder, og der må ikke kunne ske strømning.

Forsøg 6. Undersøgelse af den elektriske ledningsevnes betydning for opvarmningen

Temperaturen af to ca. 100 mL glas med destilleret vand måles. De stilles på et papir i ovnrummet, og deres placering afmærkes. De opvarmes ca. 40-60 sek. Temperaturen måles af de to glas hver for sig, og energitilførslen beregnes. Derefter kommer nyt vand i

glassene, igen samme mængde, men i det ene glas kommer ½ en teskefuld kogsalt, der omrøres, temperaturerne måles og forsøget gentages. Temperaturstigningerne sammenlignes med første forsøg. For at se, at saltvandet er ledende, kan ledningsevnen evt. måles med en vekselstrømsmetode (ledningsevne måler fra kemi). Hvilken virkning har den forøgede ledningsevne?

Forsøg 7. Undersøgelse af stofafhængigheden ved mikrobølgeopvarmningen

Der gennemføres forsøg efter opskriften i forsøg 6 med flere stoffer f.eks: Alkohol (sprit), eddikesyre (konc.), glycerol, madolie, paraffinolie og petroleum evt. andre alkaner, hvis specifikke varmekapacitet er kendt. Som belastning anvendes et glas, som hver gang fyldes med 150 mL vand. Desuden stilles på et givet sted et glas på 75 mL, som først fyldes med vand dernæst med de øvrige stoffer efter tur. Der fyldes frisk vand på 150 mL glasset efter hvert forsøg, temperaturer af begge glas måles før og efter opvarmningen. Der varmes i 30 sek. Beregning: da det er svært at tænde nøjagtigt i korte tider p.g.a. opvarmningstiden for magnetronen, og idet der ses bort fra varmekapaciteten af glassene, beregnes den procent af energien der afsættes i 75 mL glasset, se forsøg 1. Den afsatte energi afsat i 150 mL glasset og derpå i 75 mL glasset beregnes. Dernæst beregnes forholdet imellem energien afsat i 75 mL glasset, og den totale afsatte energi dvs. summen af begge energier. Resultatet udregnes i form af den procent af totalenergien, der afsættes i 75 mL glasset med de skiftende substanser. For middelværdi af specifikke varmekapaciteter imellem 20 og 60 °C kan anvendes:

Vand	4180 J/(kg · K)
Sprit	680 J/(kg · K)
Glycerol	600 J/(kg · K)
Petroleum	500 J/(kg · K)
Eddikesyre	470 J/(kg · K)
Paraffinolie	213 J/(kg · K)

Det ses klart, at forbindelser med -OH grupper, NO₂ grupper m.fl. opfører sig ret ensartet, idet de let opvarmes af mikrobølgerne. Forbindelser uden -OH forbindelser opvarmes kun lidt. Prøv også med andre væsker, men hold dem langt fra kogepunkt (og flamme-) punkt, og opvarm ikke væsker som kan sønderdeles ved opvarmning eller afgive giftige/ætsende dampe ved lav temperatur.

Forsøg 8. Undersøgelse af opvarmning af faste stoffer

Forsøget gennemføres på samme måde som forsøg 6 (altså med vand i ovnen), idet der afvejes 75 g af henholdsvis: natriumchlorid, sand, blytara (små blykugler ca. 1 mm i diameter). Man kan også undersøge plasticstoffer, træ, messing (ca. 100 g lodder), jern, nikkel, bly, aluminium, mm. ved at bore et pashul til termometeret (termoelementet) evt. med kontaktfedt i klodserne. Der kan være problemer med temperaturudligning, så man kan stikke klodsen med termometer ned i en kappe af polystyrenskum og vente på ligevægt. Der vil være tale om små opvarmninger i forhold til samme mængde vand. Metaller med større ledningsevne en bly bør nok have afrundede former. Hvis det lyder, som om der er buedannelse eller gnister, når der er metaller i ovnen, bør der afbrydes for at undgå beskadigelser af magnetronen.

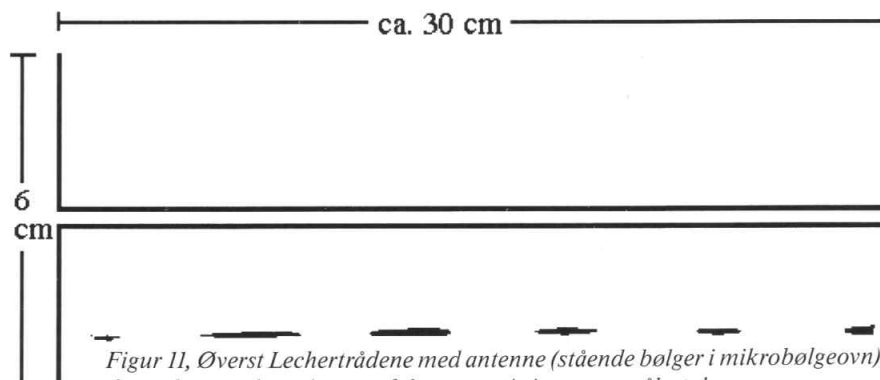
Forsøg 9. Smeltning af is

Et glas med 100 mL vand og et glas med ca. 40 g is (gerne koldere end smeltepunktet) lagt på et plastnet eller i en tragt (så den ikke kommer i eget smeltevand), stilles på afmærkede steder i ovnen. Der varmes ca. 60 sek., og temperaturen måles i vandet, vandet hældes fra isen efter ca. 1 min. og isen tørres og vejes igen. Forsøget gentages, idet der kommer et nyt glas med 100 mL vand og samme mængde vand, som der før var is på samme sted. Temperaturstigningerne efter samme tid eller energitilførsel måles. Det antages, at systemet har fået tilført energimængder fordelt imellem delsystemerne i forhold til massefordelingen i de to nævnte forsøg. Energitilførslen til isen beregnes. Her betegnes den specifikke smeltevarme for is, L_{is} , mængden af smeltet is (masse efter opvarmning, aftørring og afhældning af vand minus masse før opvarmning) m_{smelt} , isens startmasse m_{is} og vands specifikke varmekapacitet c_{vand} . Mængden af vand i glasset med vand, kaldes for m_{vand} , temperaturstigningen af dette $t_2 - t_1$, k er en faktor, som angiver, hvor mange gange mindre absorptionsevne is har end vand, fås fra energibevarelsen

$$k m_{is} c_{is} + m_{smelte} c_{vand} \Delta T_{smeltevand} + m_{vand} c_{vand} (t_2 - t_1) = E_{tilført1}$$

tilsvarende i det andet forsøg:

$$(m_{vand} c_{vand} + m_{is} c_{vand}) \cdot (t_2' - t_1') = E_{tilført2}$$



Antages at

$$E_{tilført1} = E_{tilført2}$$

kan det beregnes, hvor meget energi isen har modtaget, og dermed kan k beregnes.

Forsøg 10. Undersøgelse af bølgelængden af mikrobølger

På et stykke pap, som er klippet til så det passer til dipolen, fastlimes denne, se figur 11. Dipolen fremstilles af 1 mm^Ø svejsetråd eller evt. af 0,1 mm^Ø jerntråd, alternativt konstantantråd (evt. andre modstandstråde). Tråden skal virke som transmissionsledning med karakteristisk impedans

$$R_c = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln \frac{d_0}{r_0}$$

er radius i trådene, d_0 er afstanden imellem tråde. R_c bringes ned imod 50 Ω med de givne tråddiameter. Afstanden skal være ca. 1-3 mm imellem de to tråde, men så konstant som muligt. Fastlimningen skal ske med tape (helst såkaldt »englehud«). Pappet anbringes diagonalt på bunden af ovnen med dipolen oven på pappladen, så der alle steder er ca. 1 cm fra dipolledningerne til nærmeste ovnflade. Oven på dette anbringes enten en overheadfolie til et varmekopiapparat (3M termofax), alternativt et stykke varmfølsomt regnemaskine eller faxpapir, oven på dette et stykke pap til trykfordeling og et par 50 mL bægerglas med vand. Ovnens tændes i 10 - 20 sek. Der vil nu være en række mørke steder på fax/overheadpapiret, som har en inbyrdes afstand på $\lambda/2$. Kan disse papirtyper ikke skaffes klæbes dipolen helt over med et lag med englehud. Der kommer så en række afbrændte steder på tapen over tråden med en afstand, som er $\lambda/2$. Bølgelængden måles, og sammenlignes med den, der beregnes fra bølgeligningen. Forklaring: dipolen som er i resonans med ovnens klystronfrekvens, totallængde = $\lambda/2$ = ca. 6 cm i enden, sender svingningerne ind i trådene, der virker som en halvåben

orgelpibe. Transmissionsledningerne kaldes Lechertråde og blev tidligere anvendt til fjernsynsantennener. De elektromagnetiske bølger som opfanges af dipolen, vil løbe frem og tilbage på trådene, idet de reflekteres fra den åbne ende, hvor trådenes karakteristiske modstand ændres ved trådenes ophør. Der vil være en stående strømbølge og en tilsvarende spændingsbølge på ledningerne. Disse er faseforskudt en vinkel $\pi/2$. Det ovenstående kan ses ud fra energibevarelse. Strømbølgen (strømmen som funktion af sted og tid) er altid 0 i den åbne ende, dvs. der sker en refleksion med et fasespring på 0°. Der bliver derefter stående bølger med maksimum for hver halve bølgelængde. Der anvendes en tynd tråd (0,1-1 mm^Ø). Den bliver varm, hvor strømmen i den stående bølge er maksimal. I løbet af få sek. brændes tapen derfor igennem i disse punkter, eller det varmfølsomme papir sværes. Man kan så måle afstanden imellem midten af de afbrændte stykker og deraf få bølgelængden. Man kan også alternativt anbringe et stykke kalkerpapir med den sorte side opad under papiret med trådene. Der bliver så sorte mærker i løbet af få sek. selv med andre ledningsvalg end de angivne. At man skal have karakteristisk impedans »modstand« (pr. meter) på nær 50 Ω sammenholdt med den angivne formel, er for bedst muligt at tilpasse sig den elektromagnetiske bølge, der er i det fri rum i ovnen, samt dipolens strålingsmodstand. Den fundne bølgelængde vil være påvirket af glaspladen, ovnrummets begrænsede størrelse dvs. nære metalflader mm., og vil ligge lidt i underkanten. Det er vigtigt, at trådene overalt er mindst 1 cm fra metaldele, idet der opstår spændinger, som kan give overslag.

Forsøg 11. Metals afskærmende virkning

5 glas med hver 100 mL vand stilles i ovnen, så et står i midten med de fire andre uden om. Der opvarmes i ca. 30 sek, og det måles, hvad temperatu-

terne er blevet. Der fyldes nyt vand på, og det midterste indpakkes i 2 lag aluminiumsfolie til køkkenbrug. Pas på, at foliet sidder glat uden strittende hjørner. Der er en risiko for buedannelse til ovnen og beskadigelse. Høres det, stoppes ovnen straks. Forsøget gentages. Hvad kan man slutte af det? Forsøget kan også gennemføres hurtigt, idet ca. 200 mL vand, 200 mL paraffinolie og 200 mL vand indpakket i 2 lag folie placeres i ovnen og varmes samtidigt. Der opvarmes i 40 - 60 sek. Prøv at prikke huller i folien og gentag forsøget. Bestem hvor store hullerne skal være, før der sker opvarmning bag foliet.

Forsøg 12. Forsøg med mikrobølgeskåle og udstyr

Ved de følgende forslag til forsøg skal ovnen hele tiden belastes med et bæger vand, så den ikke tager skade. Mikrobølgeskåle/kar til opvarmning undersøges for energioptagelse. Der anvendes paraffinolie eller lugtfri petroleum. I første forsøg sættes to 200 mL pyrexglas (bægerglas) begge med 200 mL vand i ovnen. Temperaturstigningen på f.eks. 30 sek måles.

Energitilførslen til hvert glas og den samlede energitilførsel beregnes. Der kommer frisk vand på det ene, i det andet fyldes efter aftørring 200 mL lugtfrit petroleum og forsøget gentages, med samme beregninger. Glasset med petroleum udskiftes nu med en række mikrobølge- og ikke- mikrobølge fade, tallerkner og skåle. Der foretages samme beregninger som før, og skålenes evne til at modtage mikrobølgeenergien vurderes. Endelig forsøges med stegefade/skåle, almindeligt porcelæn og fajance gerne med kraftige farver. Her udføres forsøget som pilotforsøg meget kortvarigt for at sikre, at petroleummen ikke bliver for varm. Derefter gennemføres det egentlige forsøg.

Forsøg 13. Bestemmelse af CURIE-temperaturen for nikkel (eller Jern)

Blandt de mikrobølgeskåle, som kan købes, er der typer, der virker som termostadfade, dvs. opvarmer indholdet til en bestemt temperatur og derefter stort set ikke varmer til højere temperatur. De fremstilles ved at skålmaterialet indeholder et ferromagnetisk stof som vekselvirker med mikrobølgen under Curietemperaturen, men ikke over. Curietemperaturen er den temperatur, stoffet skal opvarmes til for at blive ikke-magnetisk. Her anvendes nikkel i form af nikkelpulver. For at det ikke skal være ledende og

blive opvarmet af hvirvelstrømme i metallet, blandes nikkelfilspånerne med en lidt større mængde fint sand. Blandingen kommes i et meget lille bægerglas, som »hænges« i et lidt større bægerglas. Dette sker, for at man ikke skal brænde sig og for ikke at sprænge bundglaspladen. Ud over dette anbringes et glas med ca. 100 mL vand i ovnen. Der opvarmes nu, og temperaturen måles, for hver ca. 40 kJ der er tilført (brug havehandsker! ovnen åbnes så kortvarigt som muligt), og curietemperaturen findes ved at afbilde temperaturen som funktion af den tilførte energi. Alternativt kan carbonyljern anvendes rent (dårligt ledende). Der måles nær overfladen, idet en lille indtrængningsdybde tydeligt ses. Tabelværdierne er for nikkel 358°C, og for jern 770°C.

Forsøg 14. Analogforsøg med andre opvarmningsmidler

Ca. 0,5 L vand sættes ind i mikrobølgeovnen. Det beregnes fra tidligere målinger, hvor lang tid det ca. vil tage at opvarme mængden til 80° C. Ovn kobles til en energimåler. Forsøget gennemføres med måling af temperaturen før og efter forsøget. Opvarmningen pr. kJ tilført elektrisk energi beregnes. Til sammenligning stilles 0,5 l vand ind i en almindelig bordovn på 600 - 800 W, som startes fra kold tilstand. Her måles de samme størrelser. Der måles hurtigt på vandet for hver 4 kW, indtil vandet er ca. 80° C. De samme størrelser beregnes. Forsøget gentages med en varm bordovn opvarmet til nær maksimaltemperatur (her anvendes læderhandsker til at flytte glassene, når temperaturen skal måles, pas på den varme ovn også udvendigt). Endelig gennemføres samme forsøg med en vandkoger på 1 - 2 kW. Her måles temperaturen løbende, og kogerens stoppes et par grader før den ønskede temperatur. Har man en kogeplade og en almindelig vandkedel til rådighed, gentages forsøget med disse. Forsøgsrækken gentages med 1 L vand. Beregn nyttevirkningen, såvel for 0,5 som 1 L vand i alle tilfældene, og kommenter opvarmningskilderne. Både ved bordovnen og massepladen kan man også måle nyttevirkningen af eftervarmen ved at standse energitilførselen et stykke tid før vandet når kogepunktet og afvente ligevægt. F.eks. ved massepladen vil man ved at opvarme vandet til ca. 55°C have en nyttevirkning på ca. 25 %, men med et kvarters eftervarme når den ca. 60 %. Har man ikke en energimåler, må der

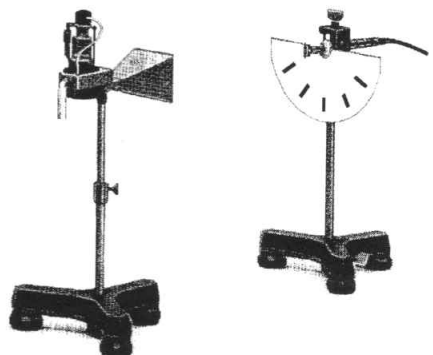
måles med volt- og amperemetre. Mikrobølgeovens data er målt til: 1245 VA, 1040 W, 221 V, 5,65 A, $\delta = 33^\circ$ målt med en energimåler. Nominelt er mikrobølgeeffekten $P = 650$ W.

SUPPLERENDE FORSØG MED 3 CM MIKROBØLGER

Her foreslås en række forsøg gennemført, som ikke let kan udføres med mikrobølgeovnen. De viser en række af de effekter, vi har set på, på en enklere måde. De forskellige problemer kan her belyses ét efter ét. Som modtager anvendes en mikrobølgediode. På grund af diodekarakteristikken skal man ved lave spændinger (mikrovolt) antage, at E-feltet er proportionalt med spændingen, ved høje spændinger, at E-feltet er proportionalt med $\sqrt{U}$.

Forsøg B1. Undersøgelse af mikrobølgers polarisation

Sendertragten på et 3 cm mikrobølgeanlæg sættes til at sende vandret over bordet med lodret polarisering. Ca. 20 - 30 cm fra senderen sættes en dipolmodtager (uden tragt) hen over 0-punktet i en plastikvinkelmåler, se figur 12. Det minimale signal findes



Figur 12. Opstilling til polarisation.

ved at dreje modtageren om sin akse og finde minimalt udslag på et mikrovoltmeter (der måles fra ca. 10 - 1000 mikrovolt). Vinkelmåleren støttes, så dipolens retning registreres som 0°. Der måles nu i spring på 5° med ca. 1 grads nøjagtighed op til 180°. Der fremstilles en graf med spændingen over dipolen som funktion af vinklen. Denne ses at have et maksimum ved 90°. Projektionen af dipolen på feltets retning kan med den valgte vinkel skrives som $E = E_0 \sin \phi$, hvor ϕ er den målte vinkel. Spændingen, som måles, er proportional med intensiteten (den overførte energi), som er kvadratet på feltet, så vi forventer $U = U_0 \sin^2 \phi$. Dette vises ved at plote spændingen U , som funktion af $\sin^2 \phi$, hvor $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$. An-

tennen tages i hånden og drejes, så dipolen peger i mikrobølgernes udbredelsesretning. Hvad ses nu?

Forsøg B2. Refleksion og transmission fra metalflader og dielektrika

Hornsenderen opstilles med lodret polarisation. Ca. 50 cm fra den opstilles en lodret, ca. 20×20 cm, metal-skærm, som kan drejes omkring en lodret akse, så hornet peger imod

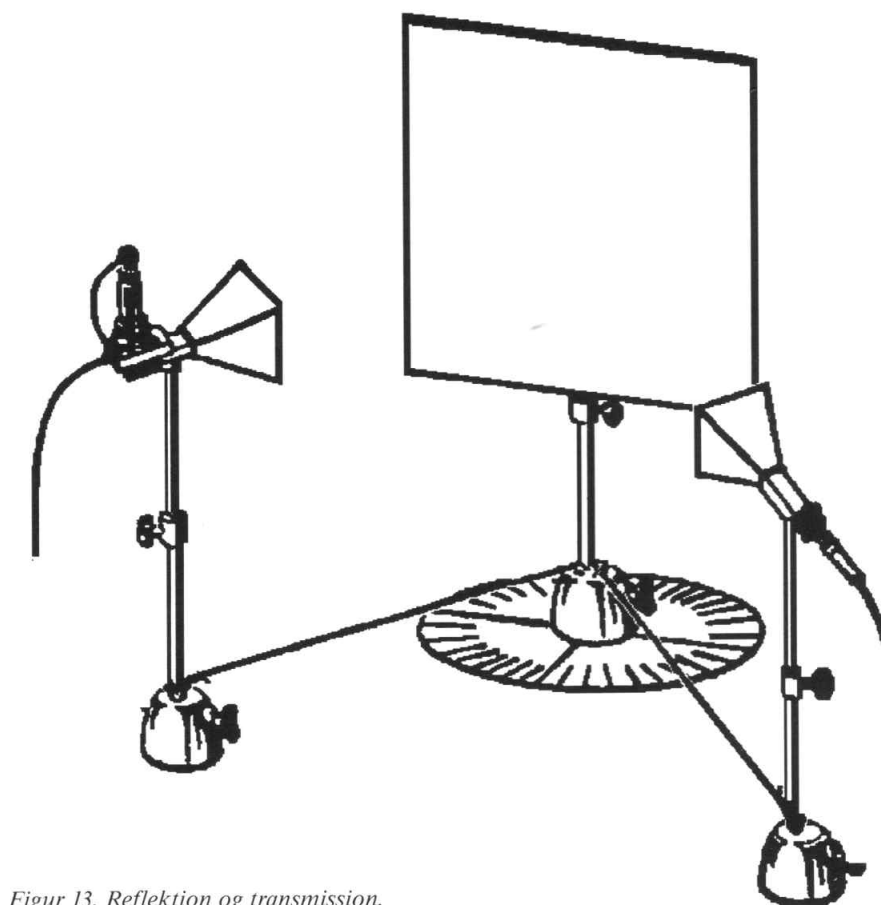
skærmmidt. Foran skærmen lægges en vinkelmåler, så skærmen går i retningerne 0° og 180° . Skærmen skal stå med midtnormalen drejet i en vinkel på ca. 30° - 60° grader i forhold til senderen, se figur 13. Modtagerhornet rettes imod skærmens midte og stilles i samme afstand som senderen fra skærmen. Ved at binde snore fra skærmen til sender og modtager, måles vinklerne. Modtageren flyttes nu

systematisk fra $0/180^\circ$ imod 90° (de forventede spejlingsvinkler), og intensiteten registreres på mikrovoltmeteret. Spændingen afbildes som funktion af vinklen, hvorved spejlløven kan eftervises. Prøv evt. med et par forskellige vinkler. Forsøget gentages med en plastic- eller glasplade i stedet for metalpladen. Hvordan er intensiteten i dette tilfælde i forhold til det første?

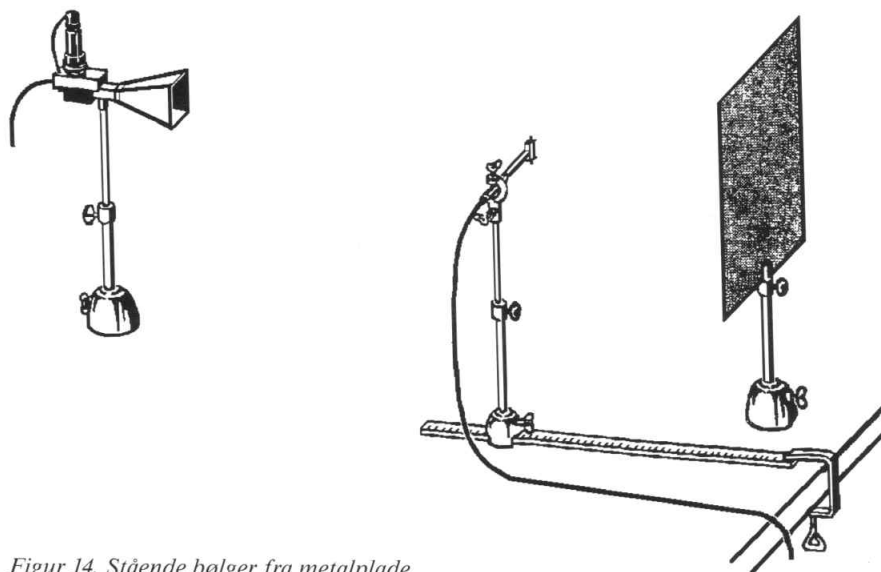
Til sidst vises transmissionen igennem glas/plastpladen. Hornmodtageren anbringes bagved pladen, så sender, plade og modtager er på en ret linie med modtageren rettet imod senderen. Intensiteterne måles atter. Den dielektriske plade udskiftes igen med metalpladen. Undersøg også metalpladen i transmission. Hvordan er transmissionsforholdene for henholdsvis metal og dielektrika? Hvordan er det med summen af de målte felter foran og bag pladen for dielektrik sammenlignet med metalpladen (husk, at det, der måles, er proportionalt med E^2 , og dielektrik reflekterer noget af E og transmitterer stort set resten). Mål også refleksion og transmission fra et messing- eller kobbernet med maskestørrelse ca. 3-4 mm eller mindre. Der gennemføres forsøg med andre størrelser. Lav selv net og find ud af, hvor store hullerne skal være, før der kommer f.eks. 10% af strålingen igennem.

Forsøg B3. Bølgelængde i luft, stående bølger 1

Mikrobølgesenderen stilles op ca. 40 cm fra en metalplade på dennes midtnormal, lodret polariseret, se figur 14. Imellem senderen og pladen stikkes en lodret diodemodtager ind fra siden, fastgjort i en muffe til et stativ eller bedre til en metalpind på en optisk bænk parallel med senderretningen, se figur 14, og således at stativpinden/stativet er så langt ude til siden som praktisk muligt. Dioden forbindes til mikrovoltmeteret. Dioden forskydes nu hen imod eller bort fra senderen. Man ser, at udslaget svinger. Læg en lineal ved bænken, langs stativfoden i senderretningen og mål afstanden imellem minima henholdsvis maksima (hvad der nu er tydeligst). Som det er diskuteret under stående bølger ved mikrobølgeovnen, skal der være minimum (henholdsvis maksimum) for hver halve bølgelængde. Mål bølgelængden. Bestem, hvad der er helt inde ved metalfladen ved at forskyde dioden tæt ind til den, og beregn værdien af E -feltet (knude/bug) ved fladen ud fra den



Figur 13, Refleksion og transmission.



Figur 14, Stående bølger fra metalplade.

kendte bølgelængde. Gennemfør forsøget ved i stedet at forskyde metal-skærmen. Giver det nogen forskel? Bestem frekvensen ud fra bølgeligningen $c = \lambda \cdot f$. Forsøget kan eventuelt gentages med en glasplade, undersøg også her, hvad der er på glassets overflade. Bestem også her frekvensen fra bølgeligningen (se afsnittet: Konstruktion af mikrobølge-ovnen). Bemærk, at det stående bølgemønster fastlægges af reflektorernes placering og flytter med denne, hvorimod senderens placering ikke har betydning for placering af buger og knuder (prøv at forskyde senderen uden at dreje den).

Forsøg B4. Bølgelængden i luft, stående bølger imellem metalflade og dielektrikum

Senderen opstilles pegende imod midten af en metalplade, størrelse ca.

20×20 cm, ca. 30-40 cm fra hornet, vinkelret på mikrobølgens udbredelsesretning som i figur 15. Imellem metalpladen og hornet opstilles en dielektrisk plade af glas eller plast parallelt med metalpladen på en optisk bænk eller på en anden måde, der kan styre den parallelt. Imellem de to plader sættes modtagerdipolen i E-feltets retning. Alternativt kan man anvende en hornmodtager opstillet parallelt med senderen og pegende imod metalpladens midte. Den dielektriske plade forskydes nu langsomt imod eller fra hornene (sender og modtagerhorn), og udslagene på millivoltmeteret registreres. Placeringerne ved max. og min. udslag udmåles, som funktion af den dielektriske plades stilling. Der måles for 10-15 max. eller min. $\lambda/2$ bestemmes af gennemsnitsafstand imellem de opstående minima (eller maksima hvis de ses skarpt). Gentag eventuelt forsøget, idet der opstilles 2 glas/plast-

plader, hvor den ene flyttes (metalpladen fjernes helt). Der måles denne gang i transmission dvs. modtageren flyttes over på den anden side af systemet og rettes imod senderen. Der kan også måles i refleksion med svagere signaler.

Forsøg B5. Michelsoninterferometeret. Bølgelængde i luft, stående bølger 2

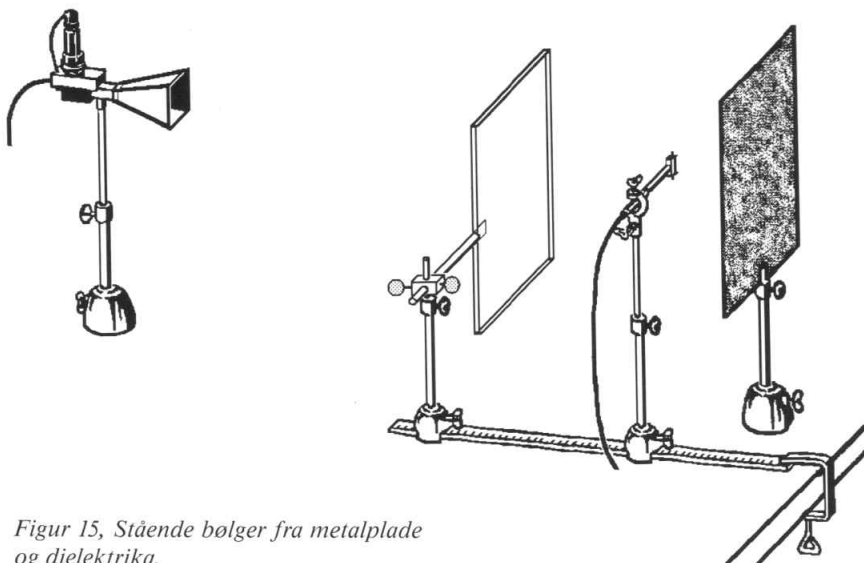
Opstillingen er som vist på figur 16. Mikrobølgen deles op i to ved hjælp af plastic eller glaspladen. Den direkte gennemgående bølge reflekteres fra metalpladen modsat senderen tilbage til plast/glaspladen og derfra til modtageren. Den reflekterede stråle sendes også tilbage til modtageren fra metalpladen overfor denne. Det virker altså, som om der er to bølgegivere (spejlbilledet i de to metalflader) bag hinanden som interfererer. Ved at forskyde den ene metalflade på en optisk bænk langs en målestok, som i forsøg B3, ses der stående bølger. Afstandene imellem maksima henholdsvis minima er en halv bølgelængdes flytning af metalfladen. Pas på ikke at dreje pladen under forskydningen. Bølgelængden måles som før og frekvensen beregnes.

Forsøg B6. Transmissionsledninger

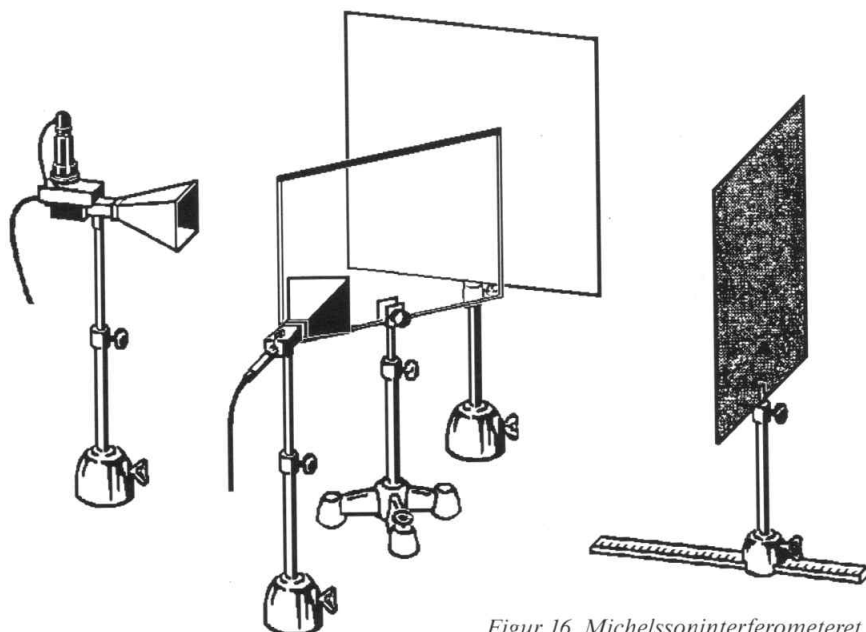
Der fremstilles nu et sæt transmissionsledninger, svarende til det sæt der blev anvendt i ovnen, se figur 8, de fremstilles nu blot i 1-2 mm kobbertråd på pap. Den ændrede trådtøkkelse bevirker, at en ny trådafstand må beregnes for at nærme sig til 50 Ω . Dipolen i enden, de knækkede stykker, skal hver være 0,75 cm lange, så dipolen ialt bliver $1/2$ bølgelængde dvs. 1,5 cm. Mikrobølgesenderen sættes til at sende vinkelret på ledningen, så dipolen befinder sig i munden, og så ledningerne går ud til siden uden at røre den ledende horn (papside imod hornet). Dipolen skal være i polariseringsretningen, dvs. hvis polarisationen er lodret, skal papiret gå ud til en af siderne vinkelret på tagten. Den løse dipol føres nu hen ad bagsiden af pappet, minima findes og bølgelængden på Lechertrådene bestemmes. Hvordan er dens forhold til luft (teorien siger, at den stort set er det samme).

Forsøg B7. Bølgelængde i bølgeleder

Har man Unilabs mikrobølgesæt, monteres nu bølgelederen på senderen i stedet for hornet. Ved yderenden



Figur 15, Stående bølger fra metalplade og dielektrika.



Figur 16, Michelsoninterferometeret.

monteres afslutningspladen med metalsiden indad i bølgelederen. Den lille dipolantenne forbindes til mikrovoltmeteret og føres langs ydersiden af bølgelederen langs spalten, og bølgelængden i bølgelederen (transmissionsledningen) bestemmes som før i B4. Forsøget kan gentages uden metalflade dvs. med åben ende. Til sidst med ferritten monteret indad (denne giver en impedans nær bølgelederens). Hvad bevirker disse ændringer, når bølgelængden måles? Hvornår er der knude henholdsvis bug ved enden af bølgelederen?

Forsøg B8. Reflektion og transmission fra et metalgitter

Et metalgitter med parallelle metalstænger evt. i form af kobbertråde fastklæbes til en papplade, hvor trådene har en afstand på ca. 8-10 mm, holdes ind i mikrobølgerne med stængerne i samme retning som E-feltets retning i mikrobølgen og vinkelret på senderretningen. Med hornmodtager måles transmission og reflektion som i B2, idet der dog kun måles vinkelret på gitteret og vinkelret igennem gitteret. Der måles også på polariseringen før og efter gitteret. Tilsvarende forsøg udføres med stængerne vandrette. Stængerne drejes nu 45° i forhold til E-feltet, den reflekterede og transmitterede stråling måles igen og undersøges for polarisation. Når gitteret er drejet, vil en del af senderens E-felt gå igennem gitteret, en del sætter elektronerne i stængerne i svingninger. Elektronerne virker som sendere og frembringer en reflekteret bølge tilbage imod senderen på sendersiden af gitteret i stængernes længderetning og en transmitteret bølge i senderretningen. Når der måles på den polariserede stråling, ses det derfor, at strålingen ikke mere er lineært polariseret, men svinger i begge retninger.

Forsøg B9. Bølgelængden i glas

Pilotforsøg. Hertil anvendes ca. 30 glasplader af tykkelse 1,2 - 1,5 mm, med et areal som hornets munding eller lidt større. Sendertragt og modtagertragt stilles lige over for hinanden med ca. 20 - 30 cm afstand. Modtageren forbindes til et millivoltmeter. Pladerne sættes nu ind i mikrobølgen vinkelret på akse først 1 plade, hvorefter der måles, så 2, 3 osv. Hver gang noteres udslaget. Udslaget afbildes som funktion af lagtykkelsen, idet pladetykkelsen måles. Man ser, at udslaget svinger. Dette skyldes, at der dannes stående bølger inde i glaspladen imellem for og bagside, og der

kommer et maksimum henholdsvis et minimum, når der er resonans eller det modsatte, dvs. når reflektionsbetingelserne inde i pladen passer med lagtykkelsen (eller ej). Dette sker for hver halve bølgelængde. Hermed er bølgelængden i glas målt. Der gælder:

$$\lambda_{\text{luft}} \cdot f = c_{\text{luft}}$$

og

$$\lambda_{\text{glas}} \cdot f = c_{\text{glas}}$$

herved

$$\frac{\lambda_{\text{glas}}}{\lambda_{\text{luft}}} = \frac{c_{\text{glas}}}{c_{\text{luft}}}$$

Fra Maxwells ligninger:

$$c_{\text{glas}} = \frac{c_{\text{luft}}}{\sqrt{\epsilon_{\text{rel.glas}} \times \mu_{\text{rel.glas}}}}$$

Da $c_{\text{glas}}/c_{\text{luft}} = n_{\text{glas/luft}}$ ses det, at brydningsforholdet for ca. 3 cm bølger i glas kan bestemmes.

Da $\mu_{\text{relativ glas}} = 1$ kan $\epsilon_{\text{relativ glas}}$ bestemmes. Bølgelængden i luft er målt tidligere, så den og lyshastigheden i glas beregnes, idet der dannes midelværdi over afstandene imellem minima henholdsvis maksima, og denne værdi anvendes for hver $\lambda/2$. Jævnfør forsøg B3-5 bestemmes brydningsforholdet. Forsøget er analogt til forsøg B4 (sidste del), som bestemmer bølgelængden i vacuum.

Hovedforsøg (se figur 17). Forsøget gentages, men med glaspladerne stillet 45° på stråleretningen. Der måles såvel på den transmitterede som på den reflekterede stråle som funktion af antal glasplader. Der måles først med modtageren i stilling A, derefter i B. Disse afbildninger optegnes i samme graf, hvor summen også optegnes.

Vejlængden i glas. Som det ses af figuren, kan vejlængden i glas bestemmes, idet man anvender resultatet af pilotforsøget og brydningsloven og derefter:

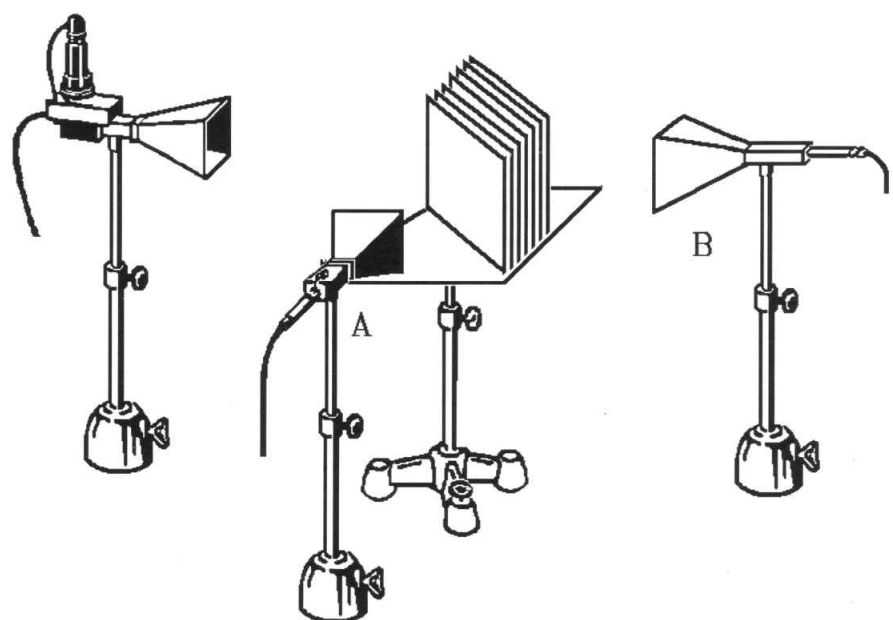
$$\frac{\sin i}{\sin b} = n_{\text{luft/glas}}$$

og for reflektion

$$\text{vejlængde glas} = 2 \times \text{tykkelse} \times \sin b$$

Beregn vejlængden i transmission.

Find bølgelængden i glas for den reflekterede stråle fra glassets bagside, find den tilsvarende vejlængde for den transmitterede stråle. Find derefter fra det sidste forsøg bølgelængden i glas, som funktion af lagtykkelsen (brug gennemsnit både fra transmitteret og reflekteret stråle). Undersøg størrelsen af summen af de elektriske felter (husk at spændingen der måles, stort set er kvadratet på feltstyrken; dette passer dog ikke helt, idet dioden er ulineær).



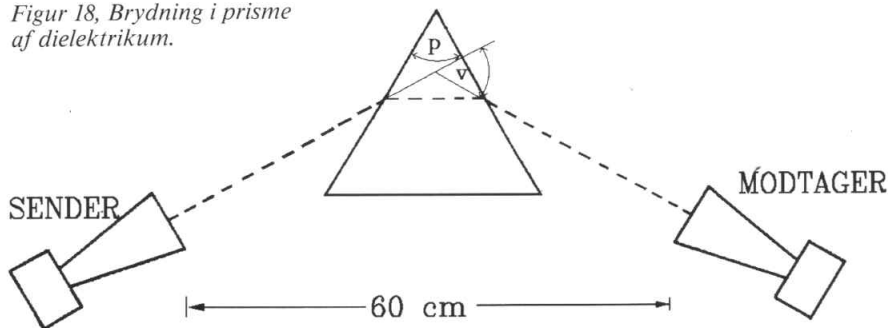
Figur 17, Hovedforsøget til stående bølger i glas.

Forsøg B10. Bølgelængden i dielektrikum, brydning

Med hornsender/modtager systemet opstilles et forsøg med en ligesidet prisme, enten helst en stor glasprisme, en stor plastprisme, eller en stor paraffinprisme. Opstillingen, som er vist på figur 18, er den samme

hvor p er prismens brydende vinkel, ofte ca. 60° , og v er den vinkeldrejning, der er imellem den indgående stråle fra senderen og den afbøjede stråle til modtageren. Bestem brydningsforholdet. Der sammenlignes med forsøg B9. Resultatet og den beregnede $\epsilon_{\text{relativ}}$ sammenlignes med tabelværdier.

Figur 18, Brydning i prisme af dielektrikum.



som når brydningsforholdet for en ligesidet prisme af glas måles simpelt optisk. Opstillingen sættes på en blød byggeplade. Senderens akse markeres med pinde på et papir (evt. ved at flytte dipolen et stykke væk til maksimum og angive retningen), prismet optegnes, og modtagerretningen optegnes. Hermed kan prismens brydende vinkel og afbøjningsvinkelen måles på papiret. Ud fra prismeformlen:

$$n = \frac{\sin \frac{v+p}{2}}{\sin \frac{p}{2}}$$

Forsøg B11. Bølgelængden i flydende dielektrika

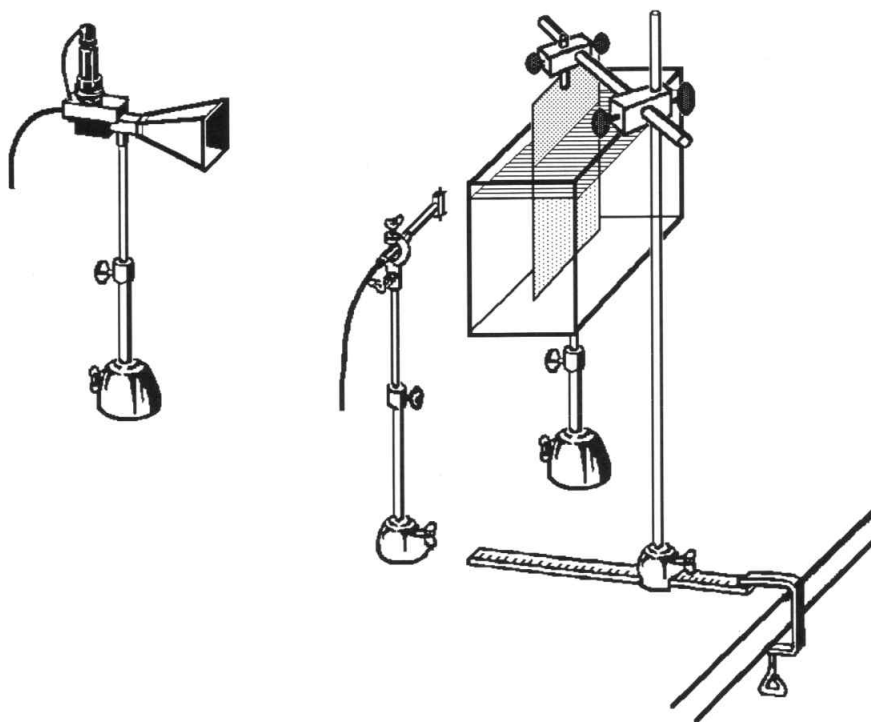
I en firkantet glaskasse helst uden metal ca. 6-10 x 6-10 x 6-10 cm (den behøver ikke at have samme mål i alle retninger) hældes et dielektrikum enten petroleum eller paraffinolie. Bemærk glaskassen og væskerne skal være så vandfrie som muligt, ellers kan forsøgene være meget vanskelige. Karret stilles kort fra senderhornet med en side imod senderen vinkelret på strålen, se figur 19. Ovenfra stikkes en strimmel aluminiumplade (alternativt kobber eller messing) af ca. samme bredde som karret, så den næsten når til bunden. Denne plade

Forsøg B12. Forsøg med bølgelængde i vand

I opstillingen fra forsøg B11 erstattes væsken med vand (efter rengøring). Forsøget gentages. Vi skal fra mikrobølgeovnforsøgene vente, at vandet absorberer mikrobølgen kraftigere. Hvad ser man ved forsøget? Man kan gentage forsøget ovenfor med antennen i væsken, men mikrobølgeantennen må evt. efter sin konstruktion være i en lille meget tynd plastpose i vandet (tynd for at give mindst muligt luftlag om antennen). Dyppes antennen i vandet, bør den tørres godt straks efter forsøget, og så lidt som mulig skal ned i vandet (den kan på længere sigt irre eller ruste mm.). Hvad er konklusionen på dette forsøg?

AFSLUTNING

I de ovenstående forsøg har vi set, at den ret nyudviklede mikrobølgeovn er et teoretisk kompliceret apparat og et af de fysisk mest komplicerede, der anvendes i husholdningen. Den er baseret på opfindelser, som blev skabt i forbindelse med 2. verdenskrig, og som også i dag har den største betydning på andre områder. Mikrobølger frembringes med store energier i magnetroner og et par andre mikrobølgerør. De har de karakteristiske egenskaber, som findes generelt ved elektromagnetiske bølger: Det er bølger (de kan frembringe stående bølger, der kan opstå interferens, de kan brydes i dielektrika), det er transversalbølger (de kan polariseres lineært), de kan overføre energi (kalorimeterforsøg), de kan opvarme dielektrika, især hvis disse er polære (eller inde-



Figur 19, Måling af bølgelængden ved hjælp af stående bølger i flydende dielektrika.

holder ioner), de stoppes af ledende flader (metal), de kan reflekteres fra metal og af dielektrika (samt fra ioniseret luft hvilket ikke er vist, men kan vises med hornsenderne ved refleksion af en stråle fra en »flamme-front«, som laves med en række brænderdyser (huller) i et rør. Gassen tændes ved udstrømningshullerne medens der tilføres bygas. Flammerækken virker som en flad reflektor). Mikrobølger kan flyttes til forbrugsstedet med transmissionsledninger (bølgeledere, coaxkabler og Lecher-tråde).

Der er en række karakteristiske sider ved mikrobølgeovnen: letvægtsmagnetronen leverer en bestemt energi ind i ovnen. Forøges varmekapaciteten i ovnen, skal energien fordeles på den større varmekapacitet og giver samme forøgelse i procestiden som kapacitetsforøgelsen (det er ikke tilfældet med den almindelige ovn). Mikrobølgeovnen har en høj effektivitet, selv om der drives hjælpesystemer (lys, blæser, glødetråd, transformator osv), energien afleveres et stykke ind i materialet (indtrængningsdybde), den afleveres ikke lige godt til alle materialer (afprøvning af forskellige materialer). Mikrobølgeovne er, hvis de holdes i orden, mindre farlige end de almindelige opvarmningsmetoder i hjemmet (ingen varme overflader, skoldende væsker lukket inde). Disse systemer er en resultaterne af en udvikling, der begyndte for hundrede år siden, og som stadig sker. Det er et nyt redskab, som får stigende betydning i verden, og som efterhånden vil være at finde i de fleste husholdninger.

ELEKTROMAGNETISKE BØLGER SAT I HISTORISK PERSPEKTIV

1600	William Gilbert	GB	1540-1603	Magnetisme, elektrostatik
1672	Gottfried Wilhelm von Leibnitz	D	1646-1716	Gnidningselektricitet
1672	Otto von Guericke	D	1602-1686	Elektricismaskinen
1673	Christian Huygens	NL	1629-1695	Bølgeteori for lys
1675	Ole Rømer	Da	1644-1710	Lyshastigheden, opdeling i farver
1704	Isaac Newton	GB	1642-1727	Partikelteori for lys
1708	Wall	GB		Lyn og gnister er elektriske
1729	Stephen Gray	GB	1666-1736	Klassificerer ledere og isolatorer
1734	Charles Francois de Cisternay Dufay	F	1698-1739	Opdager »glas- og lakelektricitet«
1744	Ewald Jurgen von Kleist	D	1702-1748	Leidnerflasken (kondensator)
1752	Benjamin Franklin	USA	1706-1790	Drageforsøg, atm. elektricitet
1754	John Canton	UK	1718-1772	Elektrisk fordeling
1774	Georges Louis Lesage	SCH		Elektrisk telegrafi
1775	Alessandro Volta	I	1745-1827	Elektroforet
177	Georg Christoph Lichtenberg	D	1742-1799	Betegnelsen positiv og negativ ladning indføres
1785	Charles Augustine Coulomb	F	1736-1806	Ladninger, snovægtsforsøg
1786	Abraham Bennet	GB	1750-1799	Elektroskopet
1791	Luigi Galvani	I	1737-1798	Galvaniske elementer
1800	Alessandro Volta	I	1745-1827	Voltasøjlen, spændingsrækken
1800	William Nicholson	GB	1753-1815	Elektrolyse på vand
1808	E'tienne Louis Malus	F	1775-1872	Polarisation, Malus lov
1812	Humphrey Davy	GB	1778-1829	Buelampen
1820	Hans Christian Ørsted	DK	1777-1851	Elektromagnetismen
1820	André Marie Ampère	F	1775-1836	Kraftvirkningen imellem to strømme
1820	André Marie Ampère	F	1775-1836	Elektrisk telegrafsystem
1820	Jean Baptiste Biot	F	1774-1862	Elektromagnetismens
	Félix Savart	F	1791-1841	Matematiske grundlove
1821	Joseph Louis Gay-Lussac	F	1778-1850	Elektromagneten
	Dominique Francois Arago	F	1786-1853	
1822	Thomas Johann Seebeck	D	1770-1831	Termoelektriske kræfter
1822	Joseph Fraunhofer	D	1787-1826	Lysbølgelængde målt m/gitter
1822	André Marie Ampère	F	1775-1836	Magnetisme
1823	Poul Ludovitsch Schilling	USSR	1786-1837	Brugbar telegraf
1826	André Marie Ampère	F	1775-1836	Elektrodynamisk teori
1827	Georg Simon Ohm	D	1789-1854	Elektrisk modstand, ohms lov
1831	Michael Faraday	GB	1791-1867	Induktionsloven
1832	Hippolyte Pixii	F	1808-1835	Dynamo
1832	Michael Faraday	GB	1791-1867	Kraftliniebegrebet
1833	Michael Faraday	GB	1791-1867	Elektrolytiske love
1833	Karl Friedrich Gauss	D	1777-1855	Telegraf (Göttingen) + afhandling
	Wilhelm Eduard Weber	D	1804-1891	om jordens magnetfelt
1833	Charles Wheatstone	GB	1802-1875	Telegraf, spejlgalvanometeret
1834	Heinrich Emil Friedrich Lenz	D	1804-1865	Lenz-lov
1834	Moritz Hermann von Jacobi	D	1801-1874	Elektromotoren
1835	Michael Faraday	GB	1791-1867	Selvinduktionen
1836	John Frederic Daniell	GB	1790-1845	Standardelement
1837	Samuel Morse	USA	1791-1872	Telegrafapparat, morsesystem
	Leonard Dunnell Gale	USA	1800-1883	
1837	Joseph Henry	USA	1797-1878	Selvinduktion formler
1838	Karl Friedrich Gauss	D	1777-1855	Afhandling om jordmagnetisme
1839	Carl August von Steinheil	D	1801-1870	Første elektriske ur
1843	Michael Faraday	GB	1791-1867	Bevarelse af elektricitetsmængde
1843	James Prescott Joule	GB	1818-1889	Varme fra elektricitet
1845	Michael Faraday	GB	1791-1867	Faradayeffekten, diamagnetisme
1847	Gustav Robert Kirchhoff	D	1824-1887	Kirchoff's love
1849	Hippolyte Louis Fizeau	F	1819-1896	Lyshastigheden
	Dominique Francois Arago	F	1786-1853	
1851	Heinrich Daniel Ruhmkorff	D	1803-1877	Induktionsapparatet
1851	Søren Hjorth	DA	1801-1870	Det dynamoelektriske princip
1853	William Thomson (Lord Kelvin)	GB	1824-1907	Første frekvensformel for svingningskredse
1858	Charles Wheatstone	GB	1802-1875	Opfinder hurtigtelegrafi
1858	Julius Plucker	D	1801-1868	Katodestråler
1861	James Clerk Maxwell	GB	1831-1879	Kraftliniebegrebet, Maxwells lign. ved meka-
				nisk udledning
1862	Jean Bernard Léon Foucault	F	1819-1868	Lyshastig med roterende spejl

1864	Wilhelm Holtz	D	1836-1913	Influenselektrisermaskinen
	August Joseph Ignaz Topler	D	1836-1912	
1864	Mahlon Loomis	USA	1826-1886	Sender 22 km
1864	James Clerk Maxwell	GB	1831-1879	Maxwells ligninger elektrodynamisk
1867	Werner von Siemens	D	1816-1892	Dynamo med selvmagnetisering
	S.A.Varley	GB	1832-1921	
	Charles Wheatstone	GB	1802-1875	
1867	Ludvig Valentin Lorenz	DA	1829-1891	Elektromagnetisk lysteori, international ohm, metallers ledningsevne, telefonkablers teori
1869	Johann Wilhelm Hittorf	D	1824-1914	Afbøjning af katodestråler i magnetiske felter
1870	Zenobe Gramme	B	1826-1901	Ringankeret til dynamoer
1873	James Clerk Maxwell	GB	1831-1879	Elektrodynamik: Treatise on electricity and magnetism
1876	Alexander Graham Bell	USA	1847-1922	Opfinder telefonen, patent 2 timer før Elisha Gray
1877	Thomas Alva Edison	USA	1847-1931	Kulmikrofonen
1881	L.Gaulard	GB		Transformatoren
	J.D.Gibbs	GB		
1881	Shelford Bidwell	GB	1848-1909	Første billedtelegrafi
1881	Hermann W.Ferdinand Helmholtz	D	1821-1894	Beregner den elektriske elementarladning
	George Johnstone Stoney	Ir	1826-1911	
1881*	Albert A. Michelson	USA	1852-1931	Forsøg på påvisning af æteren
	William Morley	USA	1838-1923	
1883	Thomas Alva Edison	USA	1847-1931	Edison-effekt, glødende metal afgiver elektroner
1883	Paul-Jacques Curie	F	1855-1941	Piezoelektricitet
	* Pierre Curie	F	1859-1906	
1884	Paul Gottlieb Nipkow	D	1860-1940	Elektrisk/mekanisk TV
1886	Eugen Goldstein	D	1850-1930	Kanalstråler
1887	Nicola Tesla	USA	1856-1943	Vekselstrømsomformer, induktionsmotoren
1887	Heinrich Hertz	D	1857-1894	Über sehr schnelle elektrische schwingungen
1888	Heinrich Hertz	D	1857-1894	Elektromagnetiske bølger, ca. 10 m rækkevidde
1888	Wilhelm Hallwachs	D	1859-1922	Fotoelektrisk effekt
1891	Nikola Tesla	USA	1856-1943	Højfrekvenstransformatoren
1893	Julius Elster	D	1854-1920	Første fotocelle
	Friedrich Geitel	D	1855-1923	
1894	Oliver Lodge	GB	1851-1940	Kohæren, el.magn. bølgedetektor
1894	Alexander Popoff	USSR	1859-1905	Hertzbølger til telegrafi
1894*	Guglielmo Marconi	I	1874-1937	Opfinder jordforbindelsen
1895	Michael Idvorsky Pupin	USA	1858-1935	Bærefrekvenstelefone (AM)
1895*	Guglielmo Marconi	I	1874-1937	Gnisttelegrafi med kohære
1895*	Hendrik Antoon Lorentz	NL	1853-1928	Elektronteori, basis i forsøg
	* P.Zemanns	NL	1865-1943	
1895	Michael Idvorsky Pupin	USA	1858-1935	Bærefrekvenstelefone
1895*	Wilhelm Konrad von Rontgen	D	1845-1923	Røntgenstråling
1897*	Joseph John Thomson	GB	1856-1940	Katodestråler herunder fastslås ca. e, e/m, fart, navn: elektron
1897*	Guglielmo Marconi	I	1874-1937	Sender 14 km
1898	Oliver Lodge	GB	1851-1940	Dynamisk højttaler
1898*	Karl Ferdinand Braun	D	1850-1918	Katodestrålerørret
1901*	Guglielmo Marconi	I	1874-1937	Sender over Atlanten
1901*	Owen William Richardson	GB	1879-1959	Elektronemission glødetråd
1902	Oliver Heaviside		1850-1925	Heavisidelagene i ionosfæren
1902*	Philipp Lenard	D	1862-1947	Fotoelektrisk effekt
1902	Valdemar Poulsen	DA	1869-1942	Den højfrekvente buesender (når senere 3 MW ved 4 MHz)
1903	Robert Abbott Hadfield	GB	1859-1940	Transformator med siliciumstålkerne
1903	Valdemar Poulsen	DA	1869-1942	Trådbåndsoptageren
1904	John Ambrose Fleming	GB	1849-1945	Elektronrøret (dioden)
1906*	Karl Ferdinand Braun	D	1850-1918	Krystaldioden
	H.H.Dunwoody	USA		
	Greenleaf Whittier Pickard	USA	1877-1956	
1907	Boris Rosing	USSR		Anvender Braunrøret til TV-billedrør
1907	Reginald Aubrey Fessenden	USA	1866-1932	Heterodynprincippet
1907	Lee de Forest	USA	1873-1961	Opfinder trioden
1907*	Robert Andrews Millikan	USA	1886-1953	Elementarladningen
1908	---	D		AM anvendes i praksis

1911*	Edward Victor Appleton	GB	1892-1965	Appletonlaget
1911*	Heike Kamerlingh Onnes	NL	1853-1926	Superledning
1912	Lee de Forest	USA	1873-1961	Kaskadeforstærkeren
1913	Lee de Forest	USA	1873-1961	Tilbagekobling, kontinuerte elektriske svingninger
1913	----			Radiofoni over Atlanten
1915	Walter Schottky	D	1886-	Skærmgitterrøret
1920	Edwin Howard Armstrong	USA	1890-1954	Superheterodynmodtager
1921	Albert Wallace Hull	USA	1880-1966	Magnetronen
1921	Valdemar Poulsen	DA	1869-1942	Bruger FM system
1921		USA		Første radiostation i regelmæssig drift (underholdning)
1922	----			Billedoverførsel, Atlanten
1924	----			Selenensretteren
1928	----			TV-sending Berlin
1928	Vladimir Kosma Zworykin	USA	1889-	Ikonoskopet (TV-optagerrør)
1930	A. Hoyt Taylor	USA	1879-1961	Første primitive RADAR-forsøg
	Leo C. Young	USA		
1930	Harold Stephen S. Black	USA	1898-	Modkoblingen i forstærkere
1930	Karl Guthe Jansky	USA	1905-1950	Radioastronomi
1933	Edwin Howard Armstrong	USA	1890-1954	FM-radio
1935	O. Heil	D		Klystronen, udkast
	A. Arsenjawa-Heil	D		
1935	Konrad Zuse	D	1910-	Elektronisk regnemaskine der kan programmeres
1936	----	GB		BBC, regelmæssig TV
1938	----	GB		Radarvarslingskæde, udvikling ledet af Wattson-Watts
				Refleksklystronen
1939	W. C. Hahn	USA		
	George Forrest Metcalf	USA	1906-	
	R. H. Varian	USA	1898-1959	
	S.F. Varian	USA		
1939	J. O'Brian	USA		DECCA, hyperbelnavigation
	H.F. Schwarz	USA		
1940	Randall	GB		Hulrumsmagnetronen
	Henry Albert Howald Boot	GB	1914-	
1940	----	GB		Første operative kortbølgeradar
1942	----	USA		Første LORAN-kæde
1942	----	GB		Radiobrandrøret
1943	R. Kompfner	GB		Vandrebølgerøret
1948*	John Bardeen	USA	1908-	Punktkontakttransistoren
	* Walter Hauser Brattain	USA	1902-	
	* William Bradford Shockley	USA	1910-	
1949*	William Bradford Shockley	USA	1910-	Fladekontakttransistoren
1951	----	USA		Farvefjernsynsudsendelser
1955*	Charles Hard Townes	USA	1915-	MASERen
	Gordon	USA		
	Herbert Jack Zeiger	USA	1925-	
1956	C. A. Lee	USA		Højfrekvenstransistoren
1957*	John Bardeen	USA	1908-	BCS-teorien for superledning
	* Leon N. Cooper	USA	1930-	
	* John Robert Schrieffer	USA	1931-	
1960	T.H. Maiman	USA	1927-	LASERen
	* Charles Hard Townes	USA	1915-	

Det opgivne land er normalt det land, hvor opdagelsen er sket. Årstallet kan såvel være året for forsøget/teorien som publikationsåret.

* angiver nobelpristagere (hver gang navnet opføres, nobelprisen er ikke nødvendigvis for det pågældende emne).

ANVENDT LITTERATUR

J. Francis Reintjes, Godfrey T. Coate: Principles of radar, McGraw-Hill Book Compagny 1952

H. A. Arwater: Mikrowave Theory, McGraw-Hill Book Compagny, 1962

R. V. Decareau, R. A. Peterson: Mikrowave Processing and Engineering, Ellis Horwood, 1986

David A. Copson: Mikrowave Heating, Avi Publishing Compagny, 1975

Moulinex: Tekniske informationer om mikrobølgeovne, Moulinex 1988.

