

# Kommersialisering av metamaterialer

Fremtidens teknologi

**Nina Westgaard Jacobsen**

Master i elektronikk

Oppgaven levert: August 2007

Hovedveileder: Johannes Skaar, IET



# Oppgavetekst

Masteroppgaven skal bestå av en presentasjon av metamaterialer, en beskrivelse av status p.t. for forskningsarbeidet med metamaterialer og en gjennomgang av fremtidige mulige bruksområder. Videre gjøres en generell redegjørelse av kommersialisering av forskningsresultater og metamaterialer settes til slutt inn i denne sammenhengen.

Oppgaven skal redegjøre for ulike alternative bruksområder/ anvendelser, både teoretiske og praktisk realiserbare. Oppgaven skal også presentere de teknologiske prinsippene for de ulike anvendelsene.

Videre skal anvendelsene settes inn i et kommersielt perspektiv, og ulike spørsmål knyttet til fremtidig anvendelse skal besvares. Hvilke eksisterende utfordringer og problemer kan metamaterialer være med på å løse i framtiden? Innenfor hvilke bruksområder kan en oppnå størst nytteverdi, og hvordan skal disse resultatene oppnås? Hvilke utfordringer gjenstår for at anvendelsene kan forventes realisert i framtiden? Er det hindringer som gjør enkelte anvendelser urealistiske?

På bakgrunn av analysen skal det drøftes innen hvilke bruksområder teknologien kan forventes å bli kommersialisert i framtiden, samt at veien videre for kommersialiseringsprosessen skal utpekes.

Oppgaven gitt: 31. mai 2007

Hovedveileder: Johannes Skaar, IET



# FORORD

Denne masteroppgaven ble skrevet ved Institutt for elektronikk og telekommunikasjon ved NTNU våren og sommeren 2007. Masteroppgaven bygger delvis på prosjektoppgaven "Innledende studie av bølgeleder med aktivt metamateriale" skrevet av undertegnede vinteren 2007.

Takk til professor Johannes Skaar ved Institutt for elektronikk og telekommunikasjon ved NTNU for god veiledning og støtte i mitt arbeid med å skrive en spennende og annerledes oppgave. Tusen takk til professor Olav Breinbjerg ved Institutt for Elektromagnetske systemer ved Danmarks Tekniske Universitet og Per Kolbeck Nielsen ved Forsknings- og Innovasjonsstyrelsen i Danmark for gode innspill og inspirasjon.

Takk også til Christian Søggaard Jensen for jobben som motivator og korrekturleser.

Oslo, august 2007

Nina Westgaard Jacobsen



# SAMMENDRAG

Metamaterialer har blitt betraktet som et kontroversielt tema siden de ble presentert som en teoretisk mulighet av Viktor Veselago i 1969. I den senere tid har det blitt verifisert at flere fundamentale prinsipper i fysikken og optikken blir reversert eller opphevet som følge av nye ukonvensjonelle egenskaper i passive metamaterialer. Metamaterialene er opphav til nye fenomener som negativ brytning, antiparallelle hastigheter, motsatt dopplereffekt, fase- og dispersjonskompensasjon og reversering av evanescente felt. Et stort antall forbedrede tekniske applikasjoner blir mulig som følge av disse fenomenene. Fellesnevneren for disse er at når naturlige begrensninger i forbindelse med materialet kan oppheves, vil en kunne gjøre store forbedringer med tanke på størrelse, effektivitet, oppløsning og kapasitet.

### Utfordringer

Foreløpig er det en del tekniske utfordringer knyttet til produksjon av metamaterialer i enkeltfrekvenser utover mikrobølgeregionen, og for et bredt spekter av frekvenser. Flere av utfordringene er direkte knyttet til materialene som benyttes, mens andre skyldes manglende teknologi når det gjelder produksjon. Enkelte av disse utfordringene vil trolig kunne løses i nær fremtid, mens andre fremstår som større – og foreløpig uoverkommelige – hindringer.

Dagens tilgjengelige metamaterialer produseres hovedsaklig med metall som en viktig bestanddel. Dette betyr at de har virkeområde i mikrobølgespekteret, og er opphav til store tap ved optiske frekvenser. For å kunne realisere metamaterialer i et bredere frekvensspekter og særlig med tanke på det synlige spekteret, er det nødvendig å finne fram til ikke-metalliske materialstrukturer. Dessuten er dagens utforskning av magnetiske metamaterialer i terrahertzspekteret fortsatt langt unna operative løsninger. En økning i spekteret som metamaterialer kan operere i kan oppnås ved en minimalisering av strukturenes byggesteiner. Dette vil øke homogeniteten for en gitt frekvens.

### Bruksområder

I første omgang kan det forventes at metamaterialer vil bli brukt i ulike antenneapplikasjoner. Flere forskningsgrupper arbeider for tiden med å utvikle miniatyrantennene av metamaterialer. Disse vil blant annet kunne bidra til en mer effektiv trådløs kommunikasjon, slik at det for eksempel vil bli mulig å være koblet til internett til enhver tid. Dette blir mulig fordi mikroskopiske antenner kan være festet på chips og sensorer som for eksempel kan være "online". Dette vil imøtegå de stadig økende kravene til små mobiltelefoner og andre portable dataenheter, samt kravene til tilgjengelighet av nettverk. Det amerikanske forsvaret arbeider også med å utvikle antenner som kan være med i kampen mot terror.

Evnen til å fokusere lys og andre elektromagnetiske bølger har lenge blitt betraktet som den mest lovende egenskapen med metamaterialer. Det vil blant annet kunne føre til en mer effektiv solenergiteknologi. Det vil f. eks.

## Kommersialisering av metamaterialer

også være med på å øke mengden av informasjon lagret på en CD eller DVD drastisk.

Usynlighet er det feltet innen metamaterialer som sannsynligvis ligger lengst unna en realisering. Likevel har usynlighet fascinert menneskene til alle tider, så den teoretiske muligheten til å skape en usynlighetskappe og andre usynlighetskomponenter gjør at temaet får mye oppmerksomhet og omtale.

### Kommersialisering av forskningsresultater

Kommersialisering av forskningsresultater er et nasjonalt og internasjonalt satsningsområde. Det tradisjonelle skillet mellom forsknings- og utdanningsinstitusjonenes grunnforskning og næringslivets interesseområder blir svakere, blant annet på grunn av sterkere internasjonal konkurranse og et større fokus på innovasjon og nytenkning i næringslivet.

Regjeringen Stoltenberg II gir i Soria-Moriaerklæringen<sup>1</sup> og i Stortingsmeldingen "Vilje til forskning" klare signaler om at de ønsker en styrket satsning på forskning og et nærere samarbeid mellom forskningsinstitusjoner og næringslivet.

Kommersialisering er en krevende prosess, både tidsmessig og økonomisk, og det er derfor nødvendig med en god kommersialiseringsplan for å redusere risiko og øke sjansene for suksess. Veien fra ide til et fullt ut kommersialisert produkt er lang og kronglete med mange hindringer og utfordringer i veien. Ofte dreier det seg om flere parallelle oppgaver; finne riktige partnere, etterprøve ideens bæreevne, utvikle og modne prosjektet, beskytte og markedsføre rettighetene til sine oppfinnelser samt skaffe kapital for å sette ideen i produksjon.

### Goldsmiths kommersialiseringsmodell

Goldsmiths kommersialiseringsmodell er utviklet av professor H. Randall Goldsmith og har oppnådd internasjonal anerkjennelse som et godt redskap for å bistå kommersialiseringsprosessen for avansert teknologi. Modellen deler kommersialiseringsprosessen inn i tre hovedfaser; utredningsfasen, utviklingsfasen og kommersiell fase. De tre fasene består av hhv. 1, 3 og 2 trinn, totalt 6. I hvert trinn skal idé(e) vurderes og videreutvikles ut fra tre perspektiver; teknologi, marked og virksomhet.

### Kommersialisering av metamaterialer

De ulike fremtidige bruksområdene for metamaterialer er alle tidlig i en kommersialiseringsprosess. Både materialer og konkrete produkter er teoretisk mulig å fremstille, men det finnes foreløpig få prototyper. Forskningen foregår hovedsaklig ved etablerte forsknings- og utdanningsmiljøer, men det kan forventes et tettere samarbeid med aktuelle produsenter og investorer når/hvis de teknologiske hindringene løses. Sannsynligvis vil dette skje i flere miljøer samtidig, og det vil da kunne bli en

---

<sup>1</sup> Dokument som klargjør den politiske plattformen til koalisjonsregjeringen, september 2005 [4].



## Kommersialisering av metamaterialer

sterk konkurranse om kommersialiseringen av teknologien. Markedet for en slik teknologi er enormt, og interessen vil utvilsomt være stor hos både investorer og forbrukere.

Sjekkliste utarbeidet med bakgrunn i Goldsmiths kommersialiseringmodell, tilpasset kommersialisering av metamaterialer, vil kunne brukes som et rammeverk og en veileder i forbindelse med en slik kommersialiseringssprosess.

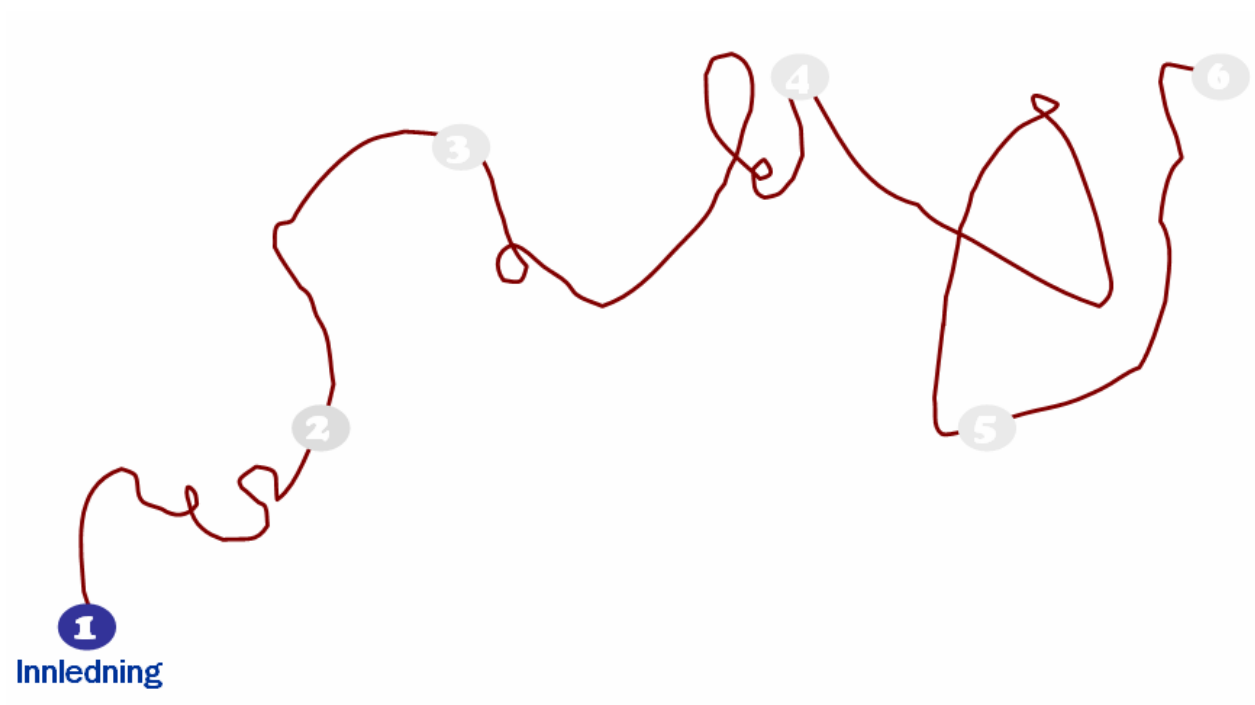


## INNHOOLD

<b>1</b>	<b>INNLEDNING</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>METAMATERIALER</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Bakgrunn og grunnleggende prinsipper</b> .....	<b>15</b>
2.1.1	Materialegenskaper .....	15
2.1.2	Respons og simulering.....	18
2.1.3	Kausalitetsprinsippet .....	20
<b>2.2</b>	<b>Nye fenomener</b> .....	<b>22</b>
2.2.1	Antiparallele hastigheter .....	22
2.2.2	Negativ brytning.....	25
2.2.3	Overflatefenomenet og evanescent effekt .....	28
2.2.4	Fokuserende egenskaper .....	30
2.2.5	Fasekompensasjon .....	32
2.2.6	Dispersjonskompensasjon.....	33
2.2.7	Usynlighet.....	34
<b>2.3</b>	<b>Tekniske applikasjoner og konsepter</b> .....	<b>37</b>
2.3.1	Resonante kretser .....	37
2.3.2	Kavitetsresonator .....	39
2.3.3	Bølgeledere .....	40
2.3.4	Antenner.....	40
2.3.5	Applikasjoner på bakgrunn av brytning.....	42
<b>2.4</b>	<b>Tekniske utfordringer</b> .....	<b>43</b>
<b>2.5</b>	<b>Aktuelle fremtidige bruksområder</b> .....	<b>44</b>
2.5.1	Trådløs kommunikasjon .....	44
2.5.2	Optikk .....	45
2.5.3	Usynlighet.....	46
<b>3</b>	<b>GOLDSMITHS KOMMERSIALISERINGSMODEL</b> .....	<b>49</b>
<b>3.1</b>	<b>Utredningsfasen</b> .....	<b>51</b>
<b>3.2</b>	<b>Utviklingsfasen</b> .....	<b>52</b>
3.2.1	Gjennomførbarhet .....	52
3.2.2	Utvikling.....	53
3.2.3	Introduksjon .....	54
<b>3.3</b>	<b>Kommersiell fase</b> .....	<b>55</b>
3.3.1	Vekst.....	55
3.3.2	Modning .....	56
<b>3.4</b>	<b>Kapital og finansiering</b> .....	<b>57</b>

## Kommersialisering av metamaterialer

<b>4</b>	<b>KOMMERSIALISERING AV FORSKNINGRESULTATER .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1</b>	<b>Kommersialisering i praksis .....</b>	<b>61</b>
<b>4.2</b>	<b>Motivasjon for kommersialisering av forskningsresultater.....</b>	<b>63</b>
<b>4.3</b>	<b>Samspill mellom næringsliv og forskningsinstitusjoner.....</b>	<b>63</b>
<b>4.4</b>	<b>Internasjonale trender.....</b>	<b>64</b>
<b>4.4</b>	<b>Utfordringer og tiltak .....</b>	<b>65</b>
4.4.1	Manglende erfaring .....	65
4.4.2	Motivasjon og holdninger .....	66
4.4.3	Finansiering.....	66
4.4.4	Tverrfaglig samarbeid.....	66
<b>5</b>	<b>KOMMERSIALISERING AV METAMATERIALER.....</b>	<b>71</b>
<b>5.1</b>	<b>Utredning.....</b>	<b>71</b>
<b>5.2</b>	<b>Gjennomførbarhet .....</b>	<b>73</b>
<b>5.3</b>	<b>Utvikling.....</b>	<b>74</b>
<b>5.4</b>	<b>Introduksjon .....</b>	<b>75</b>
<b>5.5</b>	<b>Vekst.....</b>	<b>77</b>
<b>5.6</b>	<b>Modning.....</b>	<b>78</b>
<b>6</b>	<b>KONKLUSJON .....</b>	<b>81</b>
	<b>LITTERATURLISTE .....</b>	<b>83</b>





# 1 INNLEDNING

### Bakgrunn

Metamaterialer har vært et hett tema i en rekke forskningsmiljøer siden årtusenskiftet, og temaet har i år blitt kåret til ett av de viktigste forskningsområdene innen fysikken [1]. Metamaterialer er en ny type kunstig framstilte materialer. De er nye i den forstand at de har egenskaper som ikke er kjent i naturen fra før. Generelt defineres metamaterialer som *sammensatte makroskopiske materialer, med menneskeskapt periodisk arkitektur, designet for å framskaffe en ønsket kombinasjon av to eller flere responser* [2].

Oppdagelsen av metamaterialer har i følge professor Olav Breinbjerg ved Danske Tekniske Universitet ført til et paradigmeskifte i optikken, fordi flere fysiske prinsipper reverseres og tidligere etablerte sannheter må revurderes og modifiseres [3]. Dette har medført stor interesse og det er i dag mange ulike forskningsgrupper og institusjoner som forsker på anvendelser og bruksområder for de nye metamaterialene. Det er imidlertid flere teknologiske utfordringer knyttet til produksjonen av metamaterialer i frekvensområder utenfor mikrobølgespekteret, og for et bredere frekvensspekter. Mange av forskningsartiklene innenfor dette feltet omhandler derfor såkalte "enn-hvis" problemstillinger og tar for seg hva som kunne være mulig hvis disse utfordringene blir løst.

Regjeringen Stoltenberg II gir i Soria-Moriaerklæringen<sup>2</sup> og i Stortingsmeldingen "Vilje til forskning" klare signaler om at de ønsker en styrket satsning på forskning og et nærere samarbeid mellom forskningsinstitusjoner og næringslivet. Gjennom ulike satsningsprosjekter ønsker regjeringen å skape insentiver for å oppnå målsetningen om at forskningsinnsatsen skal være 3 % av bruttonasjonalprodukt (BNP) innen år 2010 [5]. Staten skal stå for 1 % av disse midlene, mens det er tenkt at næringslivet skal bistå med de resterende 2 %. Denne rapporten peker på viktige faktorer som kan være med på å motivere næringslivet til å bidra med midler i en tidlig fase av aktuelle forskningsprosjekter, og utdyper noen av motivene for hvorfor det økte samarbeidet er viktig også for offentlige forskningsinstitusjoner.

### Formål

Hovedformålet med rapporten er å gi en lettfattelig presentasjon av viktige prinsipper og nye fenomener ved metamaterialer, presentere fremtidige aktuelle bruksområder, samt å vurdere disse i et kommersialiseringsperspektiv. Rapporten har ikke til hensikt å gå i dybden på alle aspektene ved en kommersialiseringsprosess, da det vil bli for omfattende.

---

<sup>2</sup> Dokument som klargjør den politiske plattformen til koalisjonsregjeringen, september 2005 [4].

## Kommersialisering av metamaterialer

Det finnes en rekke ulike kommersialiseringsmodeller som definerer faser, milepæler og aktiviteter i en kommersialiseringsprosess. Denne rapporten presenterer og tar utgangspunkt i Goldsmiths modell – en anerkjent modell som ofte brukes i forbindelse med kommersialisering av forskningsresultater. Inspirasjon er også hentet fra Oklahoma kommersialiseringsmodell, som i hovedsak er en videreutvikling av Goldsmiths modell.

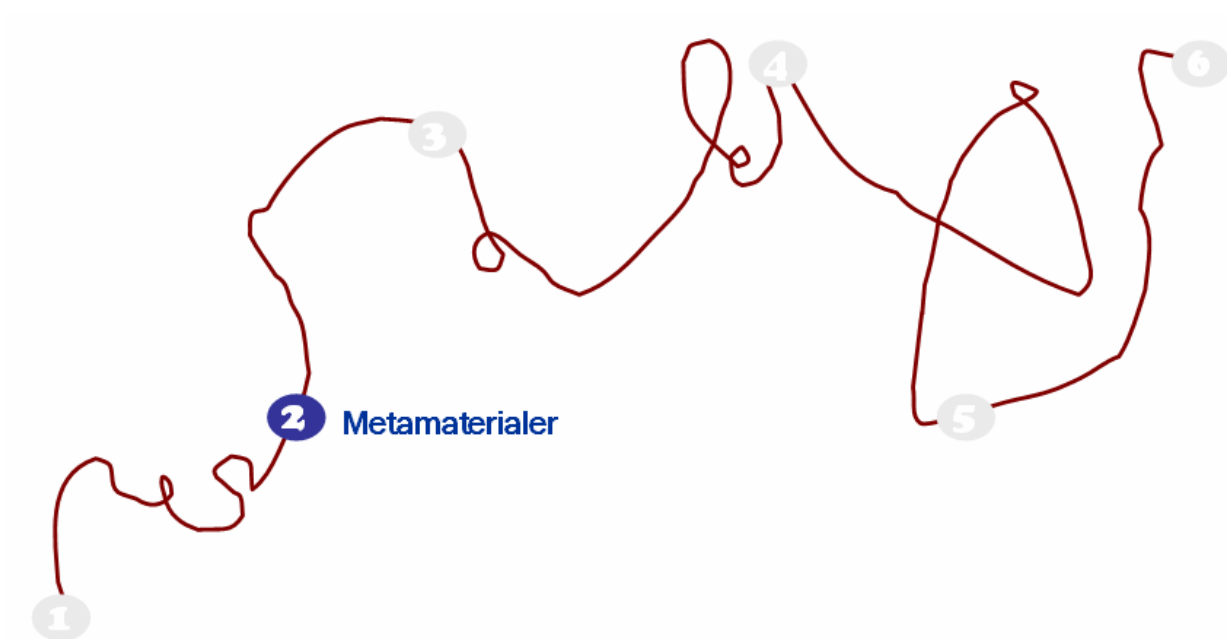
### Disposisjon

Kapittel 2 er en gjennomgang av metamaterialer, som omfatter både historisk utvikling, viktige fysiske prinsipper, teknologiske utfordringer og framtidige aktuelle anvendelser. Kapittel 3 er en gjennomgang av Goldsmiths kommersialiseringsmodell, og denne brukes i veiledningen til kommersialisering av metamaterialer i kapittel 5. I kapittel 4 gjennomgås spesifikke forhold som gjelder for kommersialisering av forskningsresultater, både med tanke på potensialet, ulike utfordringer og tiltak for å møte disse. Avslutningsvis konkluderes det i kapittel 6.

Som en innledning til noen av hoved- og underkapitlene brukes sitater relatert til kapittelets tema.



## Kommersialisering av metamaterialer





# 2 METAMATERIALER

Dette kapitlet danner den teoretiske hoveddelen av rapporten og er en oppsummering av metamaterialer, med tanke på den historiske utviklingen, viktige fysiske prinsipper og teknologiske anvendelser. I tillegg pekes det på en rekke teknologiske utfordringer som utviklingen av metamaterialer foreløpig står ovenfor og som er forutsetninger for at noen av de nevnte anvendelsene skal kunne realiseres. Til slutt redegjøres det for mulige framtidige kommersielle bruksområder der metamaterialer kan benyttes.

## 2.1 Bakgrunn og grunnleggende prinsipper

I 1968 publiserte Viktor Veselago et arbeid [6] der han hevdet at det var teoretisk mulig at et homogent, isotropt elektromagnetisk materiale kunne ha simultant negative realverdier for permittiviteten  $\epsilon$  og permeabiliteten  $\mu$ . Veselago forutså at dette ville medføre en del bemerkelsesverdige fundamentale egenskaper, som negativ brytning og fokuseringsevne i det hypotetiske materialet. Siden denne type materialer ikke var tilgjengelige på dette tidspunktet ble konseptene nevnt ovenfor, og de påfølgende elektromagnetiske og optiske konsekvensene, ikke videre utforsket før Smith og Schultz[7] klarte å konstruere den første metamaterialestrukturen eksperimentelt i 2000. Pendry hadde kort tid i forveien foreslått hvordan dette kunne gjøres [8]. Eksperimenter i starten av dette årtusenet bekreftet Veselagos antakelser, men resultatene var kontroversielle, og det tok lang tid før konseptene oppnådde bred anerkjennelse. Dette skjedde først i 2003 [9], og etter dette har en rekke forskningsgrupper videreutviklet resultatene, og kommet fram til nye applikasjoner.

For å forstå prinsippene bak metamaterialenes egenskaper, er det nødvendig med en teoretisk gjennomgang av materialeegenskaper og materialrespons. I forbindelse med metamaterialer er det ofte snakk om at et materiale er prinsipielt realiserbart. For å få en forståelse for hva dette innebærer, gjennomgås prinsipper for kausalitet.

### 2.1.1 Materialeegenskaper

Ethvert materiale kan beskrives ved hjelp av ulike parametere og størrelser. Egenskapene som bestemmer et materiales brytende effekt på et innkommende elektromagnetisk felt, er i stor grad bestemt av den dielektriske permittiviteten  $\epsilon$  og den magnetiske permeabiliteten  $\mu$ [10]. Permittiviteten og permeabiliteten er knyttet til sine respektive susceptibiliteter gjennom

relasjonene:  $\chi_\epsilon = \epsilon - 1$  og  $\chi_\mu = \mu - 1$ . Disse tilhørende susceptibilitetene brukes ofte for å beskrive sammenhengen mellom henholdsvis elektrisk felt og polarisering, og magnetisk felt og magnetisering. Permittiviteten er et mål på hvordan atomene i et materiale polariseres som respons på et påtrykt elektrisk felt, mens permeabiliteten er et tilsvarende mål på magnetisering

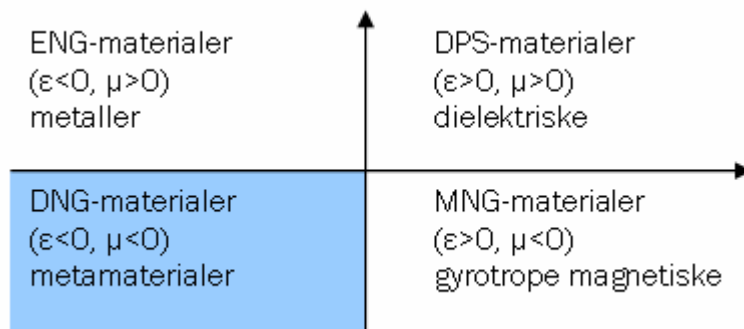
## Kommersialisering av metamaterialer

som respons på et påtrykt magnetisk felt. Disse verdiene kan være skalarer eller vektorstørrelser, avhengig av materialet som påvirkes. Verdiene varierer normalt med ulike faktorer som temperatur, fuktighet, plassering i mediet og ikke minst bølgelengden til det innkommende elektromagnetiske feltet. I konvensjonelle medier bestemmes parametrenes verdi av effektiv masse, ladnings- og elektrontetthet [11].

I naturlige materialer representerer altså permittiviteten  $\epsilon$  og permeabiliteten  $\mu$  atomenes gjennomsnittlige respons på et påtrykt elektromagnetisk felt, og gjelder for alle bølgelengder større enn avstanden mellom de gitte atomene. Ved konstruksjon av metamaterialer gjøres noen viktige endringer. Atomene betraktes som en del av større strukturer med mange atomer i hver gruppe. Den effektive  $\epsilon$  og  $\mu$  representerer da snittverdier for responsen som er gyldig for bølgelengder større enn disse sub-enhetene. Hvis dette kravet til størrelse er oppfylt, kan egenskapene til den sammensatte komplekse strukturen uttrykkes som den effektive responsen på et påtrykt elektromagnetisk felt. Feltet "ser" et homogent materiale og det er geometrien i metamaterialet som overstyrer den effektive massen, ladnings- og elektrontettheten, slik at det oppstår nye responser, som ikke finnes i naturen [12]. Denne egenskapen kalles "effektiv homogenitet", og ut fra denne kan mange andre og svært lovende karakteristikk utledes. Metamaterialer oppfører seg som naturlige materialer, med klart definerte parametere og for et elektromagnetisk felt er det ingen grunnleggende forskjell mellom et naturlig dielektrisk materiale og metamaterialet. Den eneste forskjellen er av kvantitativ karakter: I mikrobølgespekteret er forholdstallet mellom den molekylære gitterlengden  $a$  og bølgelengden,  $a/\lambda$ , tilnærmet  $10^{-9}$  i naturlige materialer, mens det tilsvarende tallet for metamaterialer er  $10^{-1} - 10^{-2}$  [13].

Definisjonen av de makroskopiske parameterverdiene  $\epsilon$  og  $\mu$  gjør det mulig å klassifisere materialene. En slik inndeling av passive materialer er vist i tabellen under.

## Kommersialisering av metamaterialer



Figur 2.1 Materialklassifisering

Kjært barn har mange navn, og det brukes ulike terminologi i forbindelse med metamaterialer. I de fleste materialer som tradisjonelt blir brukt i optikken har permittiviteten og permeabilitet positiv realdel. Dette er dielektriske materialer, som vist i 1. kvadrant i diagrammet. Det er hensiktsmessig å gi denne typen materiale benevnelsen dobbelt positive (DPS)-materialer. Det finnes et fåtall naturlige materialer der en av materialparametrene har negativ

realdel. Eksempler på dette er metaller, som har  $\text{Re } \epsilon(\omega) < 0$  ved optiske frekvenser, som vist i 2. kvadrant. Disse materialene kalles her epsilon-negative (ENG)-materialer. Antiferromagnetiske systemer, eller gyrotrope magnetiske systemer, hvor  $\text{Re } \mu(\omega) < 0$  for relativt sett lave frekvenser (2. kvadrant), får benevnelsen mu-negative (MNG)-materialer<sup>3</sup>. Det finnes ikke kjente naturlige materialer med simultant negativ respons for både permittiviteten og permeabiliteten ved en gitt frekvens. For å få dette til må metamaterialer benyttes og denne typen materialer er det hensiktsmessig å betegne dobbelt negative (DNG) materialer. Benevningene over er valgt fordi navnet vektlegger de fundamentale egenskapene som beskriver materialet.

Fremgangsmåten for å produsere metamaterialer kan variere noe, men de grunnleggende prinsippene er like. Metamaterialet må bestå av gjentatte elementer som simulerer responsen til et plasma, samtidig som det gir opphav til sterk magnetisk resonans<sup>4</sup>. Materialet består derfor av ulike deler, som hver for seg gir opphav til henholdsvis permittiviteten og permeabiliteten. Ved hjelp av tynne dielektriske tråder i gitterformasjoner, kan responsen til plasma simuleres og dermed oppnås negativ permittivitet. Det kan ikke produseres en magnetisk analog til denne plasmastrukturen, siden det ikke finnes magnetiske monopoler i naturen [9]. Den negative permeabiliteten må derfor framstilles ved hjelp av en "split-ringstruktur" i gitterformasjoner.

Materialer med negativ permittivitet (ENG)-materialer, er som nevnt kjent fra naturen, og er lettere å konstruere enn materialer med negativ permeabilitet.

<sup>3</sup> ENG- og MNG-materialer kan også klassifiseres som metamaterialer når de produseres kunstig for nye frekvensområder. Dette er også et forskningsområde med lovende resultater, men dette behandles ikke videre i denne rapporten.

<sup>4</sup> Det henvises til [9] (Negative Refraction) for mer litteratur omkring produksjon av metamaterialer.

## Kommersialisering av metamaterialer

Det er derfor verdt å nevne at det for tiden utføres forskning i forbindelse med ENG-materialer, der den ønskede effekten er å oppnå negativ permittivitet ved andre frekvenser enn det som er tilgjengelig i naturen, og derigjennom utvikle nye applikasjoner.

Denne rapporten omhandler i hovedsak passive materialer. Disse materialene karakteriseres i tillegg til materialegenskapene nevnt ovenfor, gjennom kompleksiteten. Positiv imaginærdel innebærer at materialene har tap, og er en forutsetning for passive materialer.



Figur 2.2 Dobbelt negativt materiale<sup>5</sup>

Bildet viser et metamateriale med split-ring struktur som gir opphav til negativ magnetisk respons og tynne dielektriske tråder som simulerer plasma, og dermed kan gi opphav til negativ elektrisk respons. Sidene i de forskjellige cellene er omtrent 10 mm, og gir ønsket negativ respons for frekvenser rundt 10 GHz [9]. I avsnittet under gjennomgås metamaterialenes respons ytterligere.

### 2.1.2 Respons og simulering

Permittiviteten og permeabiliteten er generelt frekvensavhengige, komplekse og analytiske funksjoner. Mange materialer kan beskrives ved hjelp av en sum av flere Lorentzfunksjoner som illustrerer frekvensavhengigheten til

funksjonene  $\epsilon = \epsilon(\omega)$  og  $\mu = \mu(\omega)$ . Permittiviteten og permeabiliteten vil da være en funksjon av  $f$ , der  $f$  for eksempel er gitt av:

---

<sup>5</sup> Bildet er hentet fra [9].

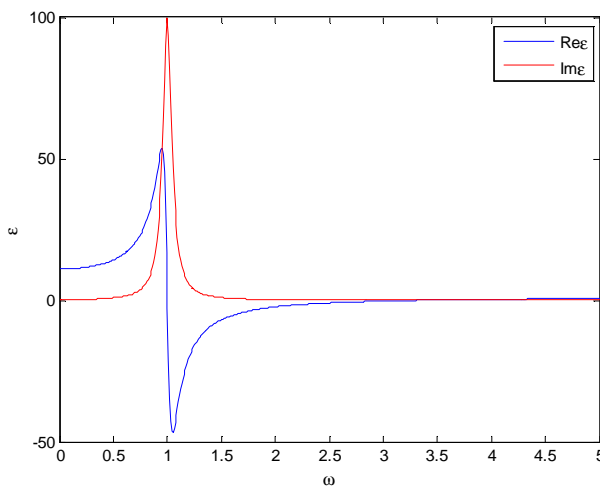
## Kommersialisering av metamaterialer

$$f(\omega) = \frac{F\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma} \quad (2.1)$$

F er her et uttrykk for forsterkning og  $\Gamma$  uttrykker båndbredden til resonansen mens  $\omega_0$  er resonansfrekvensen. Ved å variere verdien til parametrene F og  $\Gamma$ , samt å variere funksjonens beskaffenhet i definisjonen av permittivitet og permeabilitet, kan denne Lorentzfunksjonen være med på å representere et aktivt eller passivt materiale [14]. Det er likevel ikke alltid hensiktsmessig å bruke Lorentzfunksjonen, da den ikke beskriver alle materialer like godt.

I denne modellen er atomene og molekylene i det virkelige materialet erstattet med ett sett av harmonisk bundne oscillatorer, som er resonante ved en viss frekvens,  $\omega_0$ . Ved frekvenser langt unna resonansfrekvensen vil et påtrykt elektrisk felt flytte elektronene fra den positive kjernen, og induserer en polarisering i samme retning som det påtrykte feltet. Ved frekvenser nær resonansen blir polarisasjonen veldig høy. Dette er typisk ved resonansfenomener og representerer akkumulasjon av energi over flere sykluser, slik at en betydningsfull mengde energi i forhold til det påtrykte feltet

lagres i mediet. Den samlede energien fra et felt i området ved  $\omega_0$  blir så stor at det ikke vil ha noen effekt på polariseringen å skifte fortegn på det påførte feltet. En analog representasjon gjelder for magnetfeltet. Dette betyr at responsen skifter fra å være i-fase til ut-av fase med det innkommende feltet gjennom resonansområdet. Dette betegnes som negativ respons, når verdiene til materialeegenskapene er under nullpunktet [12]. Godt utviklede simuleringsverktøy gjør det mulig å simulere vilkårlige materialer, og undersøke deres egenskaper teoretisk før man setter i gang reelle og kostbare eksperimenter.



Figur 2.3 Negativ respons

## Kommersialisering av metamaterialer

Figuren viser den negative responsen til et ikke-magnetisk materiale<sup>6</sup>. Her er Lorentzfunksjonen benyttet for å simulere responsen. På grunn av at denne modellen er resonant, vil den reelle delen av susceptibiliteten og dermed også permittiviteten kunne være negativ i et smalt frekvensspekter, rett ovenfor resonansfrekvensen. En annen simuleringsmodell som er mye brukt er "Drudemodellen", som kan ha negativ realdel for et bredere frekvensspekter, og foretrekkes derfor i en del sammenhenger der metamaterialer simuleres[15]. Drudemodellens simuleringer er også betraktelig raskere for materialer med lite tap, fordi Lorentzmodellens resonansområde der permittivitet og permeabiliteten er negativ, er mye smalere og dermed trenger modellen lengre tid til å komme i likevekt (steady state)<sup>7</sup>.

Metamaterialer representerer på mange måter et paradigmeskifte i fysikken, i den forstand at det nå i prinsippet er mulig å skreddersy et materiale slik at de grunnleggende parameterverdiene  $\epsilon$  og  $\mu$  utviser en hvilken som helst ønskelig effektiv respons. Numeriske simuleringer blir derfor et svært viktig hjelpemiddel i utviklingen av metamaterialer, for å komme fram til ønskede verdier og responser. Eksperimenter med metamaterialer må likevel være tuftet på et matematisk fundament. Selv om det ser ut som en rekke fysiske lover blir opphevet av metamaterialer, må materialene tilfredsstillende de samme kravene som konvensjonelle materialer, for å være realiserbare. Disse kravene gjennomgås i kapittelet under.

### 2.1.3 Kausalitetsprinsippet

Materialegenskapene nevnt i kapittel 2.1.1 må oppfylle noen spesifikke krav, for at materialene de beskriver skal være prinsipielt realiserbare. Dette er naturlig nok en forutsetning for at det skal være hensiktsmessig å forske videre på et spesifikt materialtilfelle.

For at et materiale skal være prinsipielt realiserbart, må susceptibilitetsfunksjonene være analytiske[14]. En funksjon betegnes som analytisk hvis funksjonen er kvadratisk integrerbar langs den reelle frekvensaksen:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |G(\omega)|^2 d\omega < \infty$$

I tillegg må en funksjon som ønsker å beskrive et realiserbart materiale tilfredsstillende ekvivalente krav til kausalitet og asymptotisk oppførsel, og kan da

---

<sup>6</sup> Figuren er hentet fra prosjektoppgaven "Innledende studie til bølgeleder med aktivt metamateriale" skrevet av undertegnede vinteren 2007.

<sup>7</sup> Det henvises forøvrig til boken Metamaterials kap 1.3 for ytterligere detaljer omkring selve simuleringen.



## Kommersialisering av metamaterialer

beskrives gjennom et hilberttransformpar som utgjør Kramers-Kronigs relasjon<sup>8</sup>.

Susceptibiliteten er definert for negative frekvenser gjennom

symmetrirelasjonen  $\chi(-\omega) = \chi^*(\omega)$ . Funksjonen må være symmetrisk for at den inverse Fouriertransformen skal være reell. [10] Den elektriske permittiviteten  $\epsilon = \epsilon(\omega)$  og den magnetiske permeabiliteten  $\mu = \mu(\omega)$  er komplekse funksjoner, som oppfyller de samme kravene som susceptibiliteten [14]. De er dermed underlagt de samme symmetriegenskapene som susceptibiliteten og de inverse fouriertransformene er reelle.

Kausalitet er et begrep som i fysikken innebærer at virkningen ikke kan komme før årsaken i tid. Alle lineære og tidsskift-invariante fysiske systemer er kausale. Ethvert elektromagnetisk medium må derfor være kausalt i mikroskopisk forstand, slik at polarisasjon og magnetisering ikke kan gå foran henholdsvis det elektriske og magnetiske feltet. Dette kalles primitiv kausalitet [16].

Ved simuleringer av ikke-dispersive<sup>9</sup> DNG-materialer, viser det seg at den resulterende virkningen ikke er kausal [13]. Ikke-kausle resultater er ufysiske, og det er derfor klart at et passivt metamateriale må være dispersivt for å kunne realiseres.

Som nevnt over er permittiviteten og permeabiliteten komplekse funksjoner, som er avhengig av frekvens. Selv om de brytende egenskapene til et materiale er definert av disse to parameterne, er det hensiktsmessig og vanlig,

å samle disse begrepene i materialets brytningsindeks  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ . Det er klart at også brytningsindeksen varierer med frekvens i dette tilfellet og dermed blir DNG-materialene også dispersive. Funksjonenes kompleksitet representerer de fysiske egenskapene gjennom at imaginærdelen i funksjonen tilsvarer det tap som alltid vil være til stede i passive fysiske materialer. Dette innebærer at materialene (også metamaterialer) som behandles her, har positiv imaginærdel, selv om tapene kan være små<sup>10</sup>.

Kravet til kausalitet, og dermed dispersjon i DNG-materialer, resulterer i praksis med at analysen bare er gyldig for en veldig smal pulsbandbredde[13]. Dette er også tilfellet i alle eksperimentelle resultater så langt. Sagt på en annen måte er dispersjonen i DNG-materialer ansvarlig for en dynamisk restrukturering av en puls, slik at kausalitet opprettholdes.

---

<sup>8</sup> Kramers-Kronigs relasjon er et uttrykk for en bestemt sammenhengen mellom den imaginære og den reelle delen av funksjon. Denne relasjonen gjelder for alle fysiske materialer.

<sup>9</sup> Dispersjon er betegnelsen på at de ulike frekvenskomponentene til et elektromagnetisk felt brytes ulikt i et materiale, på grunn av at brytningsindeksen varierer med frekvens.

<sup>10</sup> Når det flere steder refereres til negative parameteregenskaper, er det underforstått at det er realdelen det refereres til.

### 2.2 Nye fenomener

*"Ingenting er så praktisk som en god teori"*

Kurt Lewin, 1945

Etter at Pendry og Smith forklarte og viste hvordan det var mulig å framstille kunstige metamaterialer med negative verdier for både permittiviteten  $\epsilon$  og permeabiliteten  $\mu$ , har flere tidligere vedtatte sannheter innen optikken blitt revurdert og modifisert. Enkelte fenomener i den klassiske fysikken reverseres i DNG-materialer, slik som negativ brytning. Mange andre fenomener utledes fra dette viktige prinsippet. Det har også vist seg at mange av de mest spennende effektene har utspring i det som skjer i overgangen mellom et konvensjonelt DPS-materiale og nye DNG-materialer. De antatt viktigste fenomenene og effektene kjent til nå, som blir mulig ved hjelp av metamaterialer gjennomgås under.

#### 2.2.1 Antiparallele hastigheter

Lys og andre elektromagnetiske bølger som propagerer i et medium kan uttrykkes som en lineær kombinasjon av monokromatiske plane bølger gitt

som:  $\vec{E}(\vec{r}) = E_0 \exp(i\vec{k}r + \omega t)$  og  $\vec{H}(\vec{r}) = H_0 \exp(i\vec{k}r - \omega t)$ , hvor leddene er

uttrykk for henholdsvis det elektriske- og det magnetiske feltet. I dette tilfellet

er  $\vec{k} = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$  bølgetallet,  $\omega$  er vinkelfrekvensen, mens  $E_0$  og  $H_0$  er konstanter.

For enkelhets skyld kan det antas at materialet er tilnærmet tapsfritt,

$\text{Im } \epsilon \approx 0$  og  $\text{Im } \mu \approx 0$ , slik at materialeegenskapene i dette tilfellet blir reelle størrelser. Feltfordelingen til en slik plan bølge som propagerer gjennom et DNG-materiale kan finnes ved å benytte seg av Maxwells curllikninger<sup>11</sup> i frekvensdomenet. For lineære medier i områder uten fri ladning eller strøm gjelder likningssettet:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= j\omega\epsilon\vec{E} \\ \nabla \times \vec{E} &= -j\omega\mu\vec{H}\end{aligned}\quad (0.1)$$

Når uttrykkene for det elektriske- og magnetiske feltet subsidieres inn i likningssettet ovenfor, resulterer det i følgende uttrykk:

---

<sup>11</sup> I læreboken Understanding Physics kap. 18 utledes Maxwells likninger. Likningene uttrykker fundamentale sammenhenger i elektromagnetismen, og gir uttrykk for hvordan de elektriske- og magnetiske feltene oppfører seg i forhold til hverandre.

## Kommersialisering av metamaterialer

$$\begin{aligned}\vec{k} \times \vec{E} &= \omega \mu \vec{H} \\ \vec{k} \times \vec{H} &= -\omega \epsilon \vec{E}\end{aligned}\quad (0.2)$$

Siden realverdiene til  $\epsilon$  og  $\mu$  i dette tilfellet er negative, blir det klart at  $\vec{k}$  som her er bølgevektoren og  $\vec{E}$ -og  $\vec{H}$ -feltet ikke lenger følger den såkalte høyrehåndsregelen, men i stedet inngår i et venstrehånds vektorsystem. De negative materialverdiene i dette likningssettet tilsvarer å endre fortegnet til det magnetiske feltet, men beholde samme bølgevektor. Dette er bakgrunnen for at dobbelt negative metamaterialer ofte blir kalt venstrehåndsmaterialer. Energistrømmen i den elektromagnetiske bølgen er gitt av Poyntings vektor  $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$  [17]. Denne vektoren er upåvirket av at fortegnet til  $\epsilon$  og  $\mu$  skifter fortegn, og inngår fortsatt i et konvensjonelt høyrehånds vektorsystem sammen med  $\vec{E}$ -feltet og  $\vec{H}$ -feltet.

I elektromagnetismen deles det ofte inn i ulike typer hastigheter.

Fasehastigheten til en elektromagnetisk bølge  $v = f\lambda = \omega/k$ , er hastigheten til "bærebølgen" eller bølgefrontene, og omtales ofte som bølgehastigheten. Her

er  $f$  et uttrykk for bølgens frekvens. Gruppest hastigheten  $v_g = \Delta\omega/\Delta k$  er hastigheten til bølgepakken, eller pulsene. Dette er hastigheten til envelopen som modulerer bølgefrontenes amplitude, og den hastigheten bølgens energi transporteres med [18]. Siden disse to hastighetene assosieres med hver sine egenskaper er de tilordnet hver sin vektor i vektorsystemet, henholdsvis

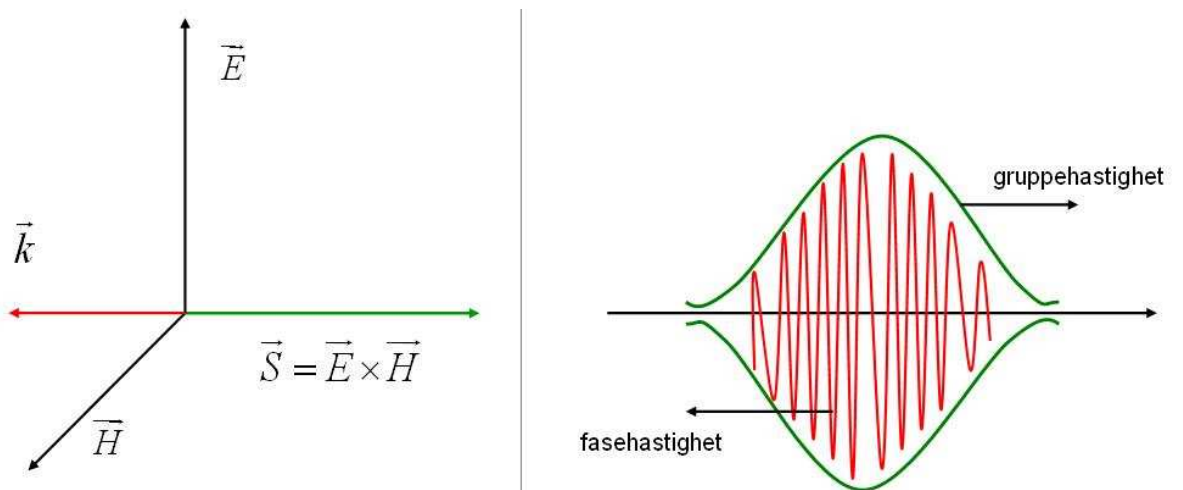
bølgetallet  $\vec{k}$  og Poyntings vektor  $\vec{S}$ . Dette innebærer at fasehastigheten og gruppest hastigheten til en elektromagnetisk bølge i et passivt DNG-materiale er motsatt rettet. Dette benevnes ofte som bakovergående bølge<sup>12</sup>, selv om det "kun" er fasehastigheten som er motsatt rettet, i forhold til energiforplantningen.

---

<sup>12</sup> I [14] vises det at det er prinsipielt mulig å realisere aktive metamaterialer hvor både  $\vec{k}$  og  $\vec{S}$  peker i samme retning, mot kilden.



## Kommersialisering av metamaterialer

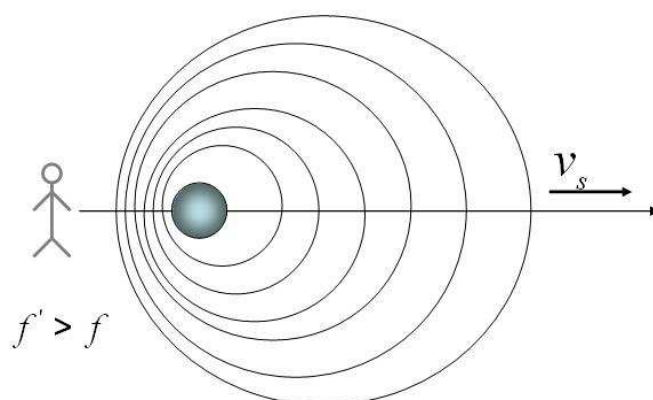


Figur 2.4 Vektordiagram og tilhørende hastigheter

De antiparallelle hastighetene medfører som nevnt tidligere at andre fenomener fra optikken reverseres. Det får blant annet konsekvenser for den velkjente Dopplereffekten. Når en kilde og/eller en mottaker er i relativ bevegelse i forhold til et medium der det propagerer en periodisk bølge, vil bølgens frekvens målt av mottakeren være ulik kildefrekvensen [18] Hvis mottakeren for enkelhets skyld er i ro, uttrykkes mottakerens målte frekvens  $f'$  ved hjelp av uttrykket:

$$f' = \frac{v}{v - v_s} f \quad (0.3)$$

I dette tilfellet er  $v_s$  kildens bølgehastighet, som vil bli motsatt rettet i et DNG-materiale. Mottakeren vil derfor oppleve en høyere frekvens, hvis en kilde med en gitt frekvens  $f$  beveger seg i et DNG-materiale, bort fra mottakeren.



Figur 2.5 Motsatt dopplereffekt

## Kommersialisering av metamaterialer

Den motsatt rettede fasehastigheten er i også ett av grunnprinsippene bak en svært spennende effekt, som kalles fasekompensering. Dette fenomenet behandles spesifikt i underkapittel 2.2.5.

### 2.2.2 Negativ brytning

Negativ brytning kan så langt i metamaterialenes historie betraktes som det mest omtalte nye prinsippet. Det finnes flere fremgangsmåter for å komme fram til resultatet. Gjennomgangen under er en intuitiv fortsettelse av utledningen i avsnitt 2.2.1 og gjelder for passive materialer<sup>13</sup>.

Brytningsindeksen er gitt ved  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ . Det presiseres igjen at både permittiviteten og permeabiliteten er generelt er komplekse størrelser, slik at også brytningsindeksen blir kompleks, med positiv imaginærdel i det passive tilfellet.

En plan monokromatiske bølge som gitt i avsnitt 2.2.1, propagerer fra et konvensjonelt DPS-materiale ( $\text{Re } \epsilon > 0$  og  $\text{Re } \mu > 0$ ) og over i et DNG-materiale.

Siden vektorene  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  og  $\vec{k}$  står vinkelrett på hverandre, kan uttrykket i likningssett (2.2) forenkles:

$$\begin{aligned} kE &= \omega\mu H \\ kH &= \omega\epsilon E \end{aligned} \quad (0.4)$$

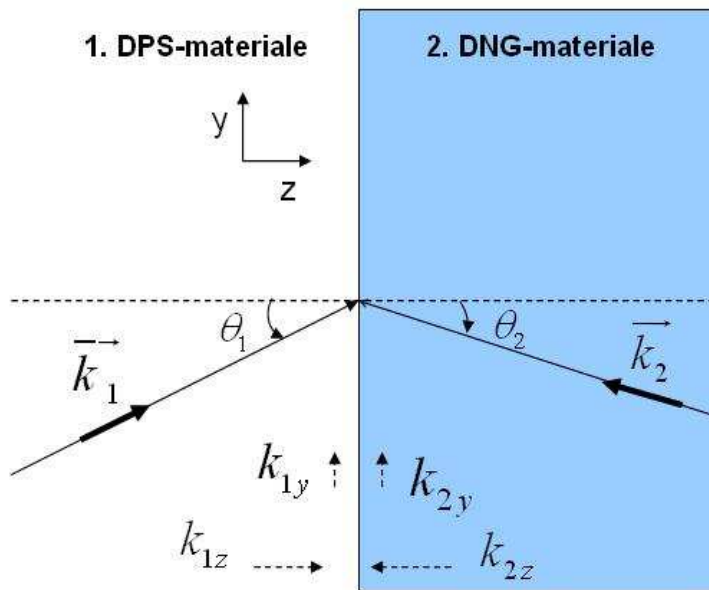
Ved å multiplisere disse to likningene blir det klart at den elektromagnetiske bølgen i et DNG-materiale fortsatt har en veldefinert bølgevektor [Veselago]:

$$k^2 = \epsilon\mu\omega^2 \quad (0.5)$$

Brytningsindeksen ( $n \equiv c_0/c$ ) tilfredsstiller definisjonen  $n^2 = \epsilon_r\mu_r$ . Siden  $(\omega/k)^2 = 1/\epsilon_r\mu_r$  er  $n^2 = c_0^2/(\omega/k)^2 = \epsilon_r\mu_r$ . [tutorial]. Her er  $c_0$  lyshastigheten i vakuum, mens  $c$  er lysets hastighet i materialet. I det konvensjonelle tilfellet velges nå det positive fortegnet for brytningsindeksen, men som eksempelet nedenfor viser, blir dette motsatt for dobbelt negative materialer.

---

<sup>13</sup> For en utførlig gjennomgang av en generell betingelse for fortegnet til brytningsindeksen til både passive og aktive materialer henvises til [14] Johannes Skaar viser her at det ikke nødvendigvis er en direkte sammenheng mellom negative parameteregenskaper og negativ brytningsindeks. Ved hjelp av aktive metamaterialer er det også prinsipielt mulig å produsere DPSmaterialer, som samtidig har negativ brytningsindeks for et gitt frekvensområde.



Figur 2. 6 Negativ brytning i DNG-materiale

Grenseflaten mellom de to ulike materialene ligger i  $xy$ -planet, og  $z$ -aksen peker inn i DNG-materialet. DNG-materialet er fortsatt et ideelt tilnærmet tapsfritt materiale slik at  $n_2 \rightarrow -1$ . DPS-materialet kan for enkelhets skyld være vakuum, slik at  $n_1 = 1$ . Maxwells likninger og krav til kausalitet bestemmer feltfordelingen i DNG-materialet. Grensebetingelsene i overgangen mellom materialene krever at tangensialkomponentene til E- og H-feltet skal være kontinuerlige. Dette er for å oppnå fasematch, og er oppfylt hvis  $k_{1y} = k_{2y}$ . For å unngå akkumulering av energi i grenseflaten, må Poyntings vektor være rettet bort fra grenseflaten i DNG-materialet. Dette er kausalitetskravet og innebærer at bølgevektoren til den transmitterte bølgen må ha en negativ  $z$ -komponent i DNG-materialet, for at fasehastigheten og gruppehastigheten skal være motsatt rettet. Av figur 2.6 framgår det derfor at den transmitterte strålen er brutt på samme side som normalen til den innfallende strålen. Dette fører til at Snells lov kan skrives som normalt:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (0.6)$$

I dette ideelle teoretiske tilfellet med  $n_1 = 1$  og  $n_2 \rightarrow -1$  blir  $\theta_1 = -\theta_2$ , og negativ brytning er påvist. Det er klart at så lenge  $n_2 < 0$  vil brytningsvinkelen være negativ.

## Kommersialisering av metamaterialer

Et annet likningssett kjent fra den klassiske optikken er Fresnels likninger<sup>14</sup>, som gir et uttrykk for refleksjons- og transmissjonskoeffisientene til et elektromagnetisk felt i overgangen mellom to materialer [17]. Hvis en monokromatisk plan bølge i et materiale med parametre  $\epsilon_1$  og  $\mu_1$  propagerer mot et materiale med parametrene  $\epsilon_2$  og  $\mu_2$ , blir bølgevektoren i de respektive materialene  $k_1 = (0, k_{1y}, k_{1z})$  og  $k_2 = (0, k_{2y}, k_{2z})$ . Feltet til den innfallende bølgen kan uttrykkes  $\vec{E} = (E, 0, 0)$ , hvis det antas TE-polarisasjon. Ved hjelp av samme argumentasjon som i eksempelet med negativ brytning (fasematch og grensebetingelser) blir det klart at refleksjons- og transmissjonskoeffisientene for det elektriske feltet kan skrives som:

$$\begin{aligned} r &= \frac{\mu_2 k_{1z} - \mu_1 k_{2z}}{\mu_2 k_{1z} + \mu_1 k_{2z}} \\ t &= 1 + r \end{aligned} \quad (0.7)$$

Dette er generelle former av Fresnels likninger, gyldig for komplekse verdier [17][19].

Dette uttrykket kan omformes ved hjelp av trigonometriske relasjoner slik at:

$$\begin{aligned} r &= \frac{\eta_2 \cos \theta_1 - \eta_1 \cos \theta_2}{\eta_2 \cos \theta_1 + \eta_1 \cos \theta_2} \\ t &= 1 + r \end{aligned} \quad (0.8)$$

Her er  $\theta_{1,2}$  vinklene til henholdsvis den innfallende og den reflekterte strålen.

Bølgeimpedansen er gitt ved  $\eta_{1,2} = \sqrt{\mu_{1,2}/\epsilon_{1,2}}$ . Hvis ett av materialene får motsatt fortegn på brytningsindeksen, vil dette gi samme refleksjons og transmissjonskoeffisient, siden både  $\mu$  og  $k_z$  for det respektive materialet skifter fortegn. Ved å betrakte eksemplet ovenfor videre blir det klart at siden innfallsvinkelen og refleksjonsvinkelen er like, men med motsatt fortegn:

$\theta_1 = -\theta_2$ , blir telleren i Fresnels likninger (2.6) lik:

$$\sqrt{\frac{\mu_2 \mu_0}{\epsilon_2 \epsilon_0}} \cos \theta_1 - \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cos \theta_2 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cos \theta_1 - \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cos \theta_2 = 0$$

---

<sup>14</sup> Utleddet av Augustin- Jean Fresnel (1788-1827) og beskriver oppførselen til lys (og andre elektromagnetiske bølger) når det beveger seg mellom materialer med ulik brytningsindeks. For mer litteratur om Fresnels likninger henvises det til [17].

## Kommersialisering av metamaterialer

Det er altså ingen refleksjon i overflaten mellom DPS- og et DNG- materialene! I det ideelle tilfellet er  $r=0$  [20].

Denne oppdagelsen vil pirre de fleste nysgjerrighet i forhold til hva det egentlig er som skjer i overflaten mellom disse to materialene. Dette fenomenet gjennomgås nedenfor.

### 2.2.3 Overflatefenomenet og evanescent effekt

Mange av de mest bemerkelsesverdige fenomenene innen metamaterialforskning oppstår som følge av at et elektromagnetisk felt propagerer gjennom ulike lag av materialer, der fortegnet til materialparametrene veksler mellom å være positive og negative. Hva som skjer forklares på mange ulike måter i litteraturen, og under følger en kort gjennomgang av prinsippet.

Når en elektromagnetisk bølge med frekvens  $\omega$  propagerer mot et objekt av DNG-materiale er bølgevektoren gitt av likning 2.4. Sammenhengen mellom vektorkomponentene til bølgetallet  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  er dermed gitt ved:

$$k_z = \sqrt{\left(\frac{\omega^2}{c_0^2}\right) - k_x^2 - k_y^2} \quad (0.9)$$

Hvis  $\sqrt{k_x^2 + k_y^2} > \omega/c_0$  får  $k_z$  imaginær verdi og bølgen vil avta eksponentielt. Denne avtakende feltkomponenten blir ofte referert til som nærfeltet, eller det evanescente feltet. Dette feltet inneholder informasjon om de fineste detaljene i et objekt som belyses av en elektromagnetisk stråle, men propagerer ikke fritt [21] Den andre typen felt fra objektet som belyses av en elektromagnetisk stråle kalles fjernefeltet, og inneholder lavfrekvent informasjon. Dette feltet kan i motsetning til nærfeltet fanges opp av konvensjonelle linser og avbildningssystemer. Pendry hevdet allerede i 1999 at metamaterialer kan benyttes til å fange opp informasjon fra nærfeltet, og kontrollere dette feltet.

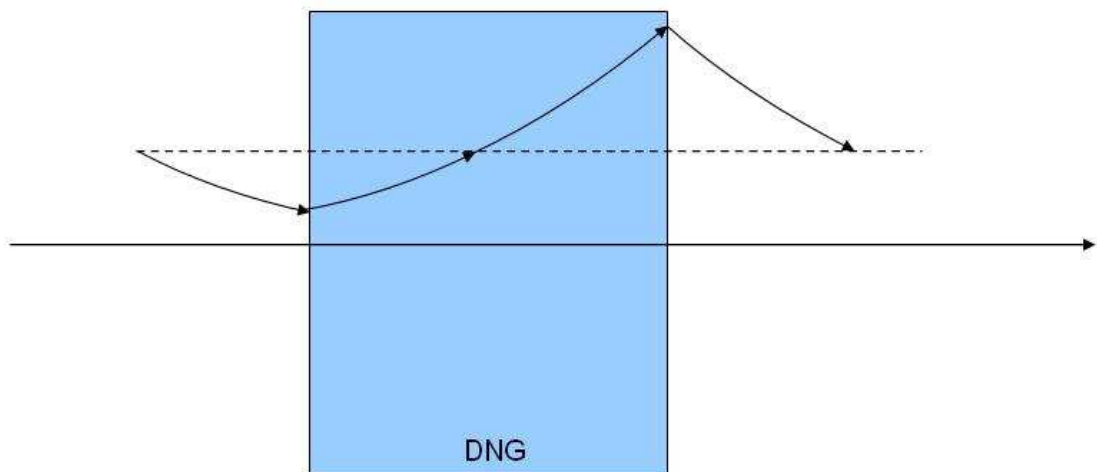
Nærfeltet er til stede i mange forskjellige sammenhenger. Et eksempel på viktigheten av dette er Van der Waals krefter- som er et tydelig bevis på at evanescente egenskaper gir opphav til en tiltrekningskraft, som kan ha stor virkning. Nærfeltet kan generelt betraktes som sterkt avtakende moder, med høyfrekvent romlig variasjon. For å kontrollere dette nærfeltet trengs materialer som kan reagere med disse høyfrekvente avtakende modene. Dette er tilfellet i overgangen mellom to materialer med motsatt fortegn for permittivitets- og permeabilitetsfunksjonen. I denne overgangen eksiteres



## Kommersialisering av metamaterialer

modene som overflateplasmoner<sup>15</sup>. Ritchie identifiserte i 1957 overflateplasmoner som elektromagnetiske tilstander i noen materialer (som metaller) som er bundet til overflaten, men som oscillerer i overflaten. Nøkkelen til at slike plasmoner kan eksistere, er at det tilstøtende materialet må ha negativ permittivitet (hvis det er snakk om elektriske eksitasjoner). Det magnetiske nærfeltet krever en tilsvarende egenskap, nemlig negativ permeabilitet [22].

De oscillerende overflateplasmonene gjør at selv de mest høyfrekvente bølgekomponentene, vil reagere i overflaten og resultere i resonans. Disse frekvenskomponentene opptrer som nesten helt rene elektriske og magnetiske felt uten koplinger mellom seg. Denne omtalte resonansen er årsaken til at et eksponentielt avtakende felt på den ene siden av overflaten blir et eksponentielt voksende felt på den andre siden. Resonansen forsterker det evanescente feltet og rekonstruerer det til tidligere verdier. Over tid kan resonansen bygge opp en betydelig amplitude av energi hentet fra bølgens kilde. Den største utfordringen for disse resonansene er absorpsjon. Det er derfor nødvendig å benytte seg av materialer med lite tap [13][15].



Figur 2.7 Eksponensiell effekt inne i DNG-materiale

Mekanismen bak denne overflateresonansen kan som nevnt forklares på flere måter, en mulighet er å bruke en analogi til kretselementer. Fenomenet er ekvivalent med strøm og spenningsdistribusjonen ved overgangen mellom en

<sup>15</sup> Overflateplasmoner ble første gang beskrevet av Ritchie i 1957, som en eksitasjon av elektronisk ladningstetthet på en overflate. Overflateplasmoner er kvasipartiklene som oppstår ved kvantisering av plasmaoscillering. Dette er analogt med fotoner og fononer som er resultatet fra kvantisering av lys- og lydølger.

spole og en kondensator ved resonans for en LC-krets<sup>16</sup>. Dette utnyttes i flere av applikasjonene behandlet i neste kapittel, og omtales derfor nærmere der.

Det er viktig å presisere at den voksende evanescente bølgen inne i DNG-materialet, ikke bryter med noen fysiske lover, siden dette er et imaginært felt, som ikke bærer med seg noen reell energi.

### 2.2.4 Fokuserende egenskaper

Ved å gjøre bruk av flere av flere av egenskapene nevnt tidligere, viste Pendry at en "perfekt linse" med uendelig oppløsning er en teoretisk mulighet. Veselago forutså riktignok også at en plate av DNG-materiale ville ha fokuserende egenskaper, men det var Pendry som fastslo muligheten for fokusering utover den fundamentale grensen for oppløsning, som tidligere har vært vedtatt som en absolutt begrensning.

Det er hensiktsmessig å ta med den perfekte linsen som et nytt fenomen, i stedet for en applikasjon. Dette er fordi dette i stor grad illustrerer et teoretisk idealisert tilfelle, samtidig som det gir en god intuitiv forståelse av andre aspekter ved de nye fenomenene.

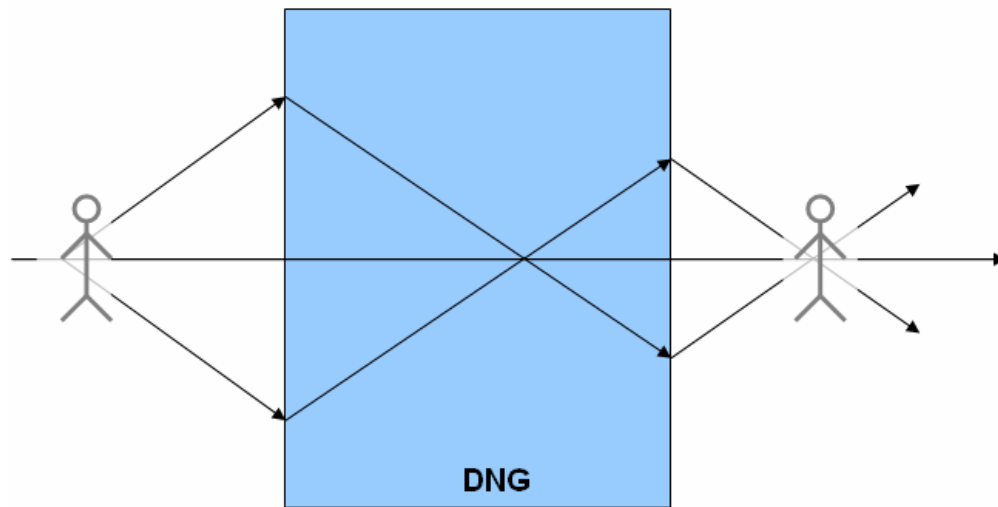
Fra likning (2.9) er det klart at oppløsningen for en konvensjonell linse er

begrenset til  $\sqrt{k_x^2 + k_y^2} = \omega/c_0 = \lambda$ . En konvensjonell linse kan altså ikke ha høyere oppløsning enn feltets bølgelengde i vakuum. Pendry analyserte billedannelse i en flat plate med ideelt DNG-materiale der  $\epsilon_r \rightarrow -1$  og  $\mu_r \rightarrow -1$ .

---

<sup>16</sup> Utdypende forklaringer på dette finnes i artikkelen "Physical Insight into the "Growing" Evanescent Fields of Double-Negative Metamaterial Lenses".

## Kommersialisering av metamaterialer



Figur 2.8 Fokuserende egenskaper i et DNG-materiale

I et dobbelt negativt materiale er det klart at de store detaljene med lave frekvenser altså fjernfeltet, fokuseres i henhold til Snells lov som impliserer negativ brytning. De små hørfrekvente detaljene, i det evanescente nærfeltet reskapes på grunn av den voksende eksponensielle effekten gjennomgått i kapittel 2.2.3. I tillegg til dette ble det i kapittel 2.2.2 påvist gjennom Fresnels likninger at det ikke er noen refleksjon i overflaten i det tapsfrie tilfellet. Disse samlede faktorene gjør at oppløsningen i prinsippet er uendelig.

Det er imidlertid en rekke skjær i sjøen for den såkalt "perfekte linsen" i form av viktige forutsetninger og begrensninger. Den første forutsetningen for at et bilde skal gjenskapes på andre siden av DNG-materialet er at tykkelsen til denne linsen må være minst like lang som lengden av propagasjonsdistansen utenfor linsen (figur 2.8). Hvis objektet som skal avbildes ikke ligger nærmere linsen, enn linsens tykkelse, vil bølgekomponentene ikke rekke å bli fokusert inne i linsen [9].

Hvis DNG-materialet har antydning til tap (noe alle reelle materialer har), er det nødvendig at linsen er veldig tynn. Kilden og dets bilde, må da nødvendigvis være veldig nære, henholdsvis foran og bak linsen. Dette vil derfor bli mer som en nærfelt-konstruksjon heller enn en perfekte linse-situasjon.

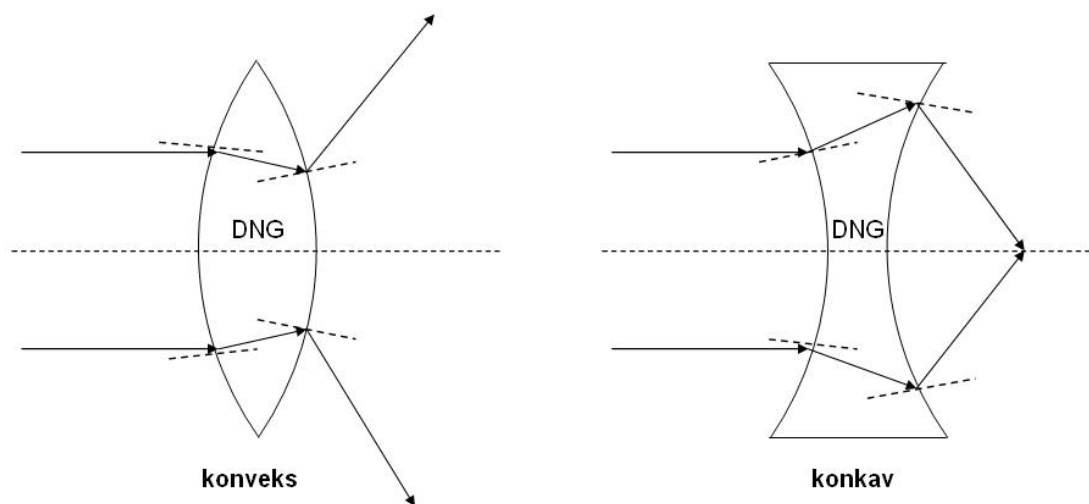
Det har altså blitt vist analytisk at perfekt oppløsning bare kan oppnås for frekvensuavhengige, tapsfrie materialer, hvor  $\epsilon = \mu = -1$ . Dette er som nevnt tidligere ufysisk. Selv om fokuserende egenskaper har blitt påvist, fører tilstedeværelsen av dispersjon til tap av energi for fokuseringsmekanismen, slik at bildet ikke blir perfekt [22]. Oppløsningen for en linse av DNG-materiale med tap, har blitt vist [19] å kunne uttrykkes som:

$$\Delta y = \frac{2\pi d}{|\ln(\text{Im} \epsilon)|} \quad (0.10)$$

Her er  $d$  linsas tykkelse. Dette betyr at det er mulig med veldig høy oppløsning for en linse av liten størrelse med lite tap.

Hovedpoenget er derfor at det er mulig å oppnå oppløsning som er bedre enn den tidligere fastsatte fundamentale grensen for oppløsning, selv med materialer med litt tap. DNG-materialenes dispersive natur gjør også i dette tilfellet at fokuseringsevnen gjelder for et veldig smalt frekvensspekter.

I tillegg til dette kan det nevnes at linser bestående av DNG-materiale vil ha motsatt effekt av det vanlige konvensjonelle linser har. Med andre ord vil en konveks linse av DNG-materiale har divergerende effekt, og en konkav DNG-linse vil ha konvergerende effekt. Dette er en direkte konsekvens av negativ brytning [13].



Figur 2.9 DNG-linser med motsatt effekt i forhold til konvensjonelle linser

### 2.2.5 Fasekompensasjon

En veldig interessant egenskap ved DNG-materialer er deres evne til å understøtte fasekompensering, eller fasebøyning på bakgrunn av den negative brytningsindeksen. Ved å videreføre eksempelet fra 2.2.2 kan dette vises. Den ene platen er DPS-materiale med positiv brytningsindeks  $n_1$  og tykkelse  $d_1$ , og den andre platen er tapsfritt DNG-materiale med brytningsindeks  $-|n_2|$  og tykkelse  $d_2$ . For enkelhets skyld er det antatt at materialene er tilpasset omgivelsene med tanke på impedans. For eksempel kan omgivelsene være vakuum. En monokromatisk plan bølge har normalt innfall mot dette plateparet. Etersom bølgen propagerer gjennom platen, vil faseforskjellen

## Kommersialisering av metamaterialer

mellom inngangen og utgangen til den første og den andre platen kunne

skrives som henholdsvis  $n_1 k_0 d_1$  og  $n_2 k_0 d_2$ , hvor  $k_0 \equiv \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ . Den totale faseforskjellen mellom forside og bakside for hele den sammensatte platen blir da:

$$\boxed{|n_1| k_0 d_1 - |n_2| k_0 d_2} \quad (0.11)$$

Dette impliserer at uansett hvilken faseforsinkelse som oppstår i den første platen, så kan den oppheves ved å fortsette propageringen gjennom den andre platen! [15] Hvis forholdet mellom  $d_1$  og  $d_2$  velges til  $d_1/d_2 = |n_2|/|n_1|$  for den aktuelle bølgens frekvens, så vil den totale faseforskjellen mellom begynnelsen av platen og enden være null. Dette betyr at DNG-materialet fungerer som en fasekompensator.

Det bør poengteres at en slik fasekompensering ikke avhenger av summen av platenes tykkelse, men heller forholdet mellom tykkelsen til de to forskjellige materialene. I prinsippet kan altså størrelsen  $d_1 + d_2$  være hva som helst, så lenge  $d_1/d_2$  tilfredsstiller kravet ovenfor. Bølgen som propagerer gjennom en slik type konstruksjon, opplever derfor ikke noen faseforskjell. Dette har også blitt bevist ved numeriske simuleringer, der det har blitt fastslått at intensiteten til det elektriske feltet i prinsippet kan beholdes over en tykkelse på  $4\lambda_0$  [22]. Her er metamaterialene som er simulert tilnærmet uten tap og DPS-laget har en brytningsindeks på  $n_{real}(\omega) = +3$  mens DNG-laget har en brytningsindeks på  $n_{real}(\omega_0) \approx -3$ .

### 2.2.6 Dispersjonskompensasjon

Som nevnt tidligere er DNG-materialene dispersive av natur, og dette er i tillegg påkrevd for at materialene skal oppfylle kravene til kausalitet (kapittel 2.1.3). Dette fenomenet kan benyttes til noe positivt, i form av dispersjonskompensasjon. Ettersom en bølge propagerer gjennom et DNG-materiale, produseres ulike gruppehastigheter for de ulike bølgekomponentene. Dette er også tilfellet for konvensjonelle dispersive DPS-materialer, og forårsaker signalforvrengning i transmisjonslinjer. Dette utgjør en utfordring for effektiviteten og signalkvaliteten i transmisjonslinjer.

Cheng og Ziolkowski har sett på muligheten for å bruke metamaterialer til å modifisere signaler som propagerer langs en transmisjonslinje [22]. Hvis en kunne kompensere for dispersjonen langs en slik linje, ville ikke signalene bli forvrengt. Dette ville medføre en forenkling av komponentene i mange transmisjonssystemer.



Cheng og Ziolkowski viser at dispersjonen i en transmisjonslinje teoretisk sett kan elimineres ved å korrigere for frekvensavhengigheten til den effektive permittiviteten som er tilknyttet en gitt transmisjonslinje. Dette skal gjøres ved å inkludere et metamateriale i transmisjonslinjen på en slik måte at den blir dispersjonsløs<sup>17</sup>. Det er altså ønskelig å introdusere et metamateriale med

relativ permittivitet  $\epsilon_{MTM}$  og permeabilitet  $\mu_{MTM}$  slik at den helhetlige relative permittiviteten og permeabiliteten til systemet er av en slik karakter at bølgeimpedansen i metamaterialet blir den samme som i det originale substratet. Følgelig vil brytningsindeksen i materialet kompensere for dispersjonseffektene som kommer av transmisjonslinjen selv. Det vil si at den effektive brytningen i materiallaget blir tilsvarende brytningsindeksen i vakuum,  $n=1$ . Det konkluderes med at metamaterialene må inneha negative effektivverdier for både permittiviteten og permeabiliteten for at dette skal kunne oppnås.

### 2.2.7 Usynlighet

En kort oppsummering av egenskapene og fenomenene nevnt så langt, gjør det klart at manipuleringen av materialeegenskapene gir uendelig store muligheter. Resultatene ovenfor blir enkelte ganger brukt i utvidede tankeeksperimenter. Som overskriften antyder har dette etter hvert ført til svært kontroversielle teoretiske resultater. I den siste tiden har det også vært gjennombrudd når det gjelder realisering av noen former for usynlighet i praksis.

Eksperimentene og utviklingen har utgangspunkt i den perfekte linsen. Jo mer denne "perfekte linse" undersøkes, jo mindre likner den en linse. Det er en rekke egenskaper som ikke sammenfaller med egenskapene til en tradisjonell linse. Den har for det første ikke noen fokallengde, og den kan bare fokusere gjenstander innenfor en gitt avstand fra linsa (kapittel 2.2.4). Dette har ført til en ny måte å betrakte egenskaper i et DNG-materiale, nemlig som negativt rom eller optisk antimaterie [9].

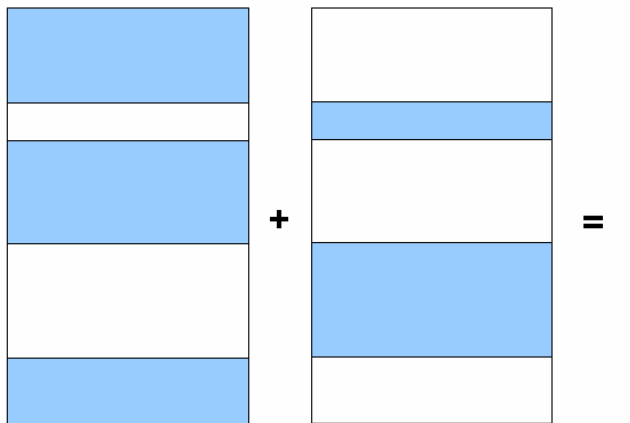
En generalisering av resultatene fra kapitlene ovenfor kan klargjøre hva som menes med dette. To plater, med lik tykkelse, som er plassert inntil hverandre, vil oppheve hverandres elektromagnetiske responser, hvis den ene er det negative speilbildet av det andre materialet. Med speilbilde menes det at materialeegenskapene er de eksakt motsatte av den andres<sup>18</sup>. Ved å dekke et objekt med sitt negative speilbilde, hva angår materialeegenskaper, vil det dermed i teorien oppfattes som usynlig.

---

<sup>17</sup> I [22] gjøres en detaljert teoretisk utledning, for hvordan dette kan oppnås.

<sup>18</sup> Pendry presenterer bevis for dette i [8].

## Kommersialisering av metamaterialer



Figur 2.10 Oppheving av felt

Usynlighet er imidlertid et relativt begrep. Hvis man betrakter ultrahøye frekvenser, som foreksempel tv-bølger, kan de gå gjennom betongvegger. Betong er derfor "usynlig" for tv- og radiobølger. Samtidig kan glass ha veldig høy transmittans i det synlige spekteret, og derfor oppfattes som usynlig, mens infrarøde bølger oppfatter glass som ugjennomtrengelig [21]. Et viktig poeng er at usynlighet ikke er en konstant egenskap og det er derfor nødvendig med en presis definisjon av hvilket frekvensspekter man ønsker at usynlighet skal opptre.

Passiv usynlighet for et objekt, betraktes som at en observatør kan se gjennom et objekt, eller at observatøren kan se bak objektet. For at dette skal bli tilfelle må lyset følge en glatt bane rundt objektet. Ulf Leonhardt og J.B. Pendry har foreslått matematiske fremgangsmåter for å oppnå usynlighet ved hjelp av metamaterialer<sup>19</sup>. For at et objekt skal bli usynlig, må det tilfredsstille to krav. Det må bøye lyset rundt seg slik at det ikke kaster skygge og det må ikke være opphav til refleksjoner i overflaten. Dette er umulig for naturlige materialer, men viser seg teoretisk mulig ved bruk av metamaterialer.

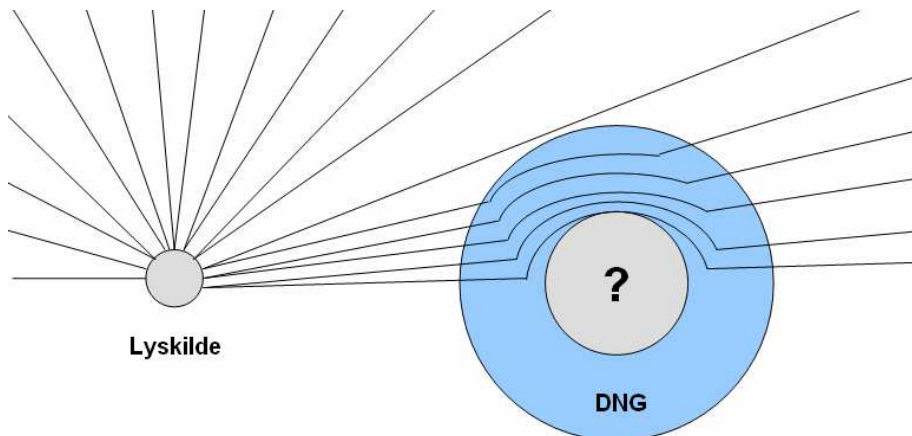
Pendrys og Leonhardtsens teorier for å få lys til å gå rundt et objekt baserer seg på matematiske koordinattransformasjoner. Matematisk innebærer dette å gjøre tilpassede transformasjoner av det komplekse planet. Leonarhardtsens tilnærming gir en intuitiv forståelse av poengene [38]. La  $z = x + iy$ , der  $x$  og  $y$  er de kartesiske koordinatene, og  $w(z)$  er den tilpassede transformasjonen. Det nye koordinatsystemet blir  $Z = w(z)$  og den korresponderende nye brytningsindeksen er  $n'(Z)$ . Denne brytningsindeksen må tilfredsstille forholdet  $n(z) = |dZ/dz|n'(Z)$ . Essensen med ideen er å finne en transform som gjør at  $n'(z) = 1$ , slik at den deriverte til transformasjonen akkurat

<sup>19</sup> En presentasjon av disse framgangsmåtene blir gitt i [38].

## Kommersialisering av metamaterialer

kompenserer for brytningsindeksen  $n(z)$ . På denne måten vil en rett linje i det originale rommet, være en bøyd linje i det transformerte planet. Hvis

transformasjonen i tillegg er slik at  $w(z) = z$  for en tilstrekkelig stor  $z$ , vil det se ut som om strålen har gått i en rett linje. Hvis brytningsindeksen er riktig designet, er det altså mulig å oppnå skyggområder der lyset ikke kommer til, hvor man potensielt kan gjemme gjenstander.



Figur 2.11 Usynlighetsskall

Pendry's framgangsmåte baserer seg også på koordinattransformasjon. Den er mer generell, og omgår noen av problemene med modellen over<sup>20</sup>. Leonhardtsens modell fungerer kun for stråler, slik at diffraksjon neglisjeres, og den er dessuten vanskelig å realisere i praksis.

Begge de teoretiske analysene gjør seg avhengige av spesifikk design av materialer med brytningsindeks og materialeegenskaper som ikke finnes i naturen fra før. Denne analysen er altså i praksis avhengig av at man får designet materialer med helt spesifikke egenskaper.

Ved å manipulere koordinatsystemene ved hjelp av transformasjoner, blir det med andre ord materialeegenskapene, framfor geometrien i materialet som bestemmer lysets vei. Ved bruk av metamaterialer blir det med andre ord mulig å tvinge lyset til å bøyes rundt et hull i rommet.

Det er altså teoretisk mulig å oppnå usynlighet, men en del hindringer må nevnes. Siden det ideelle tapsfrie tilfellet er umulig å realisere, vil en liten prosentandel av lyset uansett bli reflektert, slik at objektet ikke blir helt usynlig. Selv om designet kan tilpasses, slik at det virker for andre frekvensområder, vil det bare kunne fungere for et smalt frekvensområde av gangen. Dette er en reell og stor utfordring når det gjelder oppnåelse av generell usynlighet.

<sup>20</sup> Framgangsmåten gjennomgås utførlig i [38].



### 2.3 Tekniske applikasjoner og konsepter

*"Physics asks how nature works, and engineering asks how the works of nature can be used"*

Nader Engheta

Det kom fram i kapittel 2.2 at metamaterialer kan være opphav til en rekke nye ukonvensjonelle egenskaper og funksjoner. Generelt kan det sies at disse ukonvensjonelle, elektromagnetiske karakteristikene, først blir synlige når metamaterialet kombineres med andre materialer, som har motsatt fortegn på minst en av de grunnleggende materialparametrene  $\epsilon$  og  $\mu$ . Det er da det nevnte resonansfenomenet (kapittel 2.2.3) i grenseflaten mellom disse materialene gjør seg gjeldende. Resonanseffekten er uavhengig av lagenes totale tykkelse og fører til interessante karakteristikker for bølgeforplantningen i en rekke komponenter med metamaterialer. Dette vil etter hvert få betydning for design av omtrent alle komponenter som benyttes innen elektromagnetismen; resonatorer, bølgeledere og antenner er noen eksempler.

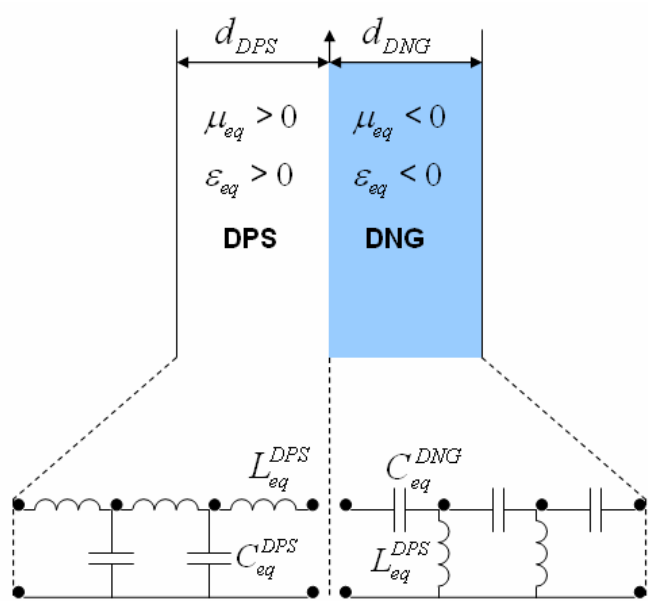
Applikasjonene beskrevet nedenfor er presentert i flere publikasjoner, og er en sammenfatning av hvordan noen av de fysiske prinsippene nevnt i kapittel 2.2 kan utnyttes teknologisk. Først gjøres en gjennomgang av hvordan resonansfenomenets ekvivalente elementkrets brukes for å forstå den ukonvensjonelle bølgeoppførselen i de ulike komponentene.

#### 2.3.1 Resonante kretser

Som antydte tidligere (kap 2.2.3) kan sammensetningen av lagvise DNG-DPS-materialer sammenliknes med å kombinere to reaktive impedanser<sup>21</sup> med motsatt fortegn. Dette kan intuitivt godtas siden fortegnet til permittiviteten  $\epsilon$  og permeabiliteten  $\mu$  har motsatte fortegn for sine realdeler, i henholdsvis positivt og negativt materiallag. Hvis DPS-laget er ekvivalent med en reaktiv impedans, kan DNG-laget også oppfattes som en reaktiv impedans, men med motsatt fortegn. Sammensetning av disse materiallagene kan altså produsere betingelse for resonans[22].

---

<sup>21</sup> Motstand, kapasitans og induktans kan sammenfattes i et enkelt uttrykk  $Z = R + i\chi$ , hvor  $Z$  er en generalisering av motstanden i en krets, og utgjør størrelsen til den komplekse enheten *impedans*. Generelt er impedansen frekvensavhengig, slik at  $Z=Z(\omega)$ .



Figur 2.12 Ekvivalente kretser<sup>22</sup>

En propagerende TM-bølge får en feltfordeling gitt av Maxwells likninger:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_x}{\partial z} &= -j\omega\mu_{eq}H_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial z} &= -j\omega\epsilon_{eq}E_x \end{aligned} \quad (0.12)$$

Disse uttrykkene kan oppfattes som analoge til transmisjonslinjelikningene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial z} &= -j\omega L_{eq}I \\ \frac{\partial I}{\partial z} &= -j\omega C_{eq}V \end{aligned} \quad (0.13)$$

Denne analogien kobler strøm- og spenningsdistribusjonen i en krets til sine respektive motstykker, magnetfeltet og det elektriske feltet gjennom følgende proporsjonalitetsforhold:

$$\begin{aligned} L_{eq} &\propto \mu_{eq} \\ C_{eq} &\propto \epsilon_{eq} \end{aligned} \quad (0.14)$$

Disse sammenhengene er velkjente for DPS-materialer, men kan også brukes for DNG-materialer [23]. I konvensjonelle DPS-materialer er det også slik at resonans i en krets bare oppstår hvis kretsens lengde er av samme

<sup>22</sup> Figuren er en modifisering av en figur i [22].

størrelsesorden som den aktuelle bølgelengden. Når DPS-DNG-materialer settes sammen, faller dette kravet bort, fordi resonansen kan oppstå i selve grenseflaten. Som et resultat av dette vil laget av DPS-DNG-materiale fortsatt være resonant, selv om materialenes tykkelsen reduseres, forutsatt at forholdstallet mellom lagene forblir det samme. Dette er analogt med eksempelet i avsnitt 2.2.5 om fasekompensasjon. Båndbredden til det resonante området vil riktignok påvirkes av at materialenes tykkelse endres.

Dette er en forklaring på at det er mulig å produsere flere kompakte resonante strukturer. Dette kan være kaviteter, bølgeledere og spredere, som potensielt kan produseres i en mye mindre målestokk enn tidligere. En grundigere teoretisk gjennomgang av kavitetsstilfellet gjøres nedenfor. Prinsippene om fasekompensasjon og den økende eksponensielle effekten ligger til grunn for disse og flere andre komponenter.

### 2.3.2 Kavitetsresonator

Platen med DPS-DNG-materiale (Figur 2.12) med to perfekte reflektorer på sidene utgjør en endimensjonal kavitetsresonator. Det har blitt vist [15] at en slik resonator kan ha en mode, ulik null, selv når kavitetsens tykkelse, i prinsippet er mye mindre enn  $\lambda/2$ , som er kravet i konvensjonelle kavitetsresonatorer. Dispersjonsforholdet i denne analysen ble funnet å være

$$\frac{n_{DNG}}{\mu_{DNG}} \tan(n_{DPS} k_0 d_{DPS}) + \frac{n_{DPS}}{\mu_{DPS}} \tan(n_{DNG} k_0 d_{DNG}) = 0 \quad (0.15)$$

Siden  $\epsilon_{DPS} > 0$ ,  $\mu_{DPS} > 0$ ,  $\epsilon_{DNG} < 0$  og  $\mu_{DNG} < 0$  kan uttrykket forenkles til

$$\frac{\tan(n_{DPS} k_0 d_{DPS})}{\tan(n_{DNG} k_0 d_{DNG})} = \frac{n_{DPS} |\mu_{DNG}|}{n_{DNG} |\mu_{DPS}|} \quad (0.16)$$

Denne sammenhengen viser hvorfor det ikke er noen direkte sammenheng mellom tykkelsen på DPS- og DNG-materialet, snarere en sammenheng mellom forholdet. Dette impliserer at, i motsetning til ved vanlige resonatorer

bestående av DPS-materiale, hvis  $d_{DPS}$  reduseres, kan også verdien av  $d_{DNG}$  reduseres for å opprettholde gyldigheten til dispersjonsrelasjonen. I prinsippet kan disse lagene bli så tykke eller tynne som de ønsker, bare relasjon (2.16) er oppfylt. Den totale tykkelsen for en slik kavitert, kan altså resulteres til å være mindre enn standardtykkelsen på  $\lambda/2$  [15].

Dette innebærer at man kan implementere ny design av resonatorkaviteter, der komponentene er betydelig mindre enn gitt tidligere. Konseptet med en 1D resonatorkavitet har nylig blitt bekreftet eksperimentelt [13]. Teoretisk er også geometrier i to og tre dimensjoner utviklet.

### 2.3.3 Bølgeledere

Konseptet med kavitetsresonatoren gjennomgått ovenfor, har blitt utvidet til å gjelde bølgelederstrukturer<sup>23</sup>. Det betyr at bølgeledere kan ha propagerende moder, selv med dimensjoner langt under den konvensjonelle

diffraksjonsgrensen på  $\lambda/2$ . Ved å bruke flere DPS-DNG-lag oppå hverandre, er det mulig å omgå konvensjonelle begrensinger [15]. Dette resulterer i bølgeledere med en rekke faserende egenskaper. Blant annet har en parallellplate- bølgeleder som består av DPS-DNG-lag ingen cut-off grense for TE-moder, og i tillegg er det mulig å produsere veldig tynne bølgeledere med guidede moder med høy propagasjonskonstant.

Det kan også nevnes at lagkonstruksjonen som åpner muligheten for et slikt fasekompensert bølgeledersystem gir mulighet til å bestemme propagasjonshastigheten, ved å gjøre endringer i brytningsindeksen i et eller flere lag. De fleste bølgelederapplikasjonene som er laget til nå er i en dimensjon [13].

De samme fundamentale kravene til størrelse oppheves også når det gjelder linser, spredere, koplere av ulike slag, faseskiftere og antenner. Antenner behandles spesifikt i kapittelet nedenfor.

### 2.3.4 Antenner

I kjølvannet av framstillingen i avsnitt 2.3.1 er det naturlig å stille spørsmålet om DNG-materialer kan benyttes til å modifisere inngangsimpedansen i en antenne og på den måten øke effektiviteten.

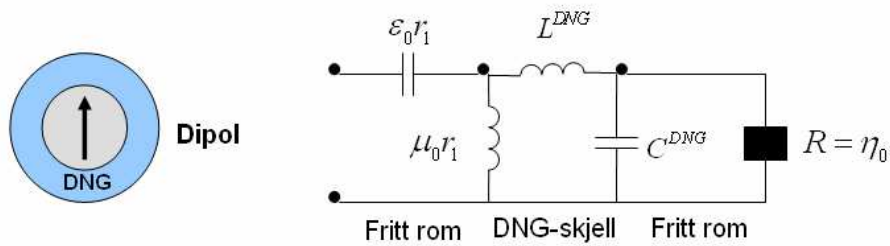
Impedanstilpasning er viktig i trådløse systemer av flere grunner. Effekten levert til en last maksimeres når den er tilpasset matingsmekanismen. Signal-til-støy forholdet forbedres og minimerer nødvendig effektbruk, slik at man for eksempel får bedret batterikapasitet [24].

Problemet har blitt studert analytisk og numerisk av Ziolkowski og Kipple[15]. De vurderte muligheten for å tilpasse en elektrisk liten dipolantenne til vakuum (fritt rom) ved hjelp av et skall av DNG-materiale. De har vist at en slik konstruksjon utstråler større effekt enn en tilsvarende antenne uten DNG-skallet rundt seg.

---

<sup>23</sup> Det henvises til [15] for en detaljert gjennomgang av dette konseptet.

## Kommersialisering av metamaterialer



Figur 2.13 Skisse av antenne og kretsdiagram

Dette kan forklares på følgende måte: La først en ideell liten elektrisk dipolantenne med lengde  $l$ , sentrert i et sfærisk DPS-materiale med radius  $r$  bli drevet av strømmen  $I_0$ . Denne antennen vil generere den komplekse effekten [24][15]:

$$P_{dipol} = \iint_S \left( \frac{1}{2} \vec{E}_\omega \times \vec{H}_\omega^* \right) \cdot \hat{r} dS = \eta \left( \frac{\pi}{3} \right) \left| \frac{I_0 l}{\lambda} \right|^2 \left[ 1 - j \frac{1}{(kr)^3} \right] = P_{rad} + P_{reac}$$

Ved sammenlikning av de to tilfellene med og uten DNG-skall viste det seg at  $P_{rad}$  var lik i begge tilfellene, mens den reaktive effekten  $P_{reac}$  hadde lik størrelse, men motsatt fortegn.

Den reaktive kapasitive effektkomponenten er svært stor i nærfeltet til en elektrisk liten antenne, og begrenser utstrålingseffektiviteten til en slik antenne kraftig. Reaktansforholdet  $P_{reac}/P_{rad} \gg 1$  for  $ka \ll 1$ . Dette betyr at den utstrålte effekten fra antenne er mye mindre enn den reaktive effekten. En viktig utfordring i antenneutvikling er derfor å minske det totale reaktansforholdet

Undersøkelser viste altså at  $P_{dipole,DPS} = P_{dipole,DNG}^*$ , noe som stimulerte til videre undersøkelser av effekten av å plassere et dobbelt negativt skjell rundt en liten elektrisk dipol, i et forsøk på å tilpasse dipolen til fritt rom. En tilnærmet ekvivalent kretsmodellen (figur 2.13), viser at det er mulig å betrakte det dobbelt negative skjellet som et tilpasningsnettverk.

Den fundamentale romlige  $TM_{10}$ -moden strålt ut i fritt rom ser normalt ett høypassfilter. Moden vil derfor være i en "cut-off"-situasjon. Normalt vil moden propagere gjennom denne hindringen og etterlate seg en relativ stor andel reaktiv effekt. Skjellet av DNG-materiale, fungerer som et lavpasssystem som kompenserer for høypass-filteret. DNG-materialet finner altså en måte å matche de korresponderende CL og LC resonansene. Det produseres på den måten et system som er impedansmatchet til omgivelsene rundt. Med andre ord kan den totale reaktansen reduseres til null, ved å sette sammen to regioner med reaktive impedanser med motsatte fortegn; kapasitiv for DPS-sfæren, og induktiv for DNG-skjellet. Den potensielle barrieren og den reaktive

effekten nær antenna blir redusert til null, og tillater  $TM_{10}$ -moden å propagere fritt ut i rommet. Dette har blitt beskrevet teoretisk og analytisk [15][22] Ziolkowski og Kipple har altså demonstrert at kapasitansen en liten elektrisk dipol utviser i fritt rom, kan matches til induktansen til et tapsfritt omliggende DNG-materiale. Dette skaper en ekvivalent LC resonatorkonfigurasjon, som øker den reelle effekten strålt fra dipolen betraktelig, med en korresponderende minskning i det totale reaktansforholdet. Den karakteristiske impedansen blir frekvensuavhengig, noe som betyr at en bredbåndet impedanstilpasning er mulig.

Båndbredden avhenger kun av kretsparametrene. Disse kan endres på for å tune systemet til ulike frekvenser. Uendelig bølgelengderesonans kan dermed i prinsippet oppnås ved hvilken som helst frekvens!

Det har blitt designet ulike 1D og 2D leaky-wave antenner og reflektorer med unik funksjonalitet [13]. Antennene som har blitt realisert er unike på flere måter. Antennen fungerer blant annet fullstendig for den fundamentale moden til transmisjonslinjen, mens konvensjonelle leaky-wave antennen forårsaker romlige harmoniske. Dette medfører at matingsmekanismen blir dramatisk forenklet. Denne oppførselen forsvinner heller ikke ved tilstedeværelse av tap. Siden dette er en resonansbasert effekt, vil tapet være med på å utvide resonansen, og minske den maksimale toppverdien. Resultatene fra undersøkelser gjort, viser at selv med tap er økningen i utstått effekt vesentlig [22].

### 2.3.5 Applikasjoner på bakgrunn av brytning

Foreløpig er dette området for det meste på det teoretiske plan, selv om det av mange betraktes som det mest spennende feltet for metamaterialer. For å realisere slike applikasjoner kreves det at metamaterialet har to eller flere dimensjoner. Kun noen få konsepter har blitt demonstrert eksperimentelt [13]. Dette gjelder blant annet negativ fokusering ved en grenseflate mellom DPS-materiale og DNG-materiale.

Dette betyr at flere av konseptene i kapittel 2.2 kun kan bli en realitet hvis det gjøres teknologiske framskritt, som muliggjør realiseringen av kompliserte metamaterialstrukturer. Noen av de viktigste hindringene på veien behandles i neste kapittel.

### 2.4 Tekniske utfordringer

*" Science never solves a problem without creating ten more"*

George Bernard Shaw (1856-1950)

I den senere tid har det utkrystallisert seg tre hovedretninger innen forskningen på produksjon av metamaterialer. Den ene retningen ser på konstruksjon av metamaterialer i tre dimensjoner, mens en annen retning bruker todimensjonale metamaterialer. Den tredje og siste retningen bruker båndgapstrukturer<sup>24</sup> som kontrollerer bølgens fasefront for å oppnå effektiv negativ brytning. Dette er en videreføring av forskning på fotoniske krystaller, noe som ikke berøres ytterligere i denne rapporten. Tilnærmet uavhengig av framgangsmåte, er det en del utfordringer forbundet med å produsere metamaterialer og deres tekniske applikasjoner. Noen av de viktigste utfordringene oppsummeres nedenfor.

Dagens tilgjengelige metamaterialer produseres hovedsaklig med metall som en viktig bestanddel. Dette betyr at de har virkeområde i mikrobølgespekteret, og er opphav til store tap ved optiske frekvenser. For å kunne realisere metamaterialer i et bredere frekvensspekter og særlig med tanke på det synlige spekteret, er det nødvendig å finne fram til ikke-metalliske DNG-strukturer[13]. Dessuten er dagens utforskning av magnetiske metamaterialer i terrahertzspekteret fortsatt langt unna operative løsninger. En økning i spekteret som metamaterialer kan operere i kan oppnås ved en minimalisering av strukturenes byggesteiner. Dette vil øke homogeniteten for en gitt frekvens.

Produksjon av mindre materialkomponenter byr imidlertid på store teknologiske utfordringer. Det setter store krav til ulike nye teknologier, som for eksempel forbedret nanoteknologi. Dette er en nødvendighet for å designe effektive metamaterialer.

Videre er det klart at et ideelt metamateriale er en helhetlig konstruksjon i tre dimensjoner. Hvis dette ble en realitet, ville man bli vitne til mange nye løsninger med materialer som kan skreddersys i tre dimensjoner. Et effektivt 3D metamateriale er foreløpig ikke produsert [13].

Når design av metamaterialer som nevnt krever svært kompliserte teknologiske løsninger, stiller dette samtidig store krav til simuleringsmuligheter, før en eventuell design implementeres. Det vil si at parallelt med kravene til utvikling av produksjonsmekanismer, kommer kravene om bedre utviklede numeriske simuleringsverktøy som er compatible med den nye teknologien og kan simulere funksjonaliteten til store metamaterialstrukturer[13].

---

<sup>24</sup> Det hersker noe uenighet i hvorvidt dette kan kalles metamaterialer eller ikke, ettersom disse strukturene har dimensjoner i samme størrelsesorden som bølgelengden. Det kan leses mer om fotoniske krystaller i [22].

Som nevnt tidligere er de ideelle tapsfrie metamaterialene diskutert i flere av eksemplene ovenfor ikke realiserbare. Det vil alltid være tap i passive materialer. Tapene er en stor utfordring, og svært ødeleggende for de resonante effektene i metamaterialene. Dette gjør at det i tillegg til kravene ovenfor også må tas hensyn til at materialer med lite tap må benyttes.

### 2.5 Aktuelle fremtidige bruksområder

*"As usual with new technology, the best uses probably haven't been thought of yet"*

David R.Smith

I 2003 kom venstrehåndsmaterialer på topp 10 listen til Magasinet Science over viktige vitenskapelige gjennombrudd. I år er metamaterialer kåret til et av de ti viktigste kommende teknologiske forskningsområdene, av magasinet Technology Review [25][1]. Dette beskriver en stigende interesse og en anerkjennelse av at metamaterialer generelt representerer et nytt paradigme i fysikken og en ny generasjon av materialer som har kommet for å bli. Betydningen av metamaterialer tillegges så stor vekt på grunn av de mange lovende utsiktene til bruksområder. På det nåværende tidspunkt har de mest fundamentale konseptene innen metamaterialer blitt etablert og verifisert både teoretisk, numerisk og eksperimentelt. Framtiden for dette kommende feltet synes å ligge i utviklingen av nye mikrobølge- og fotonikkapplikasjoner [3]. Så fremt utfordringene nevnt i kapittel 2.4 kan løses i større eller mindre grad, vil vi innen relativt kort tid bli presentert for en ny generasjon materialer. Ønskede egenskaper kan oppnås gjennom design; og tidligere fundamentale begrensninger innen oppløsning og størrelse er en saga blott.

Forhåpningene er store, og det er ventet at bruk av metamaterialer kan føre til revolusjonerende endringer innen blant annet trådløs kommunikasjon, optikk og bioteknologi [26].

I kapittel 2.3 ble et relativt stort antall mulige tekniske applikasjoner med metamaterialer som byggesteiner foreslått. Under gjennomgåas noen av områdene hvor disse kan forventes å ha en positiv innvirkning på hverdagen for folk flest. Før applikasjonene kan tilbys som produkter i markedet må de gjennomgå en kommersialiseringsprosess. Selve kommersialiseringsprosessen behandles i kapittel 3 og 4.

#### 2.5.1 Trådløs kommunikasjon

Bruken av trådløs kommunikasjon øker kraftig fra år til år, og derfor også kravene som stilles til funksjonalitet. Dette stiller igjen store krav til antennene. Utviklingen av antenner har fram til nå vært begrenset av at en effektiv antenne må ha en størrelse på halve bølgelengden til frekvensen den



## Kommersialisering av metamaterialer

skal sende og motta signal på. For mobiltelefoner betyr dette en størrelse på omtrent 7 cm. Når dagens mobiltelefonantennene er mindre, er også kvaliteten og effektiviteten tilsvarende noe dårligere [3]. Med utviklingen av miniatyranter med metamaterialer oppheves de naturlige begrensningene. Antenner som kan sende og motta i alle retninger og innen alle bølglengder som brukes til mobiltelefoni og radioutsendinger kan bli en realitet.

Dette vil åpne mulighetene for blant annet mobilt internett, som innebærer muligheten til å være konstant "på nett". Dette blir mulig fordi mikroskopiske antenner kan være festet på chips og sensorer som for eksempel kan være "online" til enhver tid [3]. Dette vil imøtegå de stadig økende kravene til små mobiltelefoner og andre portable dataenheter, samt kravene til tilgjengelighet av nettverk.

Mikroantennene setter i gang et skred av høyteknologiske kommunikasjonsmuligheter. Perspektivene for anvendelse er enorme. Det er i prinsippet ingen begrensninger for hvor effektiv antennen kan være, hva angår størrelser. Det er også bare fantasien som setter begrensninger for hva dette potensielt kan brukes til. Det er sågar antydning at denne type antenner kan brukes til antiterrorformål, ved at sensorer eller antenner leter etter for eksempel sprengstoff eller andre farlige stoffer[3]. Antennene kan også muliggjøre online terrorbekjempelse ved at lufthavner, togstasjoner og byrommet overvåkes på en mye mer effektiv måte enn i dag. Dette skyldes at antennene og detektorene blir mikroskopiske, uten å miste rekkevidden eller annen effektivitet. Utviklingen av mikroantennene er derfor pekt på som et vitalt forskningsområde for USAs nasjonale sikkerhet.

En annen nyvinning vil bli muligheten for at mikroskopiske antenner med metamaterialer kan plasseres i eksempelvis bilmotorer, kjøleskap og annet hverdagslig utstyr. Dermed kan dette utstyret styres og kommuniseres med via internett.

Innen biologien er det ventet at mikroantennene kan utgjøre en viktig brikke i hverdagen til helseforetak. Dette gjelder for eksempel bedret kommunikasjon av data fra blodtrykksmålere og insulinpumper.

### 2.5.2 Optikk

Den mest lovende egenskapen med metamaterialer har lenge blitt betraktet som evnen til å fokusere lys og andre elektromagnetiske bølger. Når lys i dag brukes i avbildningsteknologi, er oppløsningen aldri høyere enn lystes bølglengde (Kap 2.2). Dette er en av årsakene til begrensninger i ytelsen til for eksempel DVDer, optisk litografi og andre avbildningsteknologier. Når utfordringene i forbindelse med produksjon av metamaterialer blir overvunnet, kan metamaterialer være med på å øke mengden av informasjon lagret på en CD eller DVD drastisk [1].

Evnen til å fokusere det elektromagnetiske feltet kan også benyttes til energiutnytting og dermed miljøvern. Med et passende metamateriale vil lyset

## Kommersialisering av metamaterialer

kunne samles mer effektivt fra flere retninger, slik at man ikke blir avhengig av direkte sollys. Hvis denne typen applikasjon blir utviklet for synlig lys vil det altså effektivisere solenergiteknologien betraktelig [1].

Selv om avbildning med en "perfekt" linse som nevnt i avsnitt 2.2.4 begrenser seg til avbildning i nærfeltet, kan dette vise seg å bli nyttig. En rekke avbildningssituasjoner i nærfeltet, for eksempel mammografi, kan effektiviseres ved å gjøre bruk av en slik type avbildningsteknologi .

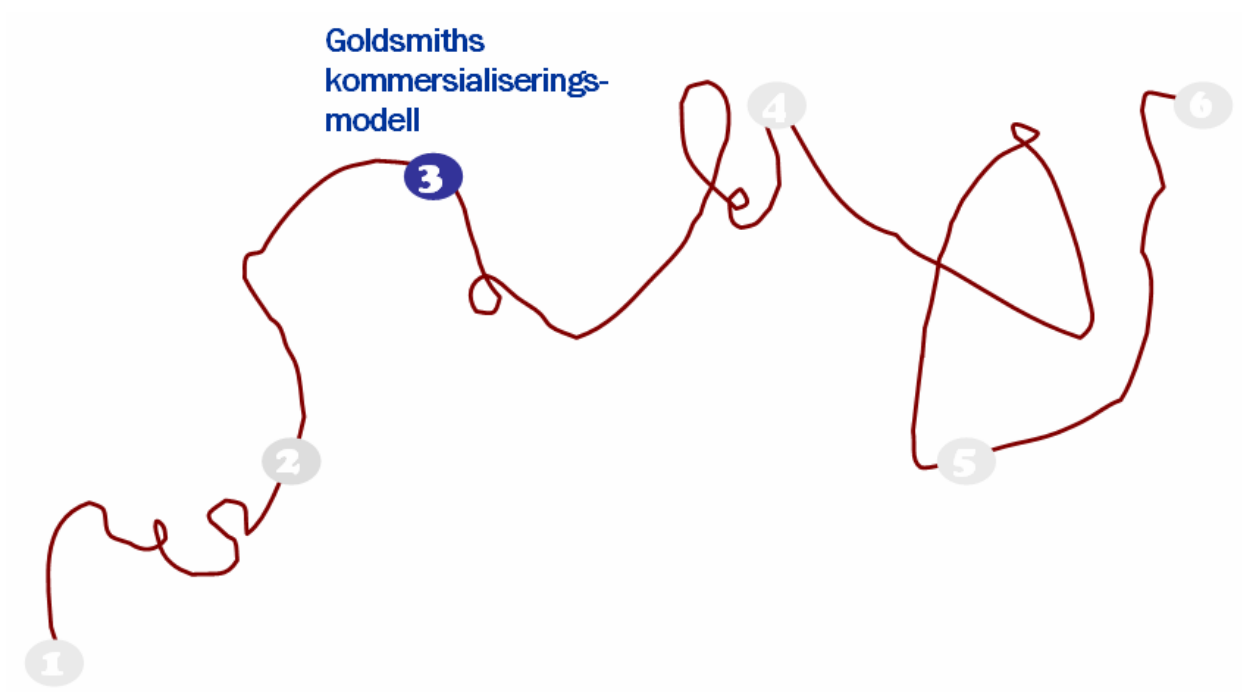
### 2.5.3 Usynlighet

Dette er det feltet innen metamaterialer som sannsynligvis ligger lengst unna en realisering. Likevel har usynlighet fascinert menneskene til alle tider, så den teoretiske muligheten til å skape en usynlighetskappe og andre usynlighetskomponenter gjør at temaet får mye oppmerksomhet og omtale. Dette kan muligens også være en drivkraft for videre forskning. Selv om det ikke alltid er de mest fornuftige, har flere menneskelige aktiviteter sterkt behov for å skjules, enten det er passivt (gjemme noen som står stille) eller aktivt (gjemme noe som er i bevegelse).

Militærmakter over hele verden har for eksempel brukt enorme pengesummer for å forhindre at fly, skip eller missiler blir detektert av radarer. På den andre siden forskes det mye på å skjule selve radaren [38].

Som nevnt i avsnitt 2.2 7 forskes det nå på lage hylser av metamateriale som kan skjule andre gjenstander. Disse gjenstandene kan foreløpig bare skjules for lys i et veldig smalt frekvensområde, siden metamaterialene ikke fungerer for flere bølgelengder samtidig. Før teknologien finner fram til en mulighet for å produsere komponenter mindre enn 10-20 nanometer, kan vi se langt etter en usynlighetskappe som fungerer for synlig lys [1].

## Kommersialisering av metamaterialer





### 3 GOLDSMITHS KOMMERSIALISERINGSMODELL

Kommersialisering og innovasjon er begreper som vanligvis brukes synonymt med hverandre og kan defineres som den prosess som fører til at nye produkter, prosesser eller serviceytelser blir introdusert i markedet [27]. Dette kan være en lang og utfordrende vei å gå og for å ha størst mulighet for suksess, er det viktig for en bedrift å ha gode retningslinjer i denne prosessen. Det finnes mange ulike teoretiske modeller for kommersialiseringsprosessen, men en hoveddel kjennetegnes med at prosessen ledes gjennom ulike faser eller tilstander (stage-gate system). Prosessen deles inn i flere nivåer, der aktiviteter på hvert nivå må fullføres, før man kan gå videre til en ny fase [28]. Ved kommersiell utvikling av teknologiske forskningsresultater er det spesielle hensyn som må tas. En anerkjent modell for kommersialisering av teknologi er "Goldsmiths kommersialiseringsmodell"[29]. Det er denne modellen som brukes som utgangspunkt i den videre analysen.

I hvert nivå i Goldsmiths kommersialiseringsmodellen tas det derfor høyde for både teknologiske- markedsmessige og bedriftsmessige momenter. Før produktet kan føres videre til neste nivå, må hvert trinn i det foregående nivået være gjennomført/behandlet.

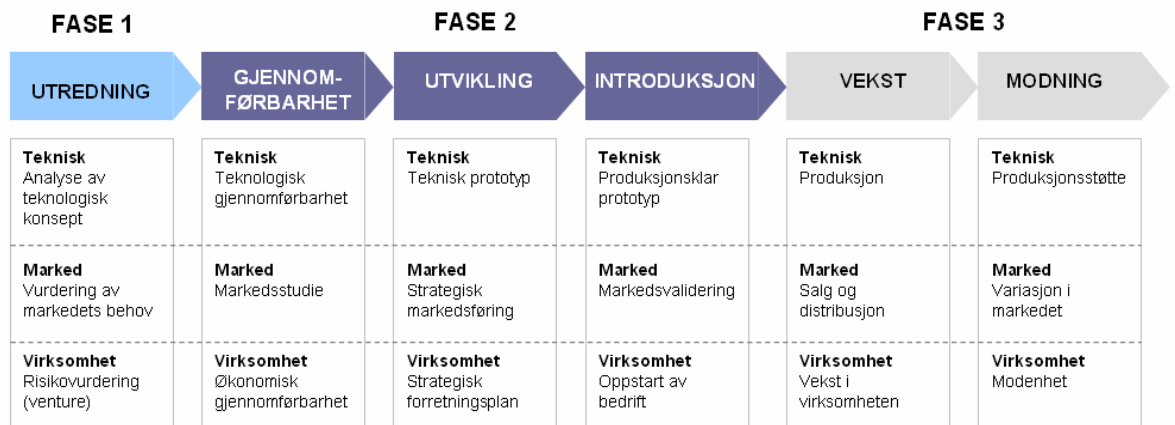
Goldsmiths kommersialiseringsmodell er utviklet av professor H. Randall Goldsmith og har oppnådd internasjonal anerkjennelse som et godt redskap for å bistå kommersialiseringsprosessen for avansert teknologi. Modellen kan fungere som et rammeverk for utviklingen av strategiske planer og handlinger for kommersialiseringsprosessen. Modellen deler prosessen inn i tre hovedfaser, seks nivåer og 18 signifikante trinn som skal gjennomgås. Dette oppsummerer de kritiske aktivitetene, som er med på å maksimere mulighetene for å lykkes med et produkt. Modellen er på denne måten et verktøy for å måle hvor man er i prosessen, og identifisere behov for informasjon og teknisk assistanse, fastsette produksjonskostnader, og å forutse finansielle krav. Modellen kan med andre ord fungere som en veiviser i forhold til hvilke tiltak som til en hver tid skal iverksettes, hvis den er riktig tilpasset det gjeldende produktet og bedriften.



Figur 4.1 Fasene i Goldsmiths kommersialiseringsmodell

## Kommersialisering av metamaterialer

Modellen gir dessuten innsikt i livssyklusen til en virksomhet, både med tanke på økonomi og produkt. De tre hovedfasene modellen deles inn i er utrednings-, utviklings- og den kommersielle fasen. I hver av fasene må det gjøres vurderinger knyttet til tekniske spørsmål, markedsrelaterte spørsmål og spørsmål knyttet til selve bedriften. Nedenfor følger en skjematisk oversiktstabell over de ulike fasene med sine respektive nivåer, etterfulgt av en kort forklaring til hvert enkelt trinn.



Figur 4.2 Forklaring til hvert trinn i Goldsmiths kommersialiseringmodell

## 3.1 Utredningsfasen



### Utredning

I denne fasen er det kun ett nivå; utredningsnivået.

#### TEKNISK

#### Analyse av teknisk konsept

Dette trinnet skal avgjøre om de fysiske prinsippene for et konsept er realiserbare. Altså om konseptet er fysisk mulig og dermed prinsipielt gjennomførbart. Målet med analysen av det tekniske konseptet er en definering av de tekniske aspektene slik at potensialet ved en eventuell implementering i markedet kan vurderes. Videre er det et mål å fastslå hvorvidt dette konseptet er teknisk unikt.

Analysen av det tekniske konseptet vil derfor vanligvis resultere i kunnskap om særpreget til det tekniske konseptet, forventet oppførsel, tidligere utgaver og andre liknende og beslektede forsknings- og utviklingsresultater.

#### MARKED

#### Vurdering av markedets behov

Dette trinnet innebærer å bestemme hvorvidt det nye konseptet har en overlegen evne til å møte et behov i markedet, sammenliknet med andre eksisterende løsninger. Målet med denne vurderingen er å identifisere et potensielt marked for konseptet, estimere størrelsen på dette markedet og fastsette en foreløpig verdi for produktet.

Denne overordnede vurderingen av markedets behov vil vanligvis resultere i en fornuftig begrunnelse for om markedet vil reagere positivt på det nye produktet. Dessuten resulterer analysen i en grovestimering av markedets størrelse og dets segmenter, samt en enkel forklaring på hvordan produktet bør markedsføres og en estimert pris på produktet.

#### VIRKSOMHET

#### Risikovurdering

I denne delen av prosessen er målet å avgjøre om konseptet har et tilstrekkelig potensiale for inntjening, slikt at det er hensiktsmessig å fortsette videre investeringer av tid og penger for ytterligere forskning.

Denne risikovurderingen vil resultere i et estimat over inntjeningsmuligheter og utgifter ved salg av produkter. I tillegg identifiseres kilder til kapital for utviklingsfasen.

### 3.2 Utviklingsfasen

Denne fasen har tre nivåer; gjennomførbarhet, utvikling og introduksjon.

#### 3.2.1 Gjennomførbarhet



#### TEKNISK

##### Teknisk

I dette trinnet skal det fastslås om det teoretisk realiserbare prinsippet er teknisk mulig å gjennomføre. Når dette er bekreftet må det også verifiseres at det ikke finnes signifikante hindringer i veien for produksjonen.

Denne vurderingen genererer kunnskap om produktets design, oppførsel, krav til produksjon og foreløpige produksjonskostnader.

#### MARKED

##### Markedsstudie

I løpet av dette trinnet skal det rettferdiggjøres hvorfor den tenkte målgruppen vil velge det nye produktet i stedet for konkurrentenes. Målet er altså å identifisere kundene, hvor mye de vil kjøpe, og hvor mye de er villige til å betale.

Markedsundersøkelsen bør konkret resultere i en grundig forståelse av markedets omgivelser, markedets struktur, markedspotensialet for produktet, en realistisk forventning til mulig markedsandel og virksomhetens evne og kapasitet i forhold til konkurrenter.

#### VIRKSOMHET

##### Økonomisk gjennomførbarhet

Når den økonomiske gjennomførbarheten ved utviklingen av en virksomhet vurderes, utvikles en break-even<sup>25</sup> finansieringsmodell for virksomheten. Modellen er basert på alle kostnader knyttet til å føre et produkt fra ide til marked og deretter å oppnå et tilstrekkelig salg for å dekke gjeld eller investeringskrav. Målet er derfor å utvikle en god finansiell modell for virksomheten. Hvis en slik modell er realistisk, er prosjektet økonomisk gjennomførbart.

Etter en gjennomgang av dette trinnet kommer derfor avgjørelsen om hvorvidt man skal fortsette eller ikke, såkalt go/no-go avgjørelse i forbindelse med

<sup>25</sup> En break-even modell innebærer at inntektene er like store som utgiftene, altså at virksomheten "går i null".



satsningen. Hvis avgjørelsen er positiv identifiseres kilder til kapital for utviklingsfasen.

### 3.2.2 Utvikling



#### TEKNISK

#### Teknisk prototyp

I dette trinnet utføres arbeidet med å finne de mest hensiktsmessige og effektive materialer, prosesser og design for produktet. Dette er med på å tilpasse produktet til kommersiell produksjon og betyr at man gjør utbedringer i materialene og designet til produktet og verifiserer at det vil fungere som antatt. Etter at utbedringene er gjort, er resultatet en teknisk prototyp.

Den tekniske prototypen vil vanligvis gi kunnskap om nødvendige produktspesifikasjoner, den påkrevde produksjonsprosessen, bevis for forventet pålitelighet og oppdatering av estimatet for produksjonskostnader.

#### MARKED

#### Strategisk markedsføring

I dette trinnet gjøres spesifikke beslutninger angående tilnærmingen til markedet. Dette skal innlemmes i bedriftens forretningsplan<sup>26</sup>. Hensikten er å spisse markedsføringen mot det segmentet i markedet som har størst potensiale for fortjeneste.

Den strategiske markedsplanen resulterer i en omfattende gjennomgang av hva som skal markedsføres til hvem, samt hvor, når og hvordan dette skal gjøres.

#### VIRKSOMHET

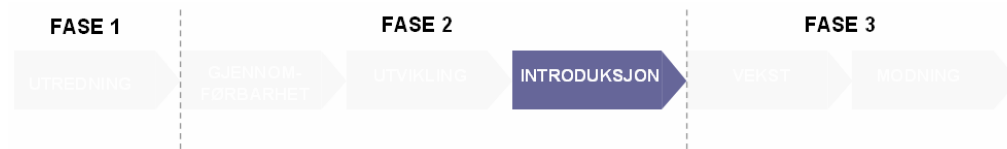
#### Strategisk virksomhetsplan

I dette trinnet skal de kritiske avgjørelsene angående finansieringsmuligheter, organisasjonsstruktur og markedstilnærming gjøres. I tillegg skal strategiske samarbeid tilpasses eiernes ønsker og organisasjonens evner. Målsetningen er å identifisere og prioritere mulighetene i bedriften, noe som optimaliserer mulighetene for suksess.

Ferdigstilling av dette trinnet resulterer vanligvis i en formell forretningsplan, slutføring av virksomhetens organisering, avslutning av juridiske prosesser i forbindelse med krav til opphavsrett, anskaffelse av kapital gjennom tidligfasefinansiering og avslutning av produktutviklingsavtaler.

<sup>26</sup> En forretningsplan er et dokument som beskriver hva bedriften planlegger å oppnå, og hvordan den planlegger å gjøre dette. Utdypende informasjon om utvikling av forretningsplaner kan leses i kompendiet Teknologiledelse 1, Entreprenørskapsdelen.

### 3.2.3 Introduksjon



#### TEKNISK

#### Produksjonsklar prototyp

I dette trinnet skal produktet klargjøres til introduksjon i markedet. Produksjonsprosesser og teknikker for produksjonen må derfor utvikles.

Når denne prototypen er en realitet har bedriften forhåpentligvis kunnskap om evnen til å produsere dette produktet, produksjonsprosessen, vedlikeholdsevne og pålitelighet, samt material- og komponentlister, planer for støttesystemer, installasjons- og produksjonskostnader, sikkerhets- og miljøfaktorer, tidsfrister og reguleringskrav.

#### MARKED

#### Markedsvalidering

I dette trinnet introduseres produktet på markedet, markedstilnæringer vurderes, og det innhentes tilbakemeldinger fra kunder. Markedsvurderingen har til hensikt å teste markedets respons på produktet og sammenlikne de reelle resultatene med forventningene i forretningsplanen.

Fullføringen av dette trinnet resulterer i en verifisering av at bedriftens markedstilnærming for produktet er vellykket, eller identifisering av anbefalte modifiseringer og utbedringer.

#### VIRKSOMHET

#### Bedriftsoppstart

Oppstarten til en bedrift eller virksomhet er perioden hvor nøkkelstillinger og funksjoner besettes. Hensikten er å introdusere bedriften til markedet, i tråd med parametrene gitt av forretningsplanen. Ledelse, produksjonmedarbeidere, ansvarlige innen finansiering, jus og marked kan være eksempler på nøkkelfunksjoner i en bedrift.

I forbindelse med oppstarten tilegnes vanligvis kunnskap knyttet til etableringen av forretningsfunksjoner, introduksjonen til markedet, vurdering av markedsresponsen og bekreftelse av lønnsomhet. I tillegg kommer identifisering av nødvendige endringer og utbedringer innen teknikk, marked eller selve forretningsdriften.

### 3.3 Kommersiell fase

Denne fasen har to nivåer; vekst og modning.

#### 3.3.1 Vekst



#### TEKNISK

##### Produksjon

I dette trinnet utvikles produksjonsprosessen, og fullskala produksjon iverksettes.

Når produksjonen er iverksatt genereres kunnskap om produksjonsnivå og kostnader, krav til lagerbeholdning, fordeling av ansatte, flaskehals i produksjonen, samt krav til leverandører og selgere. Dessuten tilegnes kunnskap om distribusjonsfaktorer, pålitelighet og vedlikeholdsevne i produksjonen, samt produktets oppførsel og pålitelighet.

#### MARKED

##### Salg og distribusjon

Produktet mottas av markedet og opparbeider seg en posisjon hos distributører og kunder. Formålet med dette trinnet er å øke markedsandelen og lønnsomheten.

Implementering av dette trinnet resulterer i kunnskap om produktets posisjon i markedet i forhold til konkurrenter. Posisjonen kan blant annet måles ved å vurdere produktets demografi, nøkkelt kunder, mottakelse, analyse av nye former for promotering og finne salgskanalene med størst yteevne og effektivitet.

#### VIRKSOMHET

##### Vekst

Virksomheten skal nå være fullt ut operasjonell og alle stillinger besatt. Målsetningen er at virksomheten ledes på en slik måte at man produserer et lønnsomt produkt, som opplever en økende etterspørsel i markedet.

Dette trinnet resulterer i kjennskap til markedets mottakelse av virksomheten, produktets pristerskel<sup>27</sup>, konkurrentenes respons, kommende konkurranse og kritiske faktorer for virksomhetens operative suksess.

<sup>27</sup> Hvor høy pris som kan forventes for produktet.

### 3.3.2 Modning



#### TEKNISK

##### Produksjonsstøtte

I dette trinnet er produktet i full vigør og i en vital del av livssyklusen. Formålet er å opprettholde produktets verdi, ved kontinuerlig forbedring i det tekniske aspektet av produktet.

Gjennomføringen av en ordning for produksjonsstøtte vil føre til kunnskap om optimale forhold, teknologier, prosesser og prosedyrer for å produsere et konkurransedyktig produkt.

#### MARKED

##### Spredning i markedet

For å møte de kontinuerlige endringen i markedet må produktet modifiseres i denne perioden. På denne måten utvikles nye eller endrede markedsmuligheter, eller helt nye produkter utvikles.

Ved hjelp av en rekke tiltak, for eksempel en SWOT<sup>28</sup>-analyse oppnår bedriften mer kunnskap om nye industrielle retninger, produkter og teknologier, kilder til teknologi, identifisering av nye muligheter og trusler for virksomheten. I tillegg identifiseres behov for ressurser innen teknisk assistanse når det gjelder teknologiutvikling og anvendelse.

#### VIRKSOMHET

##### Modning

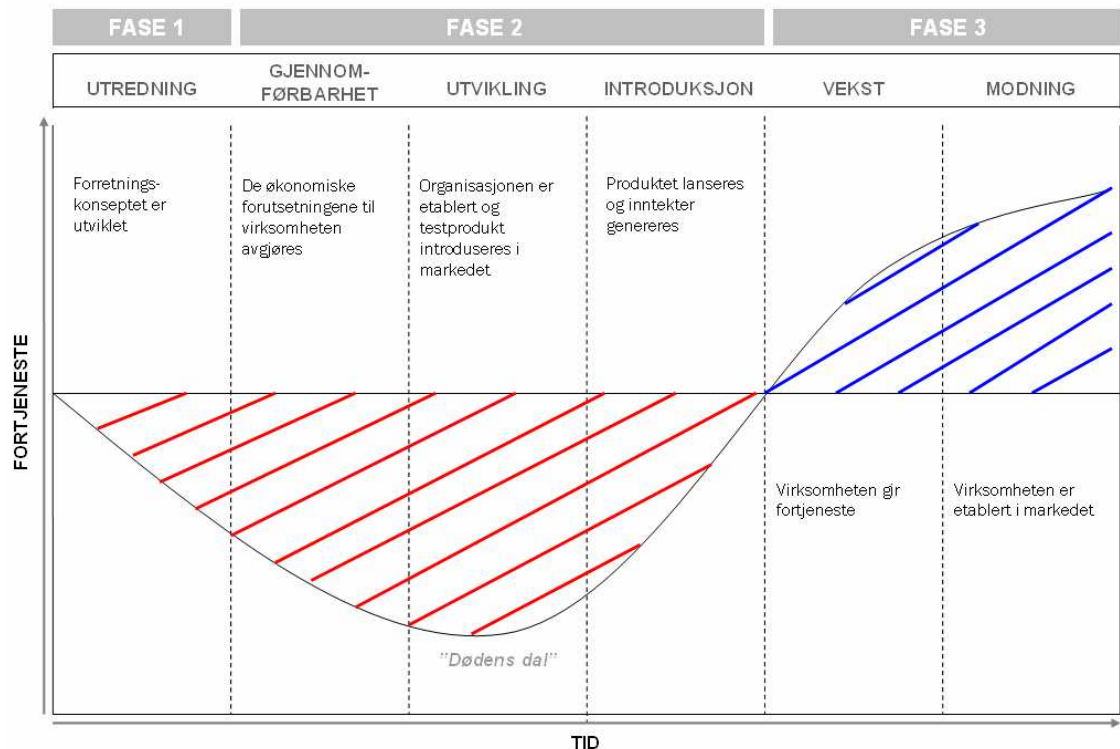
I denne perioden må bedriften sikre sin markedsposisjon, optimalisere investeringsmuligheter og overvåke variasjoner i produkt og marked. Dette er med på å optimalisere avkastningspotensialet i bedriften.

Dette trinnet resulterer vanligvis i kunnskap om potensielle utgangsstrategier (avslutningsstrategier), muligheter for videre utvikling av virksomheten, kommende industiretninger og nye krav og forventninger fra markedet.

<sup>28</sup> Styrker, Svakheter, Muligheter og Trusler (Strength, Weakness, Opportunity, Threats)  
Det henvises til [28] videre ytterligere informasjon om en SWOT-analyse.

### 3.4 Kapital og finansiering

Modellen gjennomgår altså tre faser, med henholdsvis ett, tre og to nivåer. I hvert nivå gjennomgås tre parallelle trinn, for teknologi, marked og virksomhet. Prosessen kan oppsummeres i figuren under, med vekt på de seks ulike nivåene.



Figur 3.1 Tid og fortjeneste

De ulike kommersialiseringsnivåene har behov for ulike former for finansiering og kapital. I den innledende fasen må nyetablerte bedrifter ofte belage seg på hjelp fra venner og familie, hvis ikke grunnleggeren selv har tilgjengelige midler. I utviklingsfasen benevnes finansieringen i de tre ulike nivåene henholdsvis såkorn-, oppstarts- og tidligfase kapital. Disse typene finansiering kan framskaffes ved hjelp av ulike fond, bevilgninger og investeringsselskaper. Når produktet skal introduseres i markedet innhentes venturekapital. Dette er midler fra risikovillige investorer eller såkalte venturefond. Videre i prosessen, når risikoen for fiasko minker, vil banker og andre store finansieringsinstitusjoner være mer villige til å gi støtte til prosjektet i form av ulike typer lån.

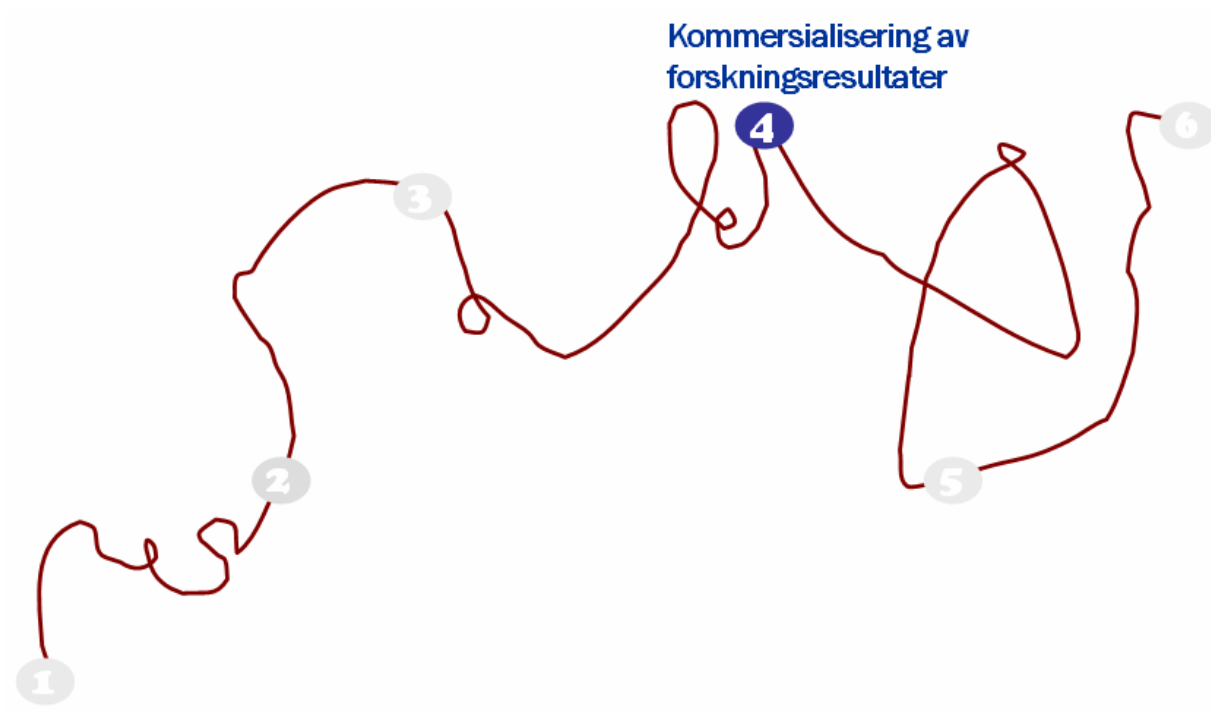
Innhenting og framskaffing av midler til et kommersialiseringsprosjekt henger altså nøye sammen med den risiko det er knyttet til aktuelle faser i prosessen. Det er derfor vanlig å lage en risiko- og sårbarhetsanalyse for hvert nivå i

## Kommersialisering av metamaterialer

kommersialiseringsprosessen. Risikoen vurderes med hensyn på fem risikoområder: produkt, marked, bedrift, finansiering og utførelse. Denne profilen kan benyttes som et verktøy for å identifisere generell risiko for de fem områdene i alle nivåene i kommersialiseringsmodellen og kan dessuten brukes som en liste med milepæler som må nås før neste nivå kan inntas.

Det er også utarbeidet andre verktøy for å hjelpe bedrifter i kommersialiseringsprosessen. Dette kan for eksempel være sjekklister, aktivitetsplaner og veiledere.

## Kommersialisering av metamaterialer







## 4 KOMMERSIALISERING AV FORSKNINGSGRUPPERS RESULTATER

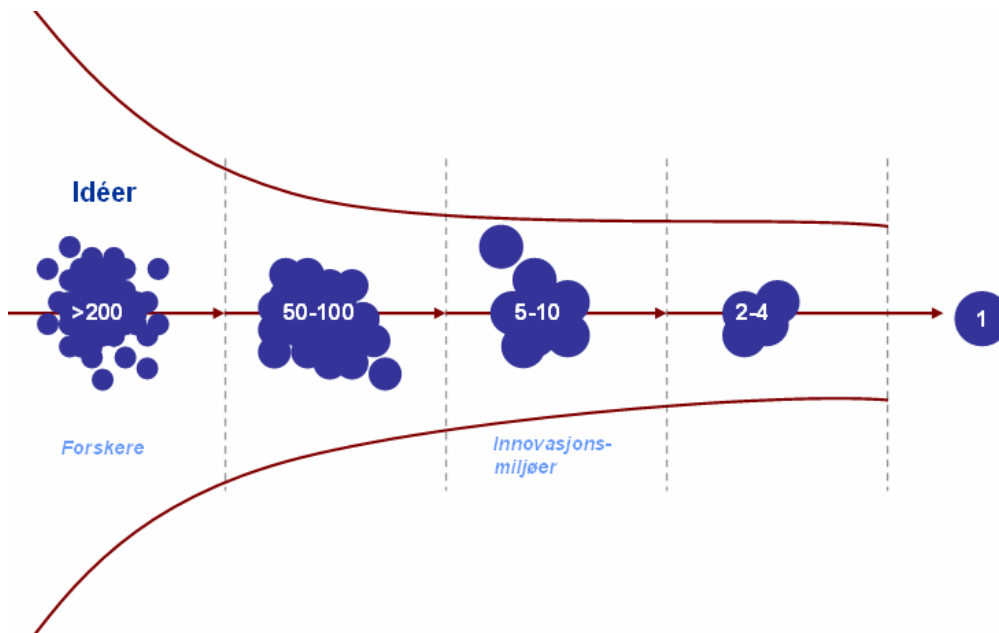
*"God forskning skjer i krysningspunktet mellom teknologi, teoretisk fysikk og anvendt vitenskap!"*

Didier Felbacq

Kommersialisering av forskningsresultater er et nasjonalt og internasjonalt satsningsområde. Flere og flere bedrifter konkurrerer nå innen vitenskap og teknologi. Det er ventet at utviklingen vil tilta i framtiden. Samfunnet forventer derfor at universiteter og andre forskningsinstitusjoner deltar mer aktivt i arbeidet for innovasjon og nyskaping. Noen viktige momenter i forbindelse med kommersialisering av forskningsresultater fra offentlige forskningsinstitusjoner behandles spesifikt i dette kapitlet.

### 4.1 Kommersialisering i praksis

For å være sikret en vellykket kommersialiseringsprosess er det vanlig å starte med 200-500 ideer. 50-100 av disse ideene kan være med videre i en fase med forundersøkelser. Bare 5-10 ideer blir med i en utviklingsfase, mens 2-4 ideer får være med helt fram til implementeringsfasen[30].



Figur 4.1 Skisse av vellykket kommersialiseringsprosess

#### I UTREDNINGSFASEN

Den første fasen i kommersialiseringsprosessen, som kalles utrednings- eller idéfasen finner sted i forskningsmiljøene, ofte på institusjonene. Det er her

## Kommersialisering av metamaterialer

ideene fødes, og det gjøres forstudier slik at ideene kan bringes fram til et konsept, som for eksempel kan beskrives i en patentsøknad eller en annen form for immaterielle rettigheter. Et patent gir kort sagt innehaveren en tidsavgrenset enerett til kommersiell utnyttelse oppfinnelsen i det geografiske området som patentet gjelder for.

I grensesnittet mellom utrednings- og utviklingsfasen opererer ofte såkalte teknologioverføringsenheter. Samtlige av Norges universiteter har etablert "Technology Transfer Offices" (TTO) [31]. Disse kontorene har som formål å formidle kunnskap og bidra til verdiskaping i samfunnet. Dette gjøres gjennom kommersialisering av forskningsresultater i vinn-vinn samarbeid mellom forskere, bedrifter og investorer. NTNU har for sitt vedkommende valgt å gi sin TTO, NTNU Technology Transfer AS<sup>29</sup>, fullmakt og enerett til å håndtere alle sine rettigheter i forbindelse med kommersialisering av forskningsresultater<sup>30</sup>.

## II UTVIKLINGSFASEN

Utviklingsfasen finner vanligvis sted i en form for innovasjonsmiljø, hvor man må presentere et "proof of concept" (jmf 1. nivå i utviklingsfasen kapittel 3.2). Denne typen arbeid krever som nevnt investeringer og bevilgninger. Det er ofte vanskelig å få penger fra venturefond i denne fasen, siden utviklingshorisonten er svært lang og disse fondene vil betrakte trinnet som for risikofyllt. Suksessraten er ikke høyere enn 10 %, ofte under [30]. Når konseptet i slutten av denne fasen løftes videre til en prototyp, er Venturefondene ofte mer investeringsvillige.

Alle aktører i denne fasen bør operere på kommersielle vilkår. I denne fasen er det veldig viktig at bevilgningsgivere har så vel faglig som kommersiell innsikt. Dette er for å kunne vurdere både kvaliteten til det foreliggende konseptet og dets mulighet til å bli kommersialisert. Når det gjelder rettighetene til forskningsresultatene er det et hovedprinsipp i næringslivet generelt at den eller de som betaler for forskningen eier rettighetene til resultatene.

## III KOMMERSIELL FASE

Kommersialisering av ideer og oppfinnelser fra offentlige forskningsinstitusjoner kan foregå på to prinsipielt forskjellige måter. Den ene måten går ut på at forskningsinstitusjonene selger kunnskap til private virksomheter, for eksempel gjennom patenter eller lisenser. Den andre måten bygger på etablering av nye vitenbaserte virksomheter, som når en forsker starter som igangsetter[32]. Tilgang på tidlig kapital er uansett en forutsetning for kommersiell utvikling av forskningsbaserte ideer.

---

<sup>29</sup> Datterselskap, heleid av NTNU.

<sup>30</sup> For utfyllende informasjon om retningslinjer, lover og regler i forbindelse med kommersialisering av forskningsresultater og patentering ved NTNU henvises det til [31].

### 4.2 Motivasjon for kommersialisering av forskningsresultater

Verdiskapingen og budsjettoverskuddene i Norge er i dag på et rekordhøyt nivå. Rikdommen og velferdsmodellen i Norden gir grobunn for vekst i næringslivet, samtidig som oljeproduksjonen vil reduseres de nærmeste tiårene. Dette innebærer en utfordring i verdiskapingen, samtidig som den opplevde tryggheten i Norge kan hemme risikovilligheten og nyskapingen i samfunnet [33].

Inntil for noen år siden har det vært enighet om at universitetenes viktigste rolle i forhold til næringslivet er å framskaffe gode kandidater til ledige stillinger. Det har derfor vært et stort og klart skille mellom grunnforskning ved universitetene og næringslivets forskning og utvikling. I den senere tid har samarbeidet mellom forskningsinstitusjonene og næringsliv blitt helt annerledes. Dette skyldes blant annet den økte internasjonale konkurransen. Den økte konkurransen betyr at bedriftene møter krav om raskere utvikling av nye produkter og servicetelseter, hvis de fortsatt vil være konkurransedyktige. Bedriftene har derfor i økende grad behov for mer effektive måter å fornye sin kunnskap- for eksempel gjennom samarbeid med andre [32].

Et annet moment er at samfunnets holdning til forskning og vitenskap har endret seg. Forskere konkurrerer ikke lengre kun om å produsere flest mulig artikler i de beste tidsskriftene. Det har også blitt viktig å kunne bringe vitenskap til anvendelse og å samarbeide med samfunnet og omgivelsene rundt, særlig næringslivet.

### 4.3 Samspill mellom næringsliv og forskningsinstitusjoner

Forskning og utvikling (FoU) er ifølge Forskningsrådet viktige forutsetninger for fremtidig verdiskaping [33]. På det lokale plan er det slik at NTNU "ønsker å legge forholdene best mulig til rette for kommersiell utnyttelse av den kunnskap og kompetanse som finnes ved NTNU"[31]. Strategisk kommer dette til uttrykk ved at nyskaping er en integrerte del av universitetets tre virkeområder- utdanning, forskning og formidling.

I Soria Moria-erklæringen fra september 2005 redegjør regjeringen for hvordan forskningen og innovasjon skal være et viktig satsningsområde[4]. Blant annet vil regjeringen øke forskningsinnsatsen med flere forskerstillinger og stipendiatstillinger. Økonomisk ønsker regjeringen at forskningsinnsatsen skal øke til 3 prosent av BNP innen år 2010. For å oppnå dette er det nødvendig at næringslivet satser mer på forskning, og den nevnte målsettingen forutsetter at næringslivet står for 2/3 av bevilgningene, altså 2 prosent av BNP. Videre erklærer regjeringen blant annet at de vil øke bevilgningene til grunnforskning, samtidig som det skal satses på bedriftsrettet forskning og sikre god formidling og nyttiggjøring av

## Kommersialisering av metamaterialer

forskningsresultater. Det er Forskningsrådet som plikter å presentere nye løsninger som kan oppfylle Soria Moria-erklæringens mål om et nyskapende, kunnskapsintensivt og konkurransedyktig næringsliv [33]. Noen av de konkrete virkemidlene som er iverksatt og andre anbefalte tiltak presenteres i avsnitt 4. 5.

Det er samtidig viktig å presisere at ikke all forskning kan eller skal kommersialiseres. Samspillet mellom næringsliv og forskningsinstitusjoner skal være balansert. Forskere skal på den ene side imøtekomme næringslivets behov. På den andre side er det også viktig å anerkjenne behovet for fri forskning, hvor den enkelte forsker har rom til å fordype seg etter fritt initiativ. Dette vil også komme næringslivet til gode på lengre sikt. Når det er sagt er det klart at både institusjoner og næringsliv kan få vesentlige gevinster ved å kommersialisere riktige ideer og oppfinnelser fra offentlig forskning.

Forskningsens gevinst gjennom kommersialisering er primært muligheten for å skape nye forskningssamarbeider med industrielle partnere. Erfaringer fra andre land viser at salg av patenter og lisenser ikke er noen gullgrube i seg selv for den offentlige forskningen [32]. For samfunnet er heller ikke målet nødvendigvis at kommersialiseringen skal skape økt inntjening til forskningen, men at næringslivet skal være konkurransedyktig i et marked i stadig utvikling. Derigjennom vil man på sikt kunne skape nye vitenskapsbaserte arbeidsplasser.

### 4.4 Internasjonale trender

Undersøkelser viser at Norge ligger langt etter andre land som Sverige og Danmark når det gjelder forskning og utvikling [34]. Den internasjonale konkurransen tiltar kontinuerlig. Flere og flere land skjønner nå at for at deres bedrifter skal overleve i fremtidens konkurranse, er det avgjørende med et tett samarbeid mellom næringsliv og forskningsinstitusjoner.

Foregangslandene på området har arbeidet strategisk med kommersialisering av forskningsresultater i en årrekke. I dag er Sverige og Finland blant de førende landene i Europa når det gjelder utbredelse av forskerparker, samarbeid om forskning og utvikling og teknologioverføring fra universitetene. Det er vanskelig å måle en direkte sammenheng mellom samspill, utvikling og vekst. En av målestokkene som brukes er antall patenteringer i forhold til kommersialiserte resultater. Med andre ord hvor stor del av rettighetene til patenteringsaktiviteten som blir omsatt til kommersialisering. Undersøkelser gjennomført av OECD [35] gir det bemerkelsesverdige resultatet at et land som Sveits, som har et relativt lavt antall patenteringer, kommer øverst på listen når det gjelder overdragelse av rettigheter. Dette tyder på at institusjonene i Sveits er flinke til å vurdere hvor de potensielle mulighetene er størst og til å prioritere disse oppfinnelsene framfor andre.

## Kommersialisering av metamaterialer

Gjennomsnittlig er et universitet i USA hvert år kilde til to nye forskningsbaserte virksomheter, mens gjennomsnittet for resten av verden er en virksomhet i året [32]

En britisk undersøkelse viser at amerikanske forskere søker om et patent for hver 30 millioner kroner som investeres i forskning [32]. Det oppstår videre en spin-off virksomhet for hver 550 millioner kroner investert. Storbritannia kan vise til bedre resultater, da 550 millioner kroner investert i forskning fører til gjennomsnittlig 5 spin-off virksomheter. Det er vanskelig å sammenlikne på tvers av landene, men siden investeringene i offentlig forskning i dag ligger på omkring 15 milliarder<sup>31</sup> kroner i året er det realistisk å forvente seg omtrent 20 spin-off virksomheter i året fra de norske universitetene samlet.

Forhåpningene til patenterbare oppfinnelser som norske forskere kan utvikle skal heller ikke overdrives. En annen undersøkelse<sup>32</sup> gjennomført av OECD resulterer i en samarbeidsindeks, som sier noe om hvor godt det eksisterende samarbeidet mellom vitenskapsinstitusjoner og næringsliv er [36]. På denne listen over 21 OECD land, som bygger på de fem underindekser, havner Norge helt nede på 16. plass. Langt etter land som Sverige, Finland, USA og Sveits.

### 4.4 utfordringer og tiltak

Som nevnt er kommersialisering en krevende prosess, både tidsmessig og økonomisk og det er derfor nødvendig med en god kommersialiseringsplan for å redusere risiko og øke sjansene for suksess. Veien fra ide til et fullt ut kommersialisert produkt er lang og kronglete med mange hindringer og utfordringer i veien.

De fleste av disse utfordringene kan oppsummeres i fire ulike undergrupper; erfaring, motivasjon og holdninger, finansiering og tverrfaglig samarbeid. De ulike tiltakene som bør iverksettes er derfor også knyttet opp mot disse punktene [30][37].

#### 4.4.1 Manglende erfaring

En vanlig feil blant uerfarne entreprenører er å fokusere for mye på de tekniske aspektene av utviklingen av selve produktet, mens det gjøres lite eller ingen planlegging i forhold til markedsføring av produktet og undersøkelser av om markedet i det hele tatt er stort nok for at en bedrift kan starte. Den manglende erfaringen med å tenke i kommersielle baner kommer også til uttrykk i det store antall ideer som trengs for å lykkes med bare en kommersialisering. Ved hjelp av bedre identifisering av nye ideer og evaluering

---

<sup>31</sup> Tall hentet fra notat fra 2004- finn de riktige tallene her!

<sup>32</sup> Undersøkelsen er fra 2003, og bygger på fem underindekser: Samarbeid om forskning og utvikling, menneskelige ressurser, kommersialisering av forskning, kvalitet og relevans av forskningen, betingelser for spredning av teknologisk vitenskap.

## Kommersialisering av metamaterialer

av deres kommersielle potensial vil dette forholdstallet kunne bedres. Dette vil naturligvis også ha en positiv effekt på det økonomiske aspektet av utviklingsfasen, i og med at færre ideer med dårlig potensial utredes videre.

En undersøkelse gjort av NIFU STEP [37] viser at en av grunnene til at norske forskere kvier seg for å kommersialisere sine forskningsresultater er usikkerhet, liten kjennskap til markedsforhold og tidspress som følge av andre arbeidsoppgaver ved institusjonene. Dette leder over til neste punkt, som omhandler holdninger til kommersialiseringen.

### 4.4.2 Motivasjon og holdninger

En stor utfordring er å få kommersialisering til å bli attraktivt for forskere. Det er dermed behov for sterkere insitamenter til innovasjon ved forskningsinstitusjonene slik at forskerne blir motiverte til å prioritere mulig kommersialisering av sin forskning. Det å bruke tid og krefter på innovasjon er tradisjonelt ikke høyt ansett i forskningsmiljøer og det er derfor behov for gjennomgripende holdningsendringer. Det er forskningsinstitusjonenes ansvar å skape et mer positivt klima for kommersialiseringen.

### 4.4.3 Finansiering

Manglende finansiering utpekes av mange forskere som hovedgrunnen til at de ikke satser på kommersialisering av sine ideer. Det er klart at dette er en stor utfordring for forskningsinstitusjoner. Mange av forskningens oppfinnelser er i begynnelsen for usikre for industrielle partnere og investorer. Derfor er det nødvendig at institusjonene selv finansierer de første trinnene i kommersialiseringsprosessen. Dette kan være vanskelig for forskningsinstitusjoner å prioritere uten midler fra næringslivet. I flere land består universitetenes inntjening i økende grad av private midler. Dette er også en målsetning for norske universiteter og er også et insitament for et økende samarbeid med næringslivet.

### 4.4.4 Tverrfaglig samarbeid

Den manglende erfaringen nevnt ovenfor gjelder også støtteapparatet i institusjonene. Det er et stort behov for bedre muligheter for service når det gjelder lokaler, markedsføring og andre aspekter knyttet til å starte en virksomhet. Det kan legges til rette for god og effektiv bistand til kommersialiseringsprosessen ved å bedre det tverrfaglige samarbeidet. En effektiv infrastruktur for vitenskaps- og teknologioverføring, som kan understøtte hele prosessen med kommersialisering av forskningsresultater, helt fra ideen oppstår til næringslivet setter den ut i verden som en anvendelse, er dermed et tiltak for å oppnå en mer profesjonell teknologioverføring. Dette krever nye samarbeider om teknologioverføring på tvers av institusjoner og at innovasjonsmiljøene i større grad blir tatt med på arbeidet.

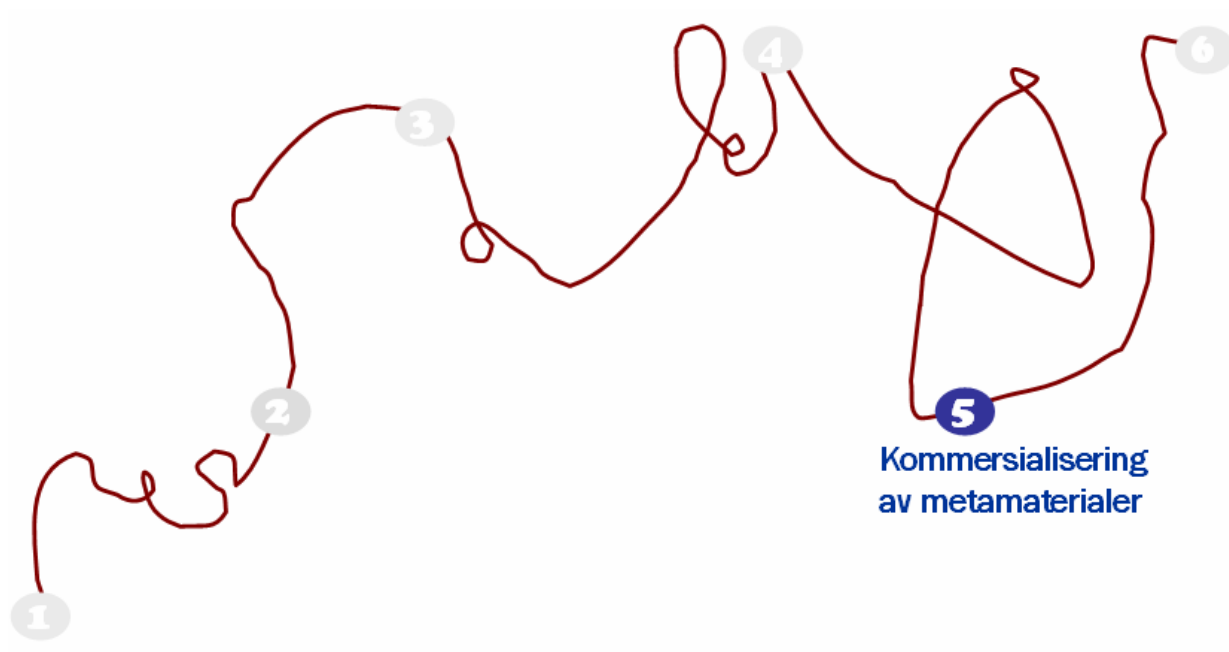
## Kommersialisering av metamaterialer

Det er også viktig med en *riktig* type samarbeid mellom institusjoner og næringslivet. Det er ofte hensiktsmessig at innovasjonsmiljøene arbeider uavhengig av forskerparkene. Innovasjonsmiljøene på kommersielle vilkår må være i stand til å vurdere om konseptene som presenteres av forskningsinstitusjonene er bæredyktige med tanke på kommersialisering. I mange innovasjonsbedrifter kan det dessuten være en innebygget interessekonflikt, basert på at forskerparker som på kommersielle vilkår yter praktiske tjenester til nystartede bedrifter og samtidig deltar i finansieringen og rådgivingen av de samme bedriftene [30]. Dette kan føre til en uhensiktsmessig sammenblanding av bevilger og bevilgningsmottaker.





## Kommersialisering av metamaterialer





# 5 KOMMERSIALISERING AV METAMATERIALER

I et stadig mer konkurransepreget marked er det viktig å kunne identifisere nye og spennende ideer som har kommersielt potensiale. Videre er det også viktig med riktig oppfølging, slik at mulighetene blir utnyttet på en hensiktsmessig måte. Innen metamaterialer som forskningsområde kommer det stadig flere forslag til nye applikasjoner. Gjennomgangen av kommersialiseringsprosessen for metamaterialer har til hensikt å avdekke hvilke ideer det kan være mulig å arbeide videre med.

I dette kapittelet vurderes de aktuelle bruksområdene og prinsippene skissert i kapittel 2 i et kommersialiseringsperspektiv, med Goldsmiths kommersialiseringsmodell.



Figur 5.1 Goldsmiths kommersialiseringsmodell

Hvert underkapittel representerer et nivå i modellen, og gjennomgår trinnene for henholdsvis teknologi, marked og virksomhet. I hvert underkapittel presenteres i tillegg en sjekkliste til støtte i kommersialiseringsarbeidet. Hvert underkapittel innledes med en vurdering av kritiske aspekter ved det aktuelle nivået.

## 5.1 Utredning

På dette tidspunktet finnes ideen til et nytt produkt eller ny teknologi som tilsynelatende har et positivt markedspotensiale. Det må imidlertid tas høyde for at innehaveren av nyheten kan ha begrensede finansielle ressurser og manglende ekspertise når det gjelder kommersialisering av produktet.

### SJEKKLISTE 1: UTREDNING

#### Analyse av teknologiske prinsipper

– er produktet unikt?

- Definer konseptet fullstendig
- Verifiser kritiske antakelser
- Vurder om konseptet er "state-of-the-art"
- Vurder kritiske hindringer for produksjonen

#### Vurdering av markedets behov

– hvilke problemer vil produktet løse?

- Fastslå unike egenskaper ved teknologi og produkt
- Vurder distribusjonskanaler, trender og konkurrenter
- Analyser hindringer og risiko i markedet

#### Risikovurdering

– vil produktet gi fortjeneste?

- Estimer avkastningspotensial
- Vurder egen evne og erfaring i forbindelse med kommersialisering og forretningsdrift

Som gjennomgangen i kapittel 2 viser er det mange konsepter som bygger på bruk av metamaterialer som er fullt ut definerte og realiserbare fysiske prinsipper. Dette gjelder negativ brytning, fokuserende egenskaper, fasekompensering, dispersjonskompensasjon og rekonstruksjon av evanescente felt. Antakelsene om konseptenes oppførsel har blitt bekreftet teoretisk og demonstrert via simuleringer. Det er på det rene at dette er teknologiske gjennombrudd. Generelt kan det sies at det unike ved metamaterialer er mulighetene til å skreddersy et materiale slik at det gir responser som ikke finnes fra før i naturen, og derigjennom kan utvise hvilken som helst ønsket egenskap. Produkter av metamaterialer vil kunne tilfredsstille økende krav fra forbrukersamfunnet når innen svært mange områder. Dette gjelder krav til oppløsning, størrelse, rekkevidde, effektivitet, sikkerhet og miljø. Disse produktene vil i hovedsak kunne erstatte andre produkter som allerede eksisterer, og vil derfor kunne benytte seg av mange av de samme distribusjonskanalene.

Som nevnt tidligere står utviklingen av produkter overfor store utfordringer når det gjelder produksjon. Utviklingen av denne type teknologi er i tillegg svært kostbar og det er knyttet en stor risiko til utfordringene som gjenstår. Enkelte av utfordringene har man ingen umiddelbar løsning på. Dette gjelder for eksempel vanskelighetene med å produsere metamaterialer som fungerer for et bredt spekter av frekvenser. Dette betyr igjen at bruksområder som

## Kommersialisering av metamaterialer

forutsetter bruk av hele, eller deler av det synlige frekvensspekteret er svært vanskelig å oppnå. Et eksempel på dette er usynlighet for menneskeøyet.

Forskningen på metamaterialer er konkurranseutsatt siden det er et veldig aktuelt tema. Mange forskjellige forskningsgrupper bruker nå store ressurser for å prøve å komme fram til nye applikasjoner, og å sette disse i produksjon [26]. Dette betyr at det er en fare for at ulike forskningsgrupper kommer fram til liknende resultater samtidig og dermed konkurrerer om de samme samarbeidspartnerne og andelene i markedet. Det stilles samtidig stadig større krav fra forbrukerne til flere av områdene der metamaterialer vil stå for store utbedringer.

På bakgrunn av mulighetene nevnt ovenfor, er det rimelig å anta at selv med store utviklingskostnader vil det være mulig å finne investorer i alle utviklingsfasene til et produkt med metamaterialer. Det er for eksempel kjent at metamaterialer er et prioritert forskningsområde for det amerikanske forsvaret [38].

### 5.2 Gjennomførbarhet

På dette tidspunkt har en virksomhet eller bedrift ingen inntjening fra produktet selv og stillinger i virksomheten er ikke fullt ut besatt. Milepæler i dette stadiet er fullføringen av det endelige produktdesignet og utviklingen av en forretningsplan.

#### SJEKKLISTE 2: GJENNOMFØRBARHET

##### **Teknisk gjennomføring**

*- blir problemet løst?*

- Utvikle en fungerende modell og test de tekniske egenskapene
- Evaluer om produksjon er gjennomførbart
- Vurder miljømessige og sikkerhetsmessige aspekter

##### **Markedsstudie**

*- hvem vil kjøpe produktet?*

- Gjør en markedsanalyse og identifiser markedets størrelse, konkurrenter, distribusjonskanaler og trender i økonomi og industri
- Vurder mulig pris for produktet

##### **Økonomisk gjennomføring**

*- er det fornuftig å investere?*

- Gjør en økonomisk analyse basert på enhetspris, salgsvolum og kostnader
- Vurder om bedriften har inntjeningspotensiale

## Kommersialisering av metamaterialer

I denne delen av prosessen faller mange av de aktuelle produktene nevnt i utredningsnivået fra. Det viser seg at de tekniske utfordringene forbundet med produksjon blir for store til at det er mulig å produsere en prototyp som fungerer. Produkter som skal fungere ved optiske frekvenser klarer seg ikke gjennom dette punktet, da det forutsetter metamaterialer med srukturer den mot 20 nanometer. For produkter som skal fungere for større bølgelengder, slik som RF-signaler, har det blitt produsert fungerende prototyper som brukes som ulike bølgelederkomponenter og antenner.

På det nåværende tidspunkt vil det være minst risiko forbundet med å videreutvikle konsepter innen antenneapplikasjoner. Disse applikasjonene er ikke like sårbare når det gjelder tap i materialene og trenger ikke brede frekvensområder for å fungere.

### 5.3 Utvikling

Milepæler i utviklingsnivået er ferdigstilling av en prototyp. Det kan derfor forventes betydelige utgifter uten inntekter relatert til produktet. Stadiet betegnes derfor ofte som det dypeste punktet i Dødens Dal (ref. figur 3.1).

#### SJEKKLISTE 3: UTVIKLING

##### **Teknisk prototyp**

- hva blir produksjonskostnadene?

- Utvikle prototyp
- Identifiser nødvendige materialer og prosesser
- Utfør nødvendige tester
- Implementer utviklingsmetoder

##### **Strategisk markedsføring**

- hvor stort kan markedet bli?

- Opprett markedsføring som spesifikt ansvarsområde
- Definer endelig målområde i markedet
- Velg markedsføringskanaler
- Gjør tester i markedet

##### **Strategisk forretningsplan**

- hvem er ledelsen?

- Velg finansieringsmodell
- Fullfør prosesser i forbindelse med immaterielle rettigheter
- Velg organisasjonsstruktur
- Opprett et lederteam
- Fullfør forretningsplan

## Kommersialisering av metamaterialer

Når det gjelder metamaterialer har ingen produkter eller teknologier kommet videre fra dette nivået, selv om den fremtredende ekspert på metamaterialer Sir John Pendry mener det er nært forestående for produkter som skal fungere for frekvenser innen RF-området (microbølgerregionen)[38].

Dette betyr at parallelt med den videre teknologiske utviklingen, står den strategiske markedsføringen og utviklingen av en framtidig organisasjon sentralt.

Slik situasjonen er i dag, er det ikke nødvendigvis noen klar sammenheng mellom hva som markedsføres, og hvilke bruksområder som er realistiske. De fleste populærvitenskapelige magasiner som publiserer artikler om metamaterialer fokuserer på muligheten for å oppnå usynlighet. Dette kan være et positivt ledd i prosessen med å utnytte forskningsresultater kommersielt, i den forstand at forskere henvender seg til et bredere publikum og markedsfører det store potensialet metamaterialer innehar. Amerikanske og britiske forskningsgrupper har tradisjonelt vært flinke til dette. Ved å fokusere på (nesten) naturstridige fenomener som usynlighetskapper, oppnås en stor interesse og entusiasme i en stor del av befolkningen, ikke bare spesielt interesserte forskerkolleger.

På den andre siden kan interessen avta, og gå over i skuffelse når det viser seg at dette vil ta svært lang tid. Andre applikasjoner, som egentlig er svært nyskapende får da ufortjent lite oppmerksomhet.

En annet mer hensiktsmessig framgangsmåte kan da være å publisere artikler der faktiske forskningsresultater forenkles på en slik måte at hovedlinjene blir forståelig for et noe bredere publikum, men ikke absolutt alle. Dette er med på å skape en realistisk forventning i markedet, som igjen kan virke som motiverende faktor for næringslivet, og derigjennom fungere som incitament for tidligfaseinvesteringer.

En dansk forskningsgruppe har nylig fått en slik type omtale i et riksdekkende teknologisk magasin, i forbindelse med oppstarten av et nytt forskningsprosjekt innen mikroskopiske antenner [3]. De danske forskerne er i dette tilfellet flinke til å forenkles forskningsresultatene og fokusere på hva som blir de resulterende effektene for folk flest. Dette er en langsiktig form for markedsføring, og påvirkning av viktige grupperinger i markedet.

### 5.4 Introduksjon

Dette er den kritiske fasen hvor produktet endelig introduseres til markedet. Bedriften vil nå få begrenset inntjening på produktet.

### SJEKKLISTE 4: INTRODUKSJON

#### Produksjonsklar prototyp

- fungerer prototypen?

- Utvikle en prototyp som er klar til produksjon
- Velg utstyr og produksjonsprosesser
- Utvikle støttesystemer
- Demonstrer produktets egenskaper

#### Markedsvalidering

- hvilken respons gir markedet?

- gjennomfør begrenset testsalg
- Etabler samarbeidsforhold i markedet
- Analyser resultatene fra salget
- Evaluer kundene
- Oppdater markedsplanen

#### Oppstart av virksomhet

- er organisasjonen klar?

- Etabler bedriften
- Ansett personer i nøkkelstillinger
- Utarbeid kontrollfunksjoner
- Sikre videre finansiering

Når ett eller flere av metamaterialproduktene som ligger nærmest en realisering i framtiden blir introdusert til markedet, er det viktig å presisere at omgivelsene er dynamiske og i kontinuerlig endring. Det betyr at et produkt som var "hot" da prosessen med kommersialisering startet, kan være utdatert når produktet kommer på markedet. Et annet faremoment er at andre teknologier kommer i forkjøpet. Eksempelvis kan utviklingen innen fotoniske krystaller oppfattes som en konkurrerende teknologi, da også denne framgangsmåten gjør det mulig å oppnå negativ brytning.

Antakelser gjort i tidlige faser og nivåer kan være av ulike grunner være gale, eller ha behov for korrigeringer underveis, uten at dette betyr at produktet må forkastes. Da kan det være hensiktsmessig å gå tilbake ett eller flere nivåer og starte prosessene på nytt, for å være sikret et vellykket resultat.

En virksomhets evne til å være fleksibel og raskt reagere på innhentet informasjon om endringer blir her en kritisk faktor for å oppnå suksess.



### 5.5 Vekst

Bedriften er nå inne i et stadium med fullskala produksjon for hovedproduktet, og skal ekspandere i markedet med tanke på distribusjon. Organisasjonsstrukturen skal nå være formelt på plass.

#### SJEKKLISTE 5: VEKST

##### Produksjon

*–er fullskala produksjon inne rekkevidde?*

- Ferdigstill kommersielt design
- Etabler kvalitetskontroll
- Forbedre og utvikle produksjonsfasilitetene
- Start fullskala produksjon

##### Salg og distribusjon

*–øker markedsandelene?*

- Utvid distribusjonen
- Analyser respons fra konkurrenter
- Vurder kundenes tilfredshet
- Vurder samarbeidspartneres tilfredshet
- Utvikle produktets særpreg

##### Vekst i virksomheten

*–er bedriften lønnsom?*

- Overvåk virksomhetens posisjon i markedet
- Ansett personale og gi opplæring
- Fullfør kontrakter
- Sikre finansiering
- Implementer visjon, mål og ledelsesstrategier

En vanlig utfordring for virksomheter som utvikler ny teknologi er at denne kopieres av konkurrenter så snart den blir introdusert i markedet. Denne utfordringen gjelder også for de mange forskningsgruppene som arbeider med problemstillinger innen metamaterialer. Forskningsgruppene har de samme typer utfordringer- det innebærer at så snart en gruppe har funnet en god løsning på en utfordring kan denne løsningen etter stor sannsynlighet tilpasses utfordringene til mange av de andre forskningsgruppene. Dette medfører at konkurrentene nyter godt av resultatene, uten å måtte investere like mye i utviklingsarbeidet. Dette er en stor risiko, da det ofte er nyskappingsarbeidet som tar mest tid og er vanskeligst å finansiere.

### 5.6 Modning

Bedriften er nå vel etablert i markedet og må stå for kontinuerlig forbedring og nyskaping for å forbli konkurransedyktig.

#### SJEKKLISTE 6: MODNING

##### Produksjonsstøtte

*-skal nytt eller bedre produkt introduseres?*

- Maksimer produksjonen
- Etabler hjelpefunksjoner for forbrukere
- Garantitjeneste
- Implementer opplæringsprogram

##### Spredning i markedet

*-er nye markeder identifisert?*

- Oppretthold plasseringen i markedet
- Overvåk markedet, for nye trender og andre endringer
- Identifiser mulige nye markeder

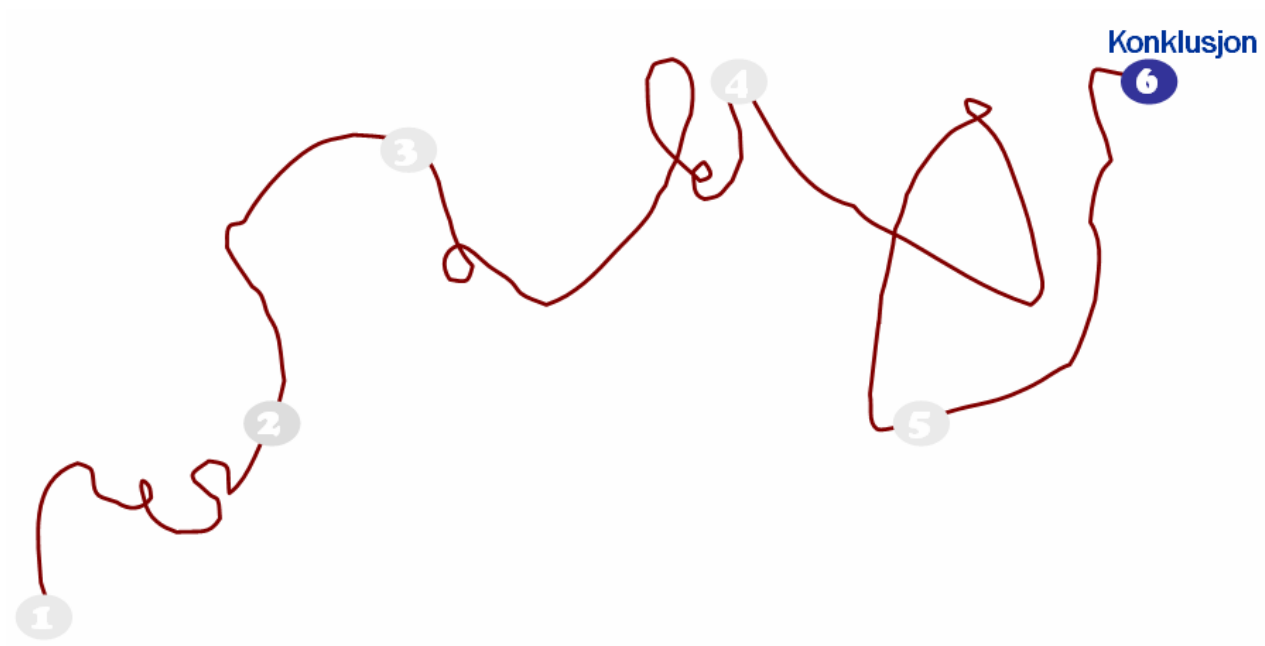
##### Modenhet i virksomheten

*-blir gevinsten reinvestert?*

- Etabler en SWOT-prosedy
- Invester overskuddet

På dette nivået kan det anmerkes at dersom og når teknologien for produksjon av metamaterialer blir utviklet slik at én applikasjon er mulig, vil teknologien også kunne utnyttes til et antall andre applikasjoner og bruksområder. Det vil si at det er gode muligheter for ekspansjon i markedet og dergjennom befeste sin posisjon ved å introdusere nye produkter. Avhengig av at virksomheten har en godt utviklet kultur og tidligere gjennomført markedsføring, vil det allerede være etterspørsel i markedet etter det nye produktet som eventuelt er i utvikling.

## Kommersialisering av metamaterialer





# 6 KONKLUSJON

Metamaterialer representerer et paradigmeskifte i fysikken, representert ved muligheten til å skreddersy materialer slik at de utviser nye egenskaper som ikke er kjent fra tidligere i naturen. Dette gjør at begrensinger som tidligere har vært begrunnet i fysiske lover og prinsipper kan oppheves og har stor betydning for ulike tekniske applikasjoner, særlig med tanke på størrelse og effektivitet.

En av de viktigste oppdagelsene i metamaterialenes historie er bevist på at det er mulig å produsere materialer med negativ brytningsindeks. I kjølvannet av denne oppdagelsen kom en rekke andre nye fenomener. Dette gjelder blant annet antiparallelle hastigheter, negativ brytning, reversering av evanescente felt og fasekompensasjon. Disse endrede fysiske fenomenene danner grunnlaget for at det er mulig å omgå tidligere fundamentale begrensinger i materialene. Det har for eksempel blitt mulig å produsere linser med høyere oppløsning enn bølgelengden til det innkommende lyset. Analogt er det teoretisk mulig å produsere blant annet kavitetsresonatorer, bølgeledere, spredere, koplere, faseskifttere og antenner der tidligere fundamentale krav til størrelse nå er opphevet. Disse effektene oppnås hovedsaklig ved å utnytte resonansfenomenet som oppstår i grenseflaten mellom to materiallag der fortegnet til de grunnleggende materialparametrene  $\epsilon$  og  $\mu$  er motsatt rettet i de to materialene. Ved hjelp av materialdesig kan parameterverdiene og dermed materialenes egenskaper og oppførsel endres.

Denne nye generasjonen av materialer som i teorien kan designes til å utvise nesten helt vilkårlige egenskaper forventes å stå for en dramatisk utvikling innen flere områder som er høyt prioritert. Dette gjelder trådløs kommunikasjon, hvor kravene til utstyr med høy effektivitet, liten størrelse og stor rekkevidde tiltar med økende intensitet. Bruksområdene er mange og strekker seg fra småforbrukerens garasjeport til forsvarets søk etter terrorister. Videre vil metamaterialenes fokuseringsevne kunne ha positiv innvirkning på miljøet, gjennom effektivisering av solenergiteknologien. Problemstillingene som metamaterialer kan tilby løsninger på, både i nær framtid og lengre fram i tid, vil altså ha avgjørende betydning for forbrukerens hverdag og samfunnet generelt. Dette er en god grunn til at dette er et forskningsområde det vil være hensiktsmessig å utvikle videre i kommersiell retning.

De fysiske prinsippene rundt metamaterialer synes å være godt forstått, gjennom analyser og simuleringer, men det er fortsatt knyttet store utfordringer til produksjon og målinger.

Utfordringene har nær sammenheng med prinsippene for deres eksistens. For at et elektromagnetisk felt skal "se" et homogent materiale, er det nødvendig at byggesteinene i metamaterialet er mye mindre enn bølgelengden til det innkommende feltet. Frekvensområdet mellom Gigaertz (GHz) og Terrahertz (THz) har bølgelengder som spenner fra meter til millimeter. Dette er frekvensområdet for mye av dagens trådløse kommunikasjon, og med dagens

## Kommersialisering av metamaterialer

teknologi er det mulig å produsere metamaterialer med strukturer som er mindre enn dette. For å fungere for synlig lys må materialdimensjonene ned mot nanometerskalaen, og dette byr derimot på store teknologiske utfordringer. I disse frekvensområdene vil materialene som brukes til produksjon av metamaterialer dessuten ha svært store tap, noe som vil ødelegge for deres evne til å fungere som ønsket.

En annen stor utfordring er å få metamaterialene til å fungere for et bredt frekvensspekter. Dette er svært vanskelig på grunn av at metamaterialene er svært dispersive og dermed raskt endrer sin respons så snart man beveger seg utenfor det aktuelle frekvensområdet.

Alle disse utfordringene er med på å gjøre forhåpningene om å oppnå usynlighet for menneskeøyet svært lite realistiske. I første omgang kan det bare forventes for et smalt frekvensbånd for lavere frekvenser.

Tekniske applikasjonene det kan knyttes mye større forventninger til er derimot de som skal fungere i mikrobølgerregionen. Her er produksjonsteknologien allerede godt utviklet, og utfordringene i forbindelse med tap er ikke like store.

Metamaterialer generelt står likevel ikke umiddelbart foran en fullskala kommersialiseringsprosess, verken internasjonalt, ved NTNU eller andre forskningsinstitusjoner i Norge. Mange land som for eksempel Danmark, Storbritannia og USA bruker store ressurser innen grunnforskning på metamaterialer og det kan forventes at produkter med metamaterialer vil bli introdusert til markedet i nær framtid. Da vil sannsynligvis de som har knyttet til seg de riktige samarbeidspartnerne og gjort de mest grundige forberedelsene på en eventuell kommersialiseringsprosess få et forsprang.

Den økte internasjonale konkurransen og det økte behovet for vitenbasert verdiskapning i Norge er en viktig grunn til at det på et generelt grunnlag er nødvendig med økt samarbeid mellom næringsliv og forskningsinstitusjoner. Denne utviklingen står også ovenfor en rekke utfordringer som i hovedsak kan knyttes til manglende erfaring og liten motivasjon i forskningsinstitusjonene, i tillegg til manglende finansieringsevne og for dårlig utviklede tverrfaglige samarbeidsarenaer.

Forskningsinstitusjonene kan blant annet være med på å påvirke interessen for ulike fagfelt ved å synlige framtidige bruksområder som kommer som resultat av forskningsresultatene på en bedre måte. Lykkes forskningsmiljøene med dette, vil det være med på å øke næringslivets motivasjon for å bidra med midler på tidligere tidspunkt i en utviklingsprosess. Næringslivet på sin side kan samtidig dra nytte av tidligere tilgang til kunnskap, noe som er helt avgjørende for å opprettholde en plassering i et konkurranseutsatt marked.

Potensialet for kommersialisering av forskningsresultater generelt og metamaterialer spesielt er med andre ord stort, og mulighetene er mange.

### LITTERATURLISTE

- [1] Technology Rewiev, [www.technologyrewiev.com](http://www.technologyrewiev.com), 12. mars 2007
- [2] A. Lakhtakia og T.G. Mackay, OPN "Meet the Metamaterials", januar 2007
- [3] Ingeniøren, utgave 9, 2. mars 2007
- [4] Soria Moria-erklæringen, september 2005
- [5] Norsk forskningsråd, Policynotat for forskningsbasert nyskapning og innovasjon, 2007
- [6] V. Veselago, Soviet Physics Uspekhi, 10, 1968
- [7] Smith, Padilla, Vier, Nemat-Nesser og Schultz, Physical review Letter vol. 84, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity", mai 2000.
- [8] Pendry, Holden, Robbins, og Stewart, Physical , 10, "Condensed Matter", 1998
- [9] J.B Pendry, Contemporary Physics, volume 45, nr. 3, "Negative Refraction" 2004
- [10] Saleh and Teich, Fundamentals of Photonics, 1991, kapittel 5
- [11] Johannes Skaar, forelesningsnotater "Klassisk optikk og elektromagnetisme", Fotonikk utvalgte emner, NTNU høst 2006
- [12] J.B. Pendry og D. Smith, Physics today, "Reversing Light With Negative Refraction", 2004
- [13] Caloz og Itoh, proceedings of the IEEE, vol.93, no.10 "Metamaterials for High-Frequency Electronics", October 2005
- [14] Johannes Skaar, Physical review E73, "Fresnel equations and the refracting index of active media", 2006
- [15] Engheta og Ziolkowski, IEEE Transactions on microwave theory and techniques, vol 53, no. 4, "A Positive Future for Double-Negative Metamaterials", april 2005
- [16] Nussenzveig, Causality and Dispersion Relations, Academic Press, New York, 1972, Kapittel 1
- [17] E. Hecht, Optics, Addison Wesley, 4.th edition, 2002
- [18] M. Mansfield og C. O'Sullivan, Understanding Physics, Wiley and Sons, 1999
- [19] Johannes Skaar, Negative refraction: a tutorial, Institutt for elektronikk og telekommunikasjon, NTNU 2005
- [20] Ø. Lind-Johansen, "Hilberttransformpar og negativ brytning", Masteroppgave ved NTNU, 2006
- [21] J.B. Pendry, Optics and Photonics News, "Manipulating the Near Field With Metamaterials", September 2004
- [22] Engheta og Ziolkowski, "Metamaterials- physics and Engineering Explorations", John Wiley and Sons, 2006
- [23] Engheta og Alu, Physical Insight into the "Growing" Evanescent Fields of Double-Negative Metamaterial Lenses Using their Circuit Equivalence, IEEE,
- [24] D.M Pozar, Microwave and RF Design of Wireless Systems, Wiley and Sons, 2001
- [25] Magasinet Science, [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org), 2007

## Kommersialisering av metamaterialer

- [26] Pressemelding fra Forsknings- og Innovasjonsstyrelsen i Danmark, Ministeriet for Vitenskap Teknologi og Utvikling, mars 2007
- [27] Norsk forskning og Innovasjon, Resultater av forskning og innovasjonsvirksomhet.
- [28] Kotler og Keller, Marketing Management 12.th edition, Pearson Prentice Hall, 2006
- [29] H. Randall Goldsmith, [www.asbdc.ualr.edu/techology/commercialization](http://www.asbdc.ualr.edu/techology/commercialization), Arkansas Small Business Development Center, Univerity of Arkansas at Little Rock
- [30] Danmarks forskningspolitiske råd, "Bedre kommersialisering af offentlig forskning til gavn for samfundet", [www.vtu.dk](http://www.vtu.dk), mars 2006
- [31] Rektor ved NTNU, Veiledning for nyskaping ved NTNU, april 2006
- [32] Videnskabsministeriet, "Nye veje mellem forskning og erhverv", september 2003
- [33] Norsk forskningsråd, Policynotat for forskningsbasert nyskaping og innovasjon, 2007
- [34] Norsk forskning og Innovasjon, Resultater av forskning og innoavsjonsvirksomhet ?
- [35] OECD, "Turning Science into business: Patenting an Licensing at Public Research Organizations"
- [36] OECD, "Science and Technology Indicators", 2002
- [37] Klikou, Gulbrandsen og Iversen, Patentering fra norske universiteter, høyskoler og forskningsinstitusjoner, NIFU STEP, studier av Innovasjon, forskning og utdanning, april 2006
- [38] Didier Felbacq, Recent Advances in Cloaking [www.osa-opn.org](http://www.osa-opn.org) OPN, June 2007
- [39] John Pendry, Conversations, OPN [www.osa-opn.org](http://www.osa-opn.org) , juni 2007