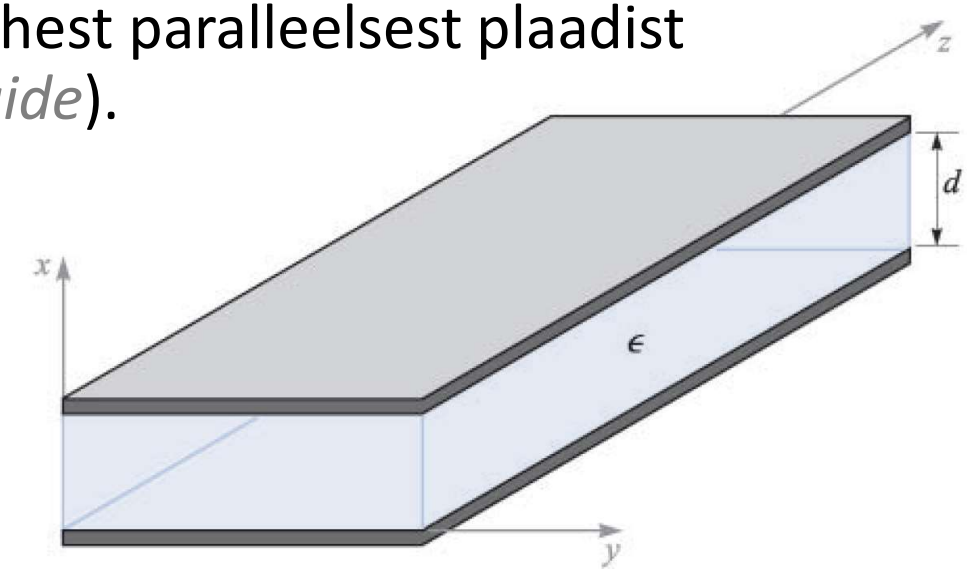
6. Lainejuhid

IEE2580 – Antennid ja raadiolevi

Lainejuht

- **Lainejuht** (*waveguide*) on laineid, näiteks heli- või elektromagnetlaineid, suunav süsteem mis minimeerib energiakadusid piirates lainete levi ainult ühe võimaliku suunaga.
- Analüüsi seisukohast on lihtsaim kahest paralleelsest plaadist koosnev lainejuht (*parallel-plate guide*).





Joonis: W.H. Hayt, J.A. Buck. Engineering Electromagnetics, 6th edition.

Akustiline lainejuht - kõnetoru

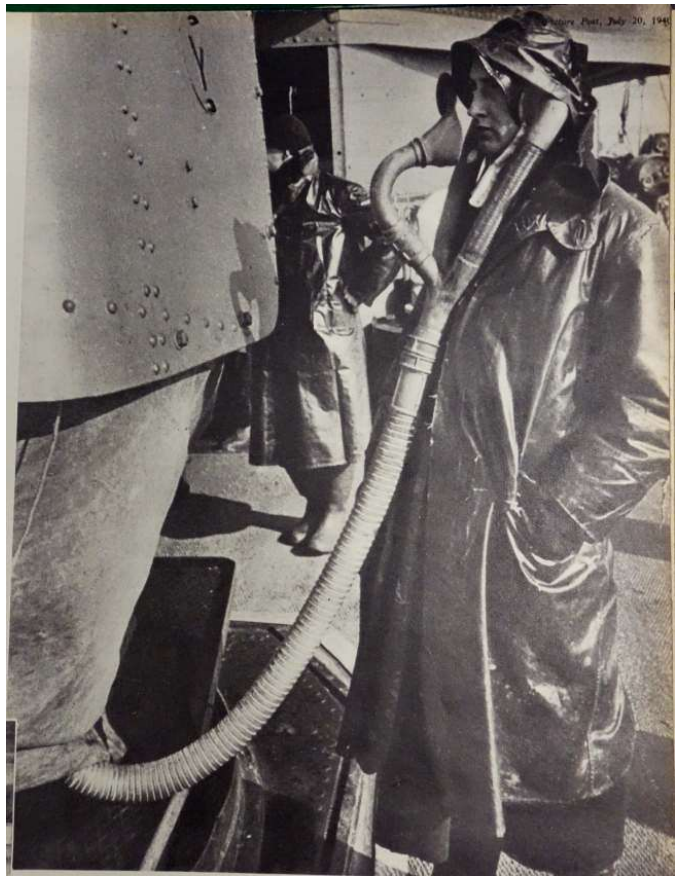
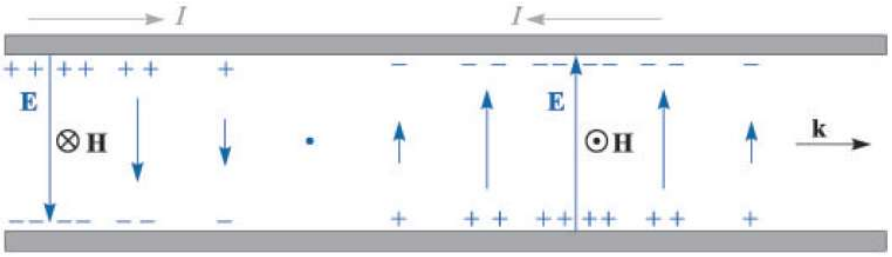


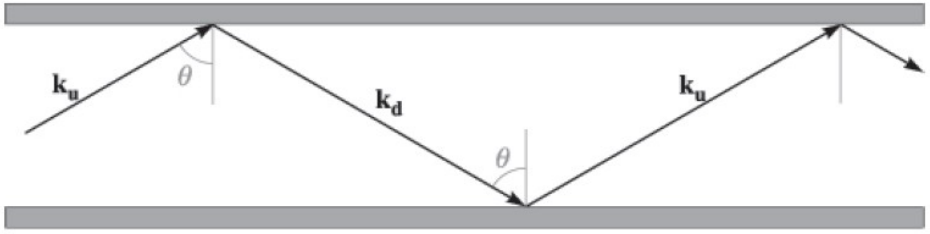
Foto: http://www.museum.alibaba.sk/MUSEUM/COMMS/voicepipe/voicepipe.htm

Lainejuht vs ülekandeliin

- Mille poolest erinevad lainejuhid ülekandeliinist?
- Erinevus seisneb, energiat üle kandva süsteemi sees levivate elektri- ja magnetväljade kujus.



Ülekandeliin (TEM).

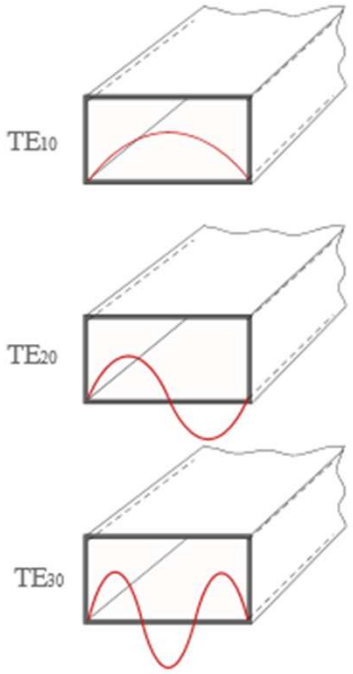


Lainejuht (TE või TM).

Joonis: W.H. Hayt, J.A. Buck. Engineering Electromagnetics, 6th edition.

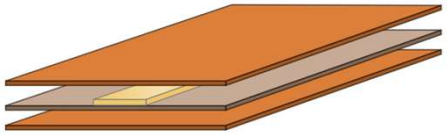
Moodid lainejuhis

- Mood (*mode*) on harmooniliste lainete muster ülekandeliinis või resonaatoris.
- Pikkilaine (*longitudinal mode*).
- Ristlained (*transverse modes*):
  - TEM - *Transverse Electro Magnetic*;
  - TE – *Transverse Electric* (H - mood, s-polarisatsioon)
  - TM – *Transverse magnetic* (E - mood, p-polarisatsioon);
  - Hübriid – TE ja TM moodide kombinatsioon;
  - Kvaasi-TEM mood.



Joonis: www.electronics-notes.com

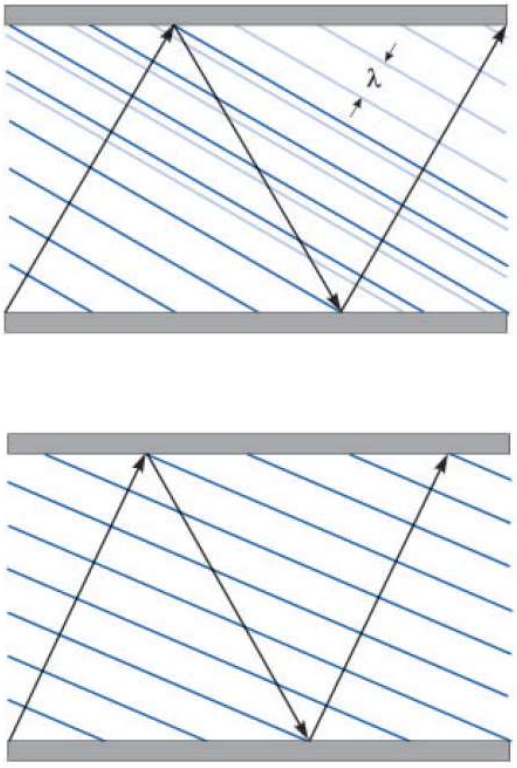
Lainejuht vs ülekandeliin



- Ülekandeliin koosneb kahest või enamast juhist ja toetab reeglina TEM või kvaasi-TEM moodi
  - Koaksiaalkaabel, keerdpaar ja mikroribaliin on kõik kahe juhtiva osaga;
  - Ribaliinil ja koplanaarsel ülekandeliinil on mõlemal kolm juhtivat osa.
- Lainejuht võib koosneda ainult ühes juhtivas pinnast, mitmest juhtivast pinnast või olla üldse ilma juhtivate osadeta. Üldiselt levivad lainejuhis TE, TM või hübriidmoodid, sõltuvalt ehitusest võib lainejuhis levida ka TEM mood.
  - Fiiberoptiline kaabel on hea näide lainejuhist millel ei ole ühtegi juhtivat osa.

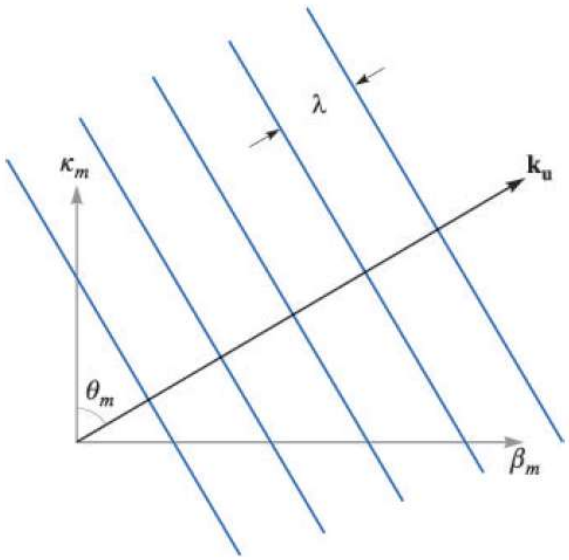
Paralleelsetest plaatidest lainejuht

- Levimood tekib siis kui kõik ülesse liikuvad lained on omavahel samas faasis.
- Sellisel juhul on automaatselt täidetud sama tingimus ka allapoole liikuvate lainete jaoks.



Joonis: W.H. Hayt, J.A. Buck. Engineering Electromagnetics, 6th edition.

Lainevektor paralleelsete plaatide vahel



- Joonisel on kujututatud ülese suunatud lainevektorit $\mathbf{k_u}$ ja selle komponente. Sinise jooned kujutavad lainefronte
- Tähistame lainevektori *x* ja *z* komponente $\kappa_m = k_x$ and $\beta_m = k_z$.
- Täisarvuline indeks *m* on **moodi number**.
- Probleemi geomeetriast lähtub, et *m*-inda moodi faasikonstant on

$$\beta_m = \sqrt{k^2 - \kappa_m^2}\,.$$

Joonis: W.H. Hayt, J.A. Buck. Engineering Electromagnetics, 6th edition.

Paralleelsetest plaatidest lainejuht

- Lihtsuse mõttes eeldame, et plaatide vaheline materjal on kaovaba ($\varepsilon = \varepsilon'$) ja mittemagneetiline ($\mu_r = 1$). Lainearv k on siis

$$k = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon} = \frac{\omega\sqrt{\varepsilon_r}}{c} = \frac{\omega n}{c},$$

  kus c on valguse kiirus vaakumis ja n on levikeskkonna murdumisnäitaja.

- Faasikonstandi põhjal saab leida m-inda moodi faasi- v_{pm} ja grupikiirused v_{gm} :

$$v_{pm} = \frac{\omega}{\beta_m} \qquad\qquad v_{gm} = \frac{d\omega}{d\beta_m}.$$

Resonantsid

- Lainevektori $\mathbf{k_u}$ ja $\mathbf{k_d}$ *x* komponent κ_m võimaldab määrata nõuded lainefrontide vahelisele faasinihkele mis tagavad ristsihilise resonantsi lainejuhis (*transverse resonance*).
- Laine leviga ristises sihis (*x* - telje sihis), edasi-tagasi levimisel, tekkiv summaarne faasinihe peab olema võrdne 2π täisarvkordsega

$$2\kappa_m d = 2\pi m.$$

- Viimasest saame tuletada vajaliku lainevektori ristsihilise komponendi väärtused

$$\kappa_m = \frac{\pi m}{d} = k\cos\theta_m\,.$$

Lubatud moodid

- Lubatud moodidele vastavad lainenurgad (*wave angles*) on:

$$\theta_m = \arccos\left(\frac{m\pi}{kd}\right) = \arccos\left(\frac{m\pi c}{\omega n d}\right) = \arccos\left(\frac{m\lambda}{2nd}\right).$$

- Faasikonstant vastavate moodide jaoks

$$\beta_m = \sqrt{k^2 - \kappa_m^2} = k\sqrt{1 - \left(\frac{m\pi}{kd}\right)^2} = k\sqrt{1 - \left(\frac{m\pi c}{\omega n d}\right)^2}.$$

Lõikesagedus

- Lainejuhi lõikesagedus (*cutoff frequency*)

$$f_{cm} = \frac{mc}{2nd}.$$

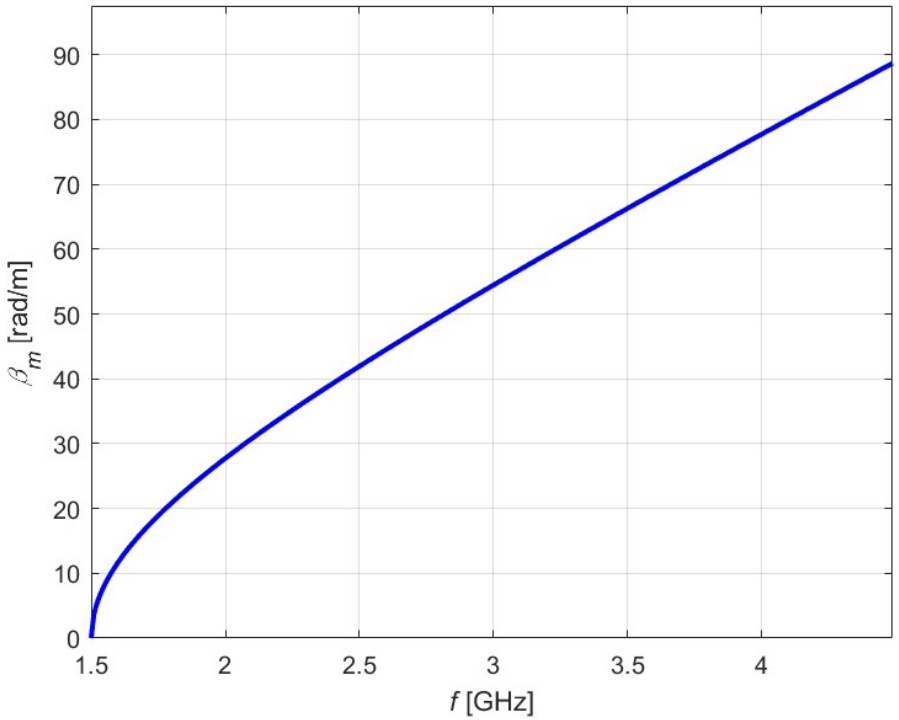
- Faasikonstanti saab viimase kaudu väljendada kui

$$\beta_m = \frac{2\pi n f}{c}\sqrt{1 - \left(\frac{f_{cm}}{f}\right)^2}.$$

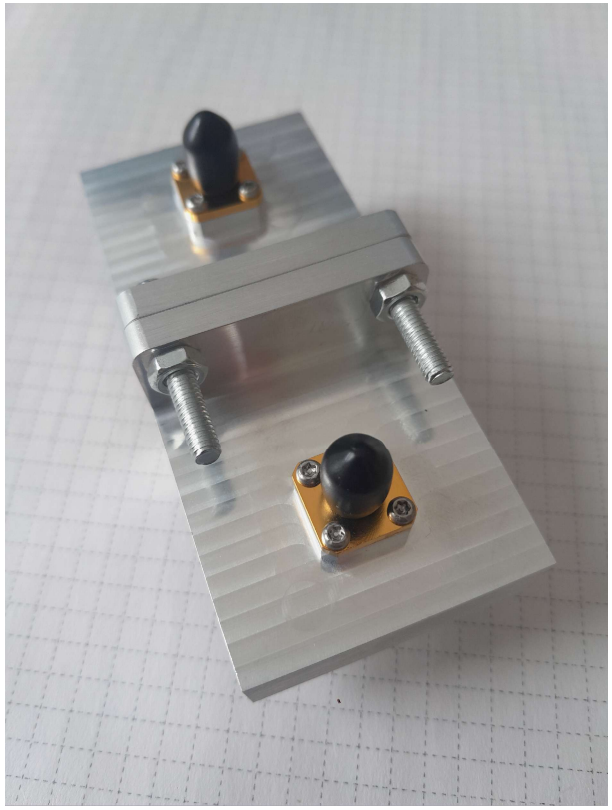
- Näeme, et kui signaali sagedus *f* on lõikesagedusest f_{cm} suurem, siis faasikonstant on reaalarvuline ja vastav mood levib lainejuhis.
- Kui aga $f < f_{cm}$ siis β_m on imaginaarne ja vastav mood lainejuhis **ei levi**.

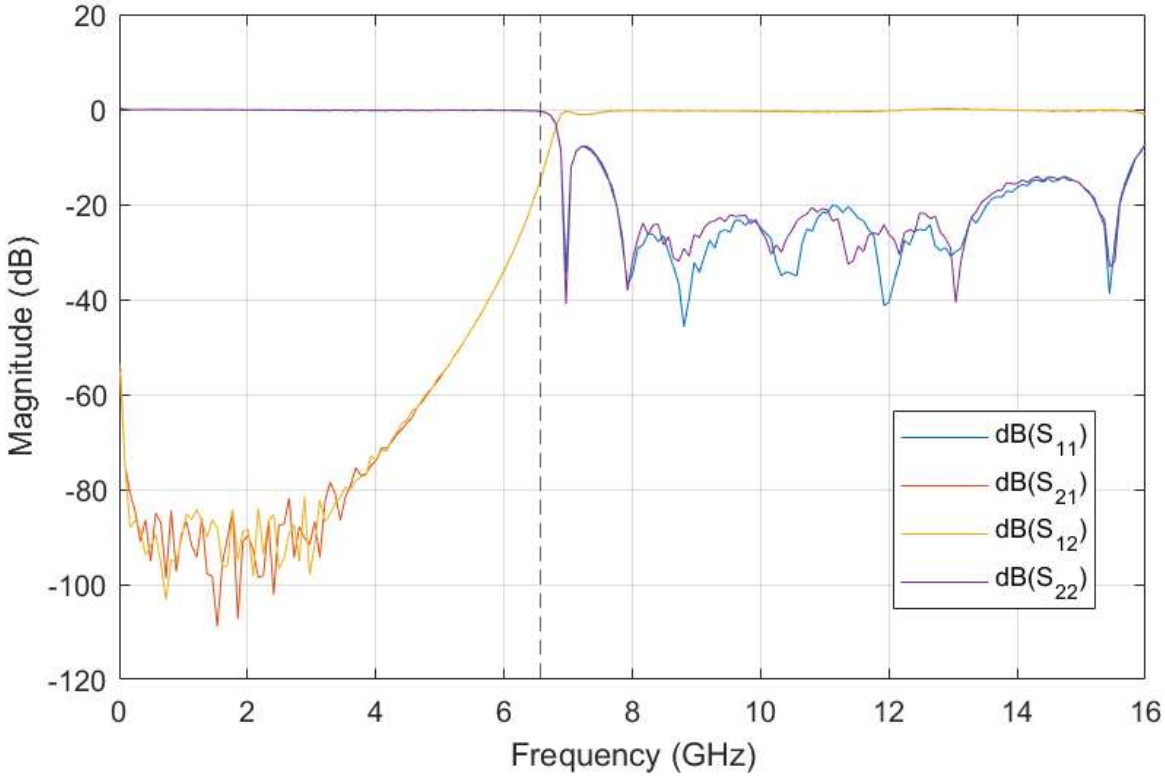
Lõikesageduse näide

- Paralleelsetest plaatidest lainejuht:
  - Levikeskkonnaks on vaakum (õhk): $n = 1$;
  - Esimene mood $m = 1$;
  - Plaatide vahekaugus: $d = 10$ cm.
- Faasikonstandi sõltuvus sagedusest on mittelineaarne.
- Esimese moodi lõikesagedus $f_{c1} = 1{,}5$ GHz.



Lõikesagedus – näide



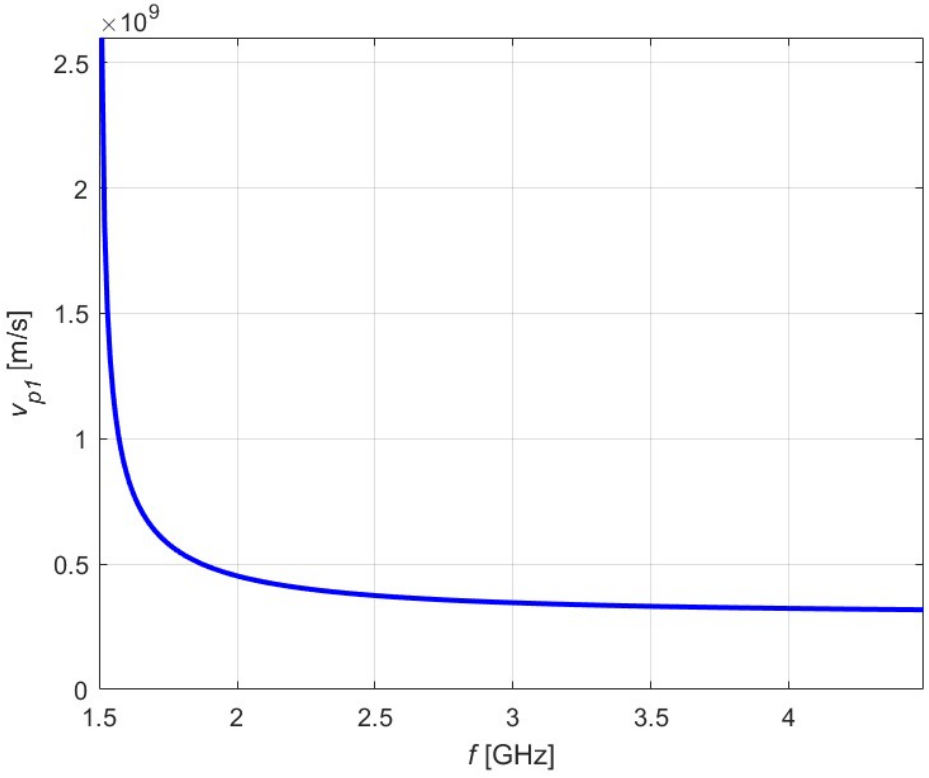


Faasikiirus

- Näeme, et faasikiirus sõltub sagedusest

$$v_{pm} = \frac{\omega}{\beta_m} = \frac{c}{n \sin \theta_m}.$$

- Faasikiirus näitab faasi (lainefrontide) kiirust *z*-telje sihis. Näeme, et see on suurem kui valguse kiirus vaakumis *c*!

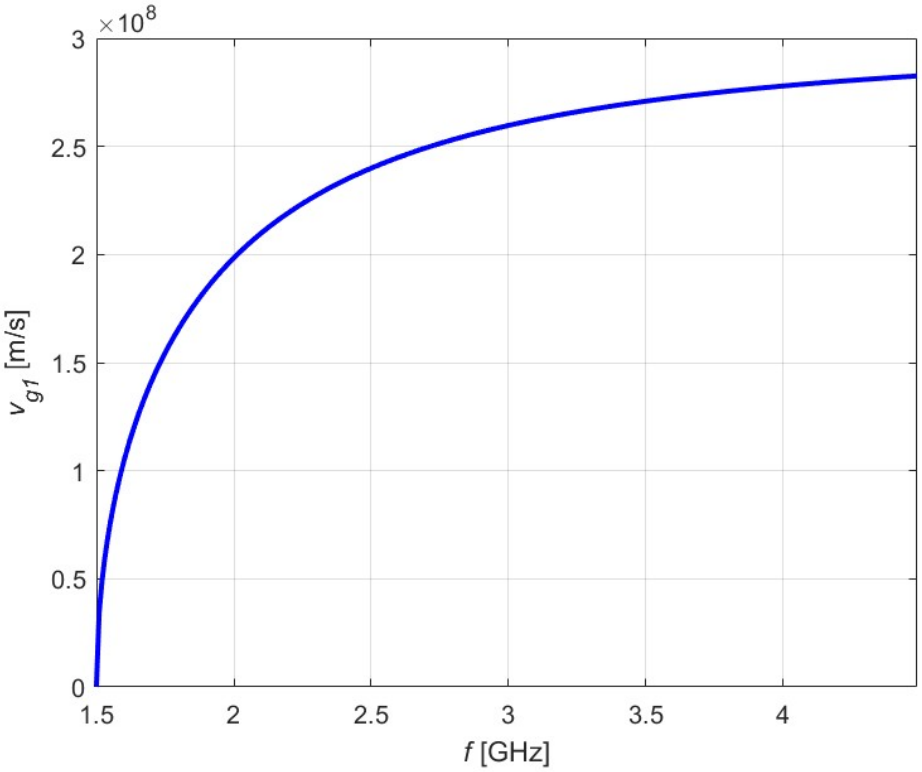


Grupikiirus

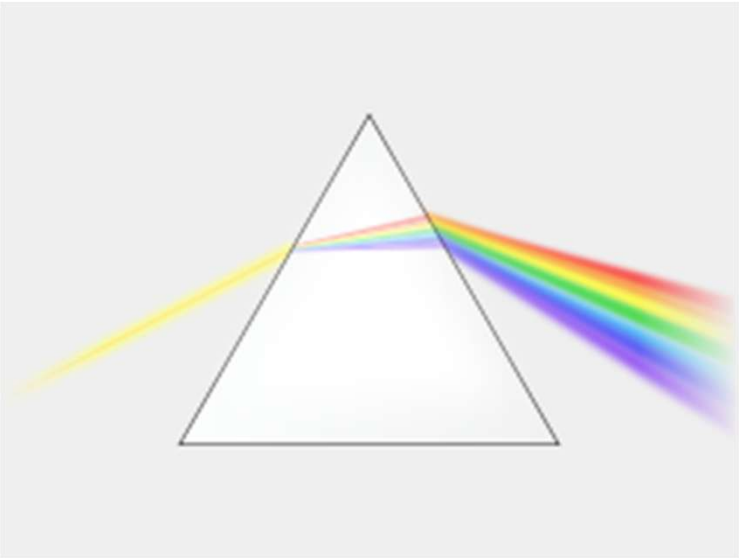
- Grupikiirus

$$v_{gm} = \frac{c}{n}\sqrt{1-\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)^2} = \frac{c}{n}\sin\theta_m\,.$$

- Grupikiirus on laine levikiiruse projektsioon levisuunal (*z*-telje sihis). See kiirus on alati väiksem või võrdne valguse kiirusega vaakumis.
- Grupikiiruse sagedussõltuvust nimetatakse **dispersiooniks** (*dispersive waveguide*).



Kromaatiline dispersioon



- Dispersiooninähtus põhjustab valge valguse jagunemist spektrikomponentideks prismas.

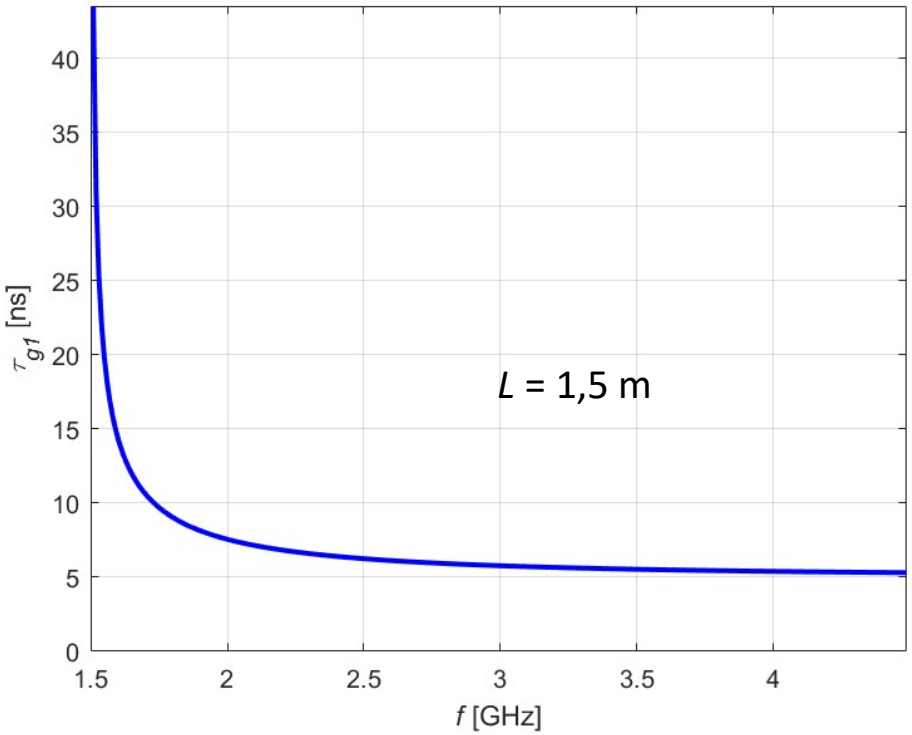
Grupihilistus

- Grupihilistus τ_g on pöördvõrdeline grupikiirusega

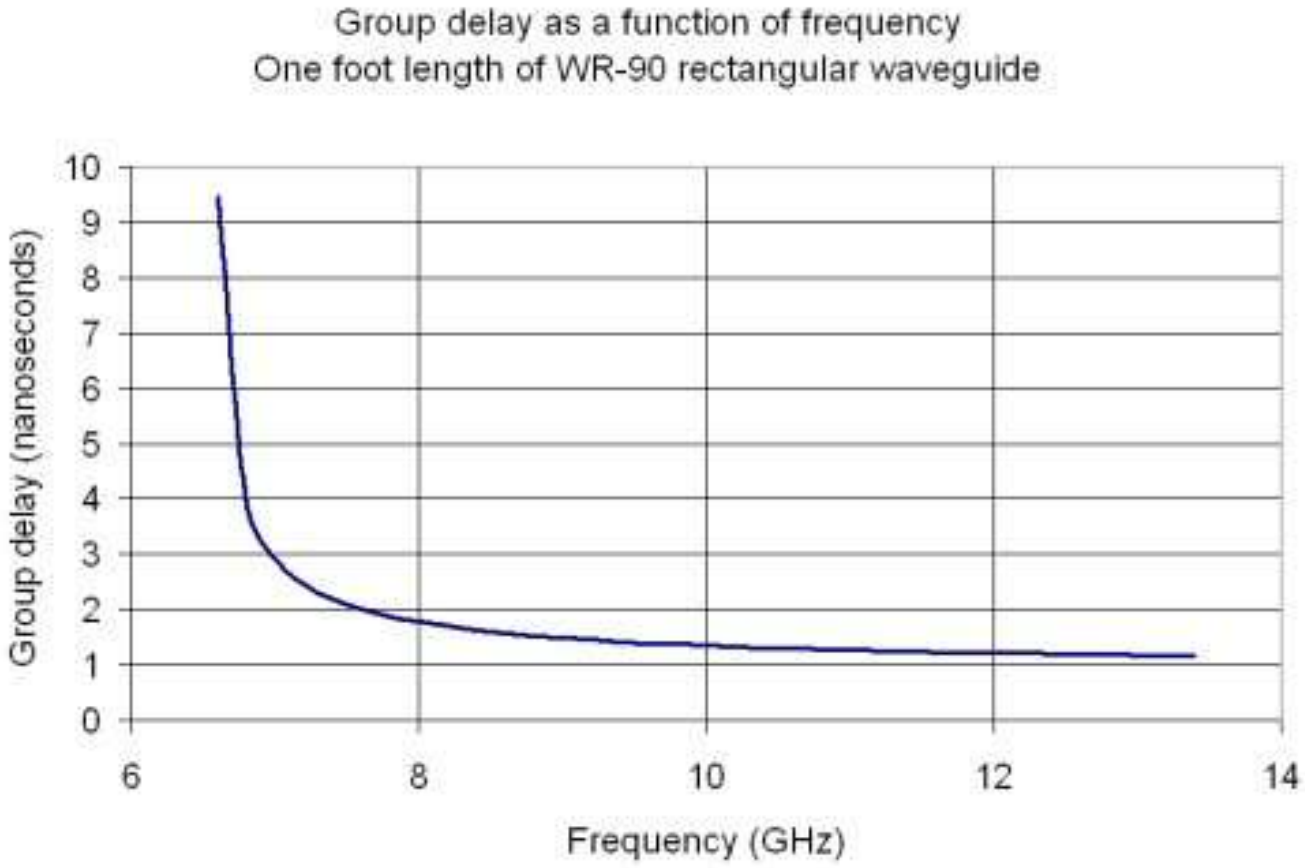
$$\tau_{gm} = \frac{L}{v_{gm}} = L\frac{d\beta_m}{d\omega},$$

kus *L* on lainejuhi pikkus *z* telje sihis.

- Allpool lõikesagedust on grupihilistus lõputult suur – teisisõnu signaal sellisel juhul lainejuhis ei kulge.



Näide – grupihilistus nelinurkses lainejuhis



WR90:
22,9 x 10,2 mm
8,20 – 12,40 GHz
6,557GHz
13,114 GHz
X-band

Joonis: https://www.microwaves101.com/encyclopedias/dispersion

Elektriväli paralleelsete plaatide vahel

- Elektriväli konkreetse moodi korral on kõikide, langenud ja peegeldunud, väljade superpositsioon.
- TE lainete korral avaldub faasorkujul elektriväli lainejuhis langenud ja peegeldunud lainete kaudu kui

$$E_{ys} = E_0 e^{-j\mathbf{k_u}\cdot\mathbf{r}} - E_0 e^{-j\mathbf{k_d}\cdot\mathbf{r}},$$

kus

$$\mathbf{k_u} = \kappa_m \mathbf{a}_x + \beta_m \mathbf{a}_z;$$
$$\mathbf{k_d} = -\kappa_m \mathbf{a}_x + \beta_m \mathbf{a}_z;$$
$$\mathbf{r} = x\mathbf{a}_x + z\mathbf{a}_z.$$

Elektriväli paralleelsete plaatide vahel

- Summaarne elektrivälja faasor on

$$E_{ys} = 2\mathrm{j}E_0 \sin(\kappa_m x)\, \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\beta_m z}.$$

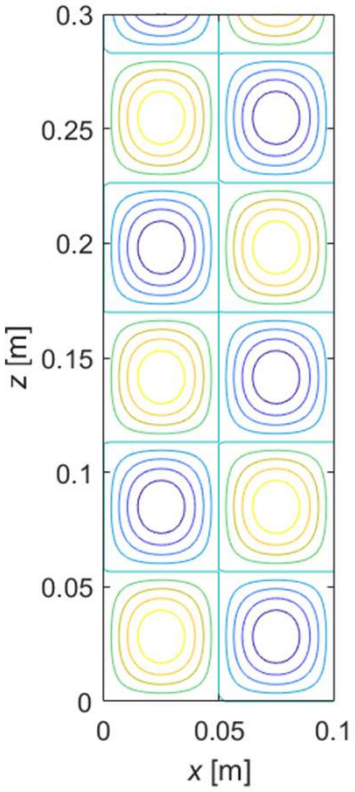
- Viimasele vastav välja ajaline kuju on (TE mood, üle lõikesageduse) on siis

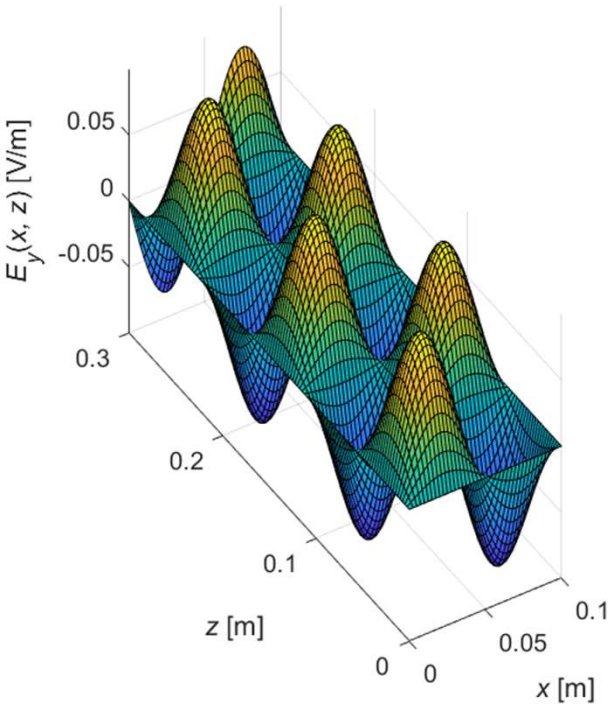
$$E_y(z,t) = -2E_0 \sin(\kappa_m x) \sin(\omega t - \beta_m z)\,.$$

- Näeme, et laine kulgeb *z*-telje suunas kusjuures laine profiil varieerub *x* telje sihis.
- Viimast võib tõlgendada kui samaaegset kulgevat lainet *z* telje suunas ja seisulainet *x* – telje sihis.

Elektriväli paralleelsete plaatide vahel

- Näide:
  - Levikeskkonnaks vaakum: $n = 1$;
  - Teine TE mood $m = 2$ (TE_2);
  - Plaatide vahekaugus: $d = 10$ cm;
  - Töösagedus $f = 4$ GHz;
  - Ajahetkel $t = n/f = n \cdot 0{,}25$ ns.





Magnetväli paralleelsete plaatide vahel

- Vaadeldava TE-moodi korral on magnetväljal kaks komponenti:

$$H_{xs} = -\frac{\beta_m}{\omega\mu} E_0 \sin(\kappa_m x)\, \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\beta_m z}$$

ja

$$H_{zs} = \mathrm{j}\frac{\kappa_m}{\omega\mu} E_0 \cos(\kappa_m x)\, \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\beta_m z}.$$

- Koos moodustavad need kaks komponenti kinnised ahelad *xz* tasandil.

Lainejuht atenuaatorina

- Kui signaali sagedus on madalam lainejuhi lõikesagedusest siis muutub levikonstant β_{m} imaginaarseks mis on ekvivalentne - j$|\beta_{\mathrm{m}}|$ = - jα_m. Elektrivälja tugevus on sellisel juhul:

$$E_{ys} = 2\mathrm{j}E_0 \sin(\kappa_m x)\, \mathrm{e}^{-\alpha_m z}$$

- Sellele vastav hetkväärtus

$$E_y(z,t) = -2E_0 \sin(\kappa_m x)\, \mathrm{e}^{-\alpha_m z} \sin(\omega t)\,.$$

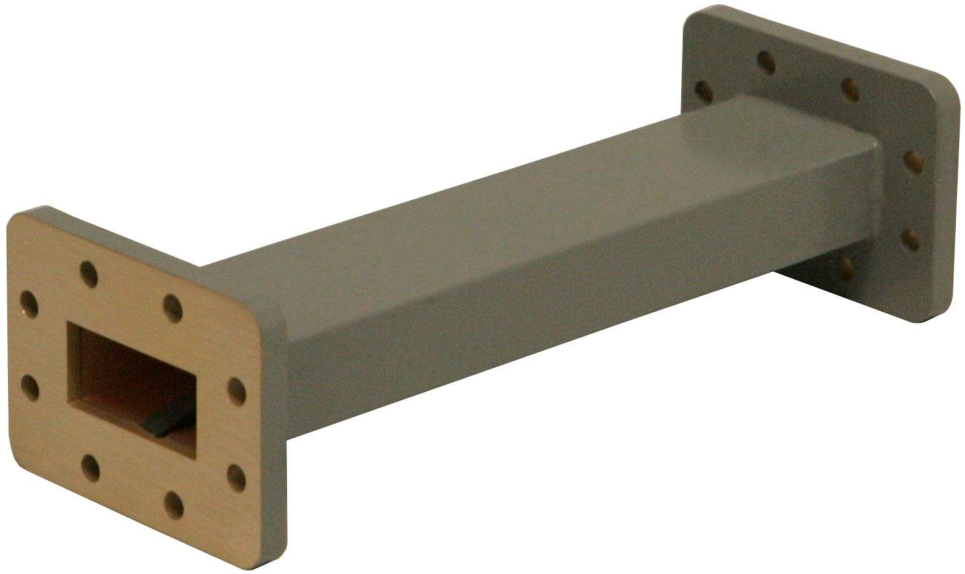
- Sumbetegur ($f < f_{cm}$) [Np/m]:

$$\alpha_m = \frac{2\pi n f_{cm}}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_{cm}}\right)^2}\,.$$

Sumbumus lõikesagedusest madalamal

- Sumbumus nelinurkses lainejuhis, allpool lõikesagedust, TE_{10} moodis on

$$\alpha_1 = \frac{54{,}6}{\lambda_{c1}} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_{c1}}\right)^2} \quad \left[\frac{\mathrm{dB}}{\mathrm{m}}\right]$$



Joonis: https://uniquesys.com/product/waveguide-attenuator-20db-wr90-x-band/

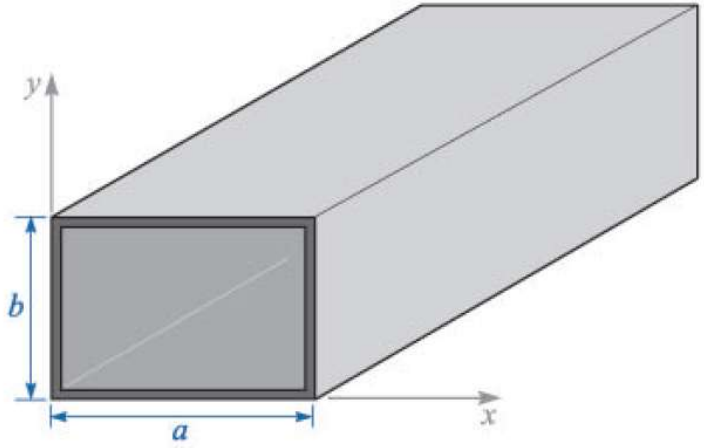
Nelinurkne lainejuht



- Suur ribalaius mille ulatuses domineeriv TE_{10} mood stabiilselt levib.
- Lihtne valmistada.
- Talub suuri edastusvõimsuseid.
- Teravate nurkade tõttu optimaalsest suuremad kaod.
- Jäiga ehituse tõttu on takistustest ümber suunamine keerukam.

Nelinurkne lainejuht

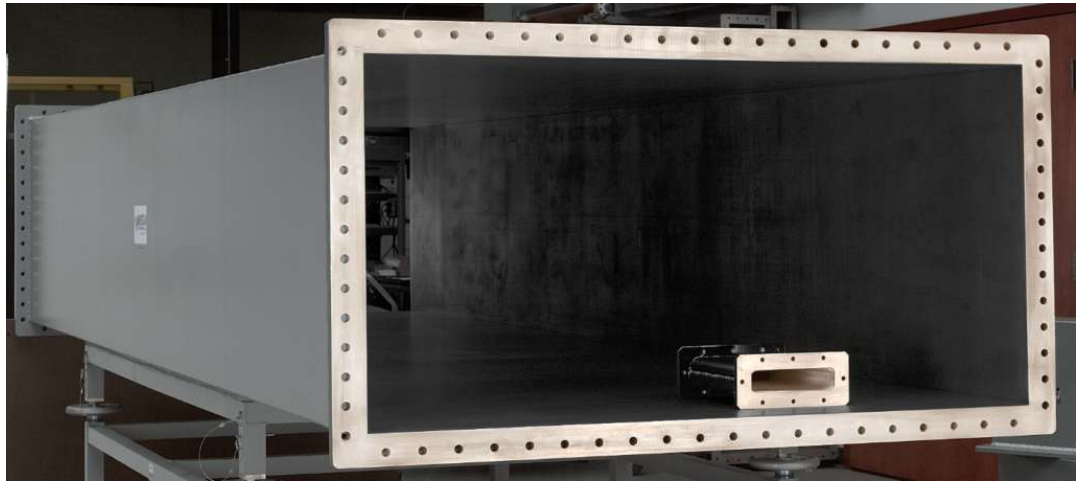
- Ristküliku kujuline ristlõige, külgede pikkused *a* ja *b*.
- Tavaliselt on külgede pikkuste suhe *a*:*b* = 2:1.
- Lainejuhi lõikesagedus: $f_c = \frac{c \cdot VF}{2a}$
- Töösageduste vahemik 1,3·f_{c10} kuni 0,95·f_{c21}
- Näide: nelinurkne lainejuht WR2300:
  - Mõõtmed: 584,20 x 292,10 mm (23 x 11,5“)
  - Madalaima moodi lõikesagedus: 257 MHz
  - Järgmise moodi lõikesagedus: 513 MHz
  - Soovituslik töösageduste vahemik: 320 - 450 MHz



Joonis: W.H. Hayt, J.A. Buck. Engineering Electromagnetics, 6th edition.

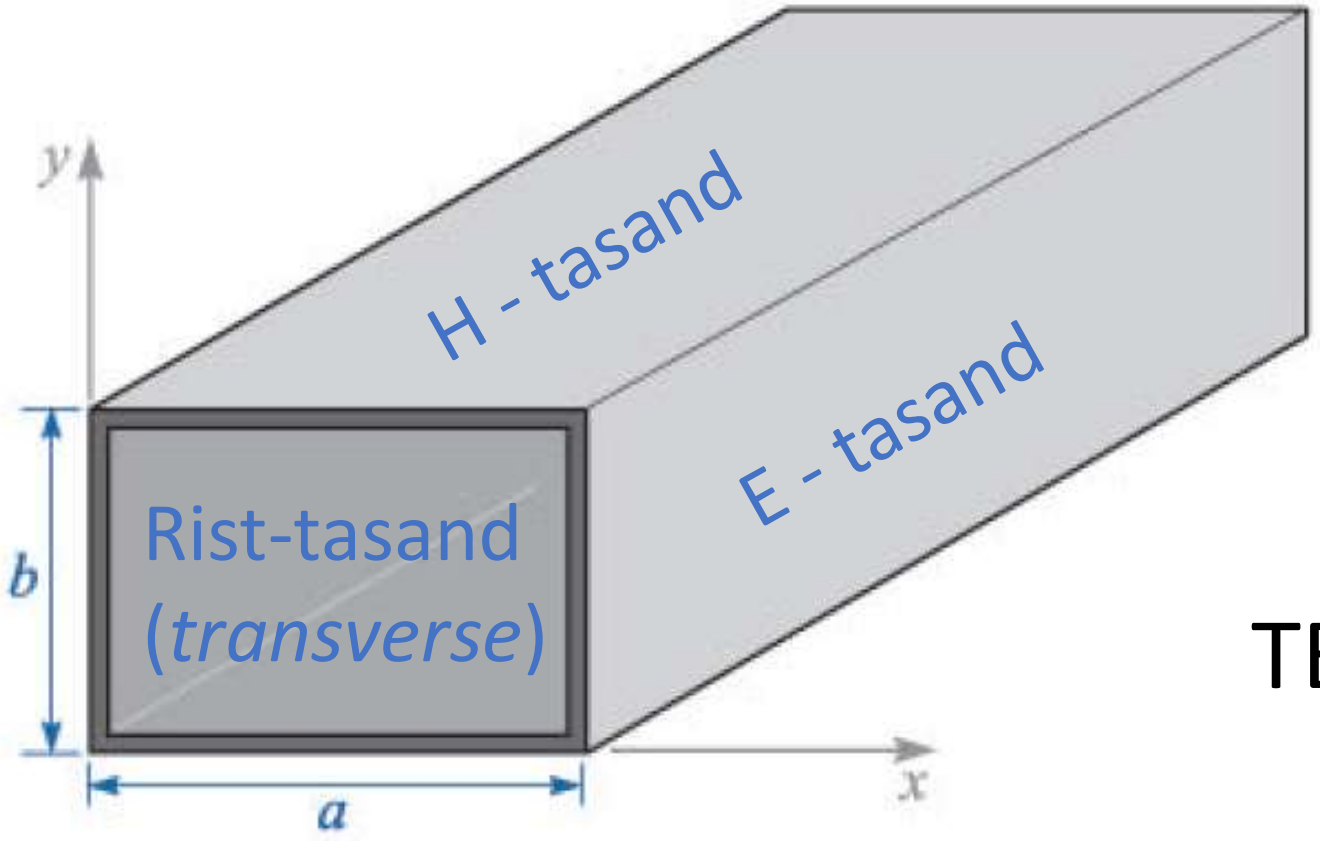
WR2300 lainejuht





Fotod: https://screenrant.com/die-hard-reasons-john-mcclane-great-guy-worst/,
https://www.megaind.com/products/waveguide-sizes/wr2300-waveguide/

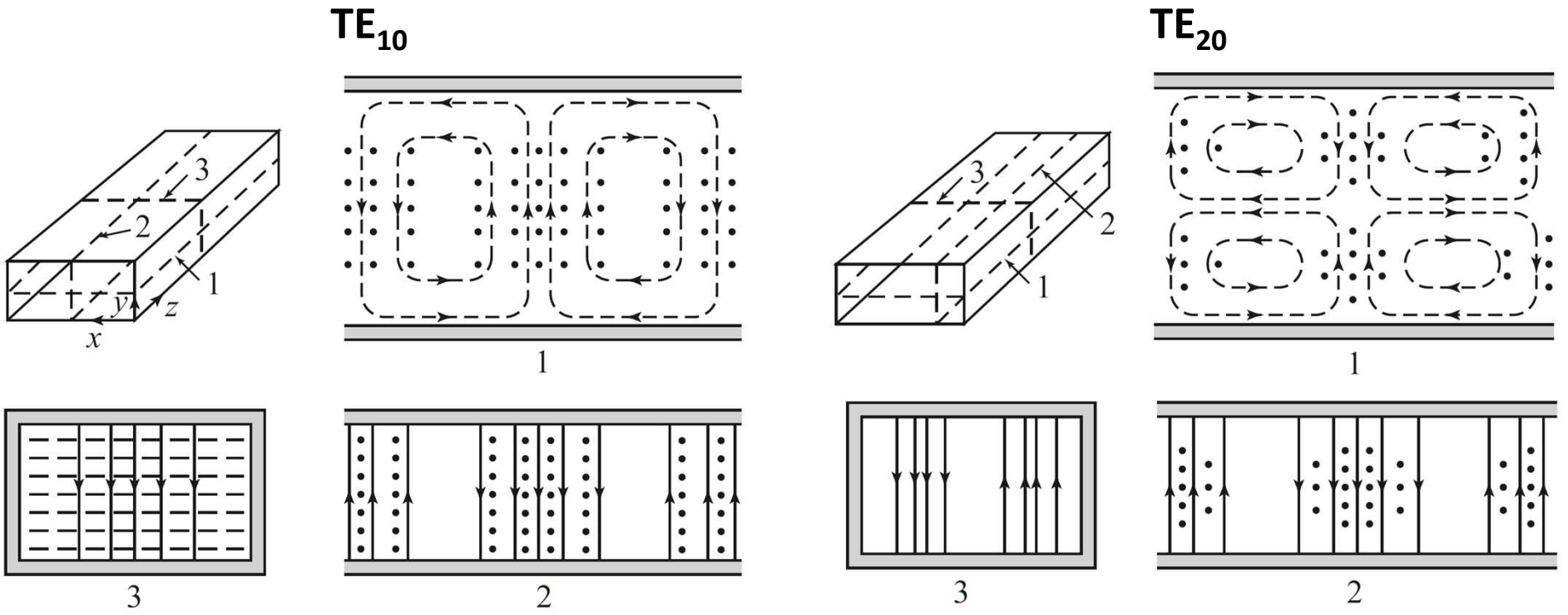
Tasandid lainejuhis



TE_{10} moodis

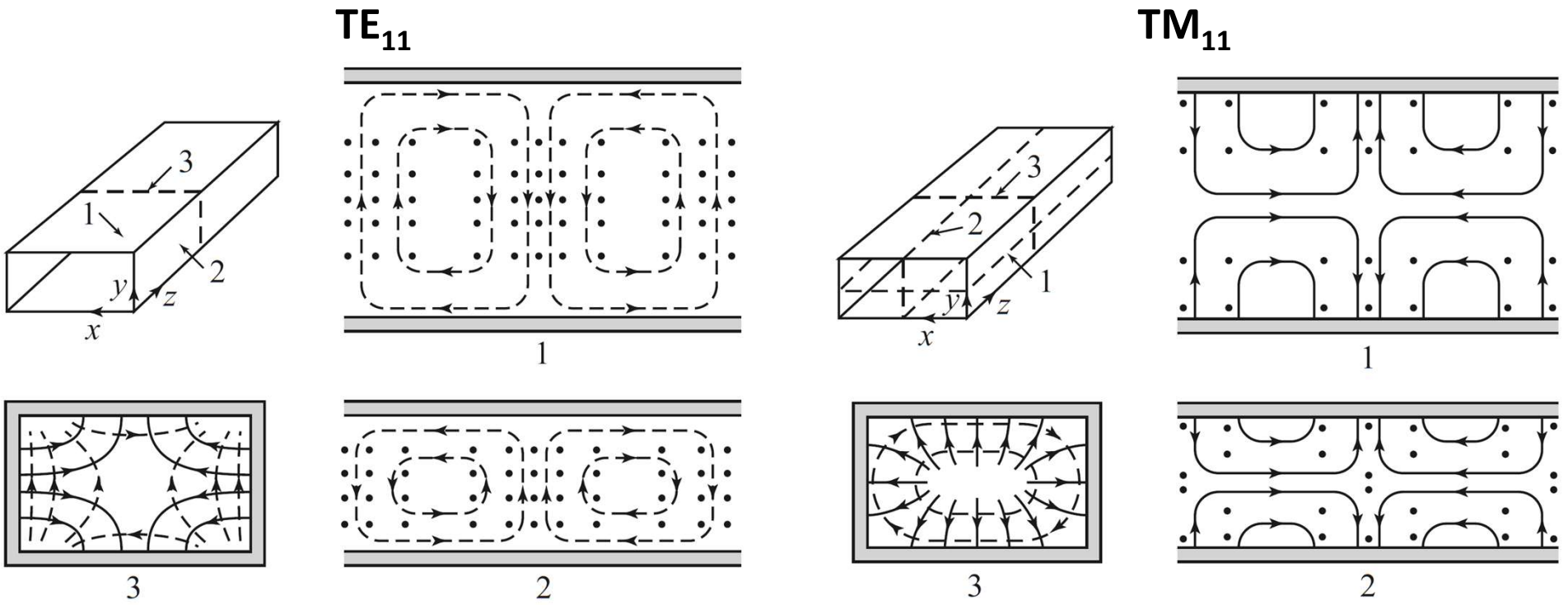
Joonis: W.H. Hayt, J.A. Buck. Engineering Electromagnetics, 6th edition.

Moodid nelinurkses lainejuhis



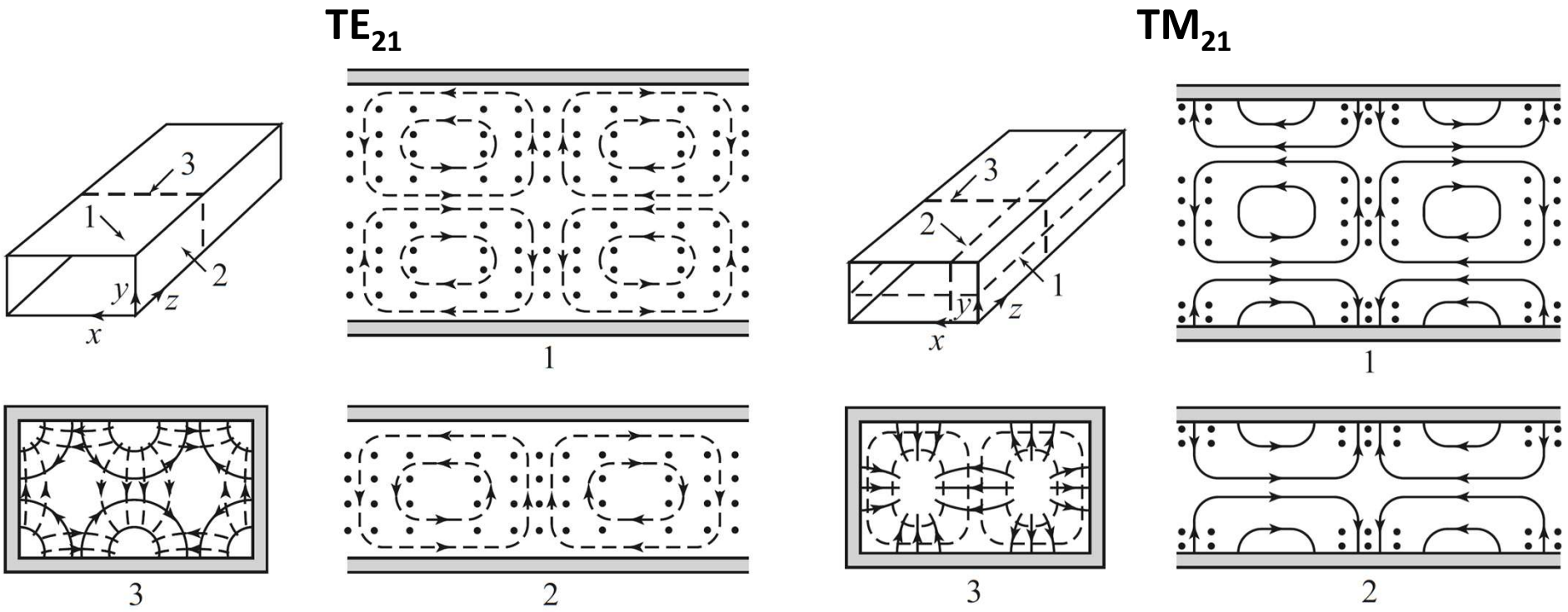
Joonis: S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. Van Duzer, Fields and Waves in Communication Electronics.

Moodid nelinurkses lainejuhis



Joonis: S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. Van Duzer, Fields and Waves in Communication Electronics.

Moodid nelinurkses lainejuhis



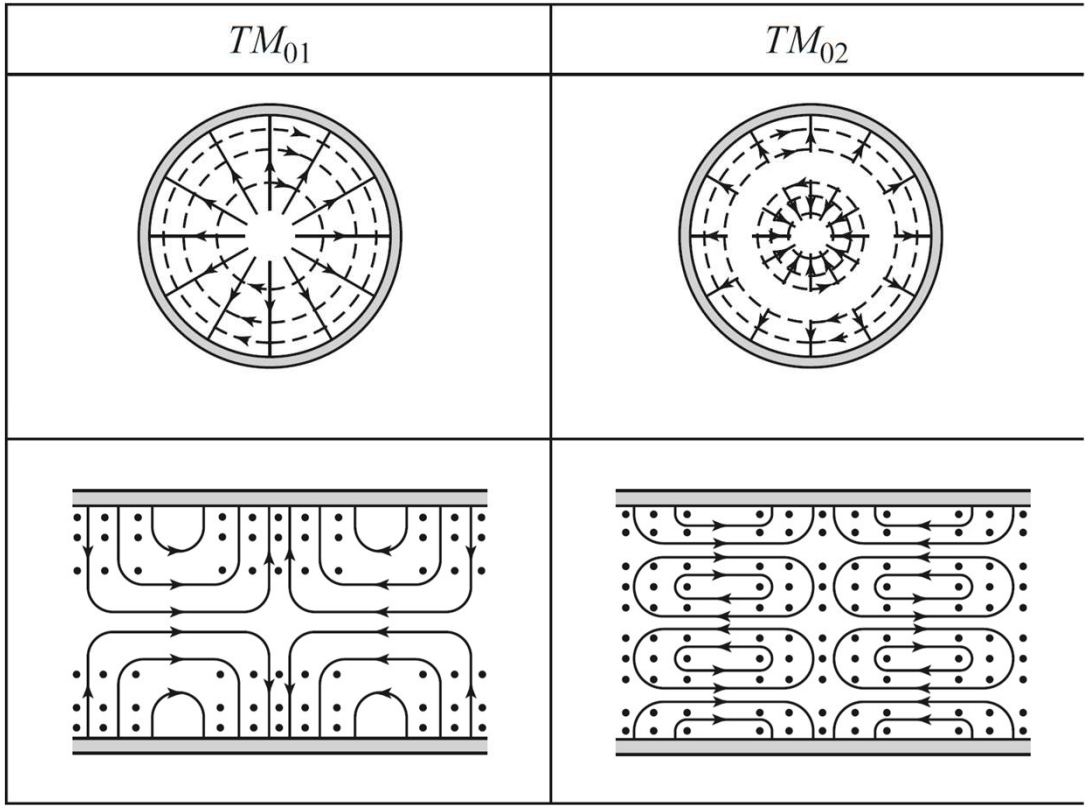
Joonis: S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. Van Duzer, Fields and Waves in Communication Electronics.

Ümmargune lainejuht

- Väiksemad kaod kui nelinurksel lainejuhul – puuduvad teravad nurgad.
- Võimaldab suurema võimsuse ülekannet kui nelinurkne lainejuht.
- Sobilik ringpolariseeritud lainete ülekandeks.
- Sobilik kasutamiseks pöörlevate antennide ühendamiseks.
- Keerukam ja kallim toota.
- Raskem säilitada soovitud moode/vältida soovimatuid.

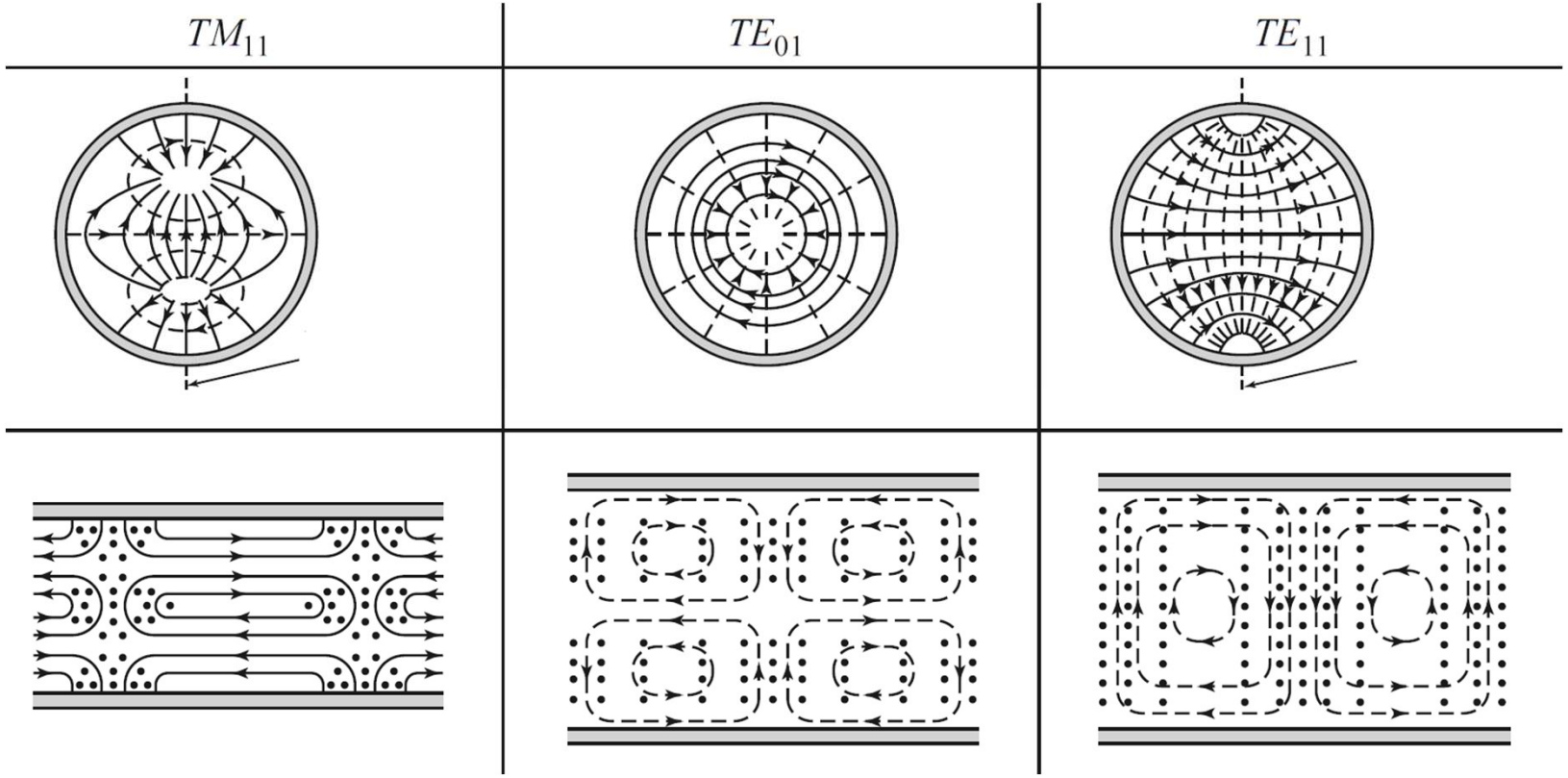


Moodid ümmarguses lainejuhis



Joonis: S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. Van Duzer, Fields and Waves in Communication Electronics.

Moodid ümmarguses lainejuhis



Joonis: S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. Van Duzer, Fields and Waves in Communication Electronics.

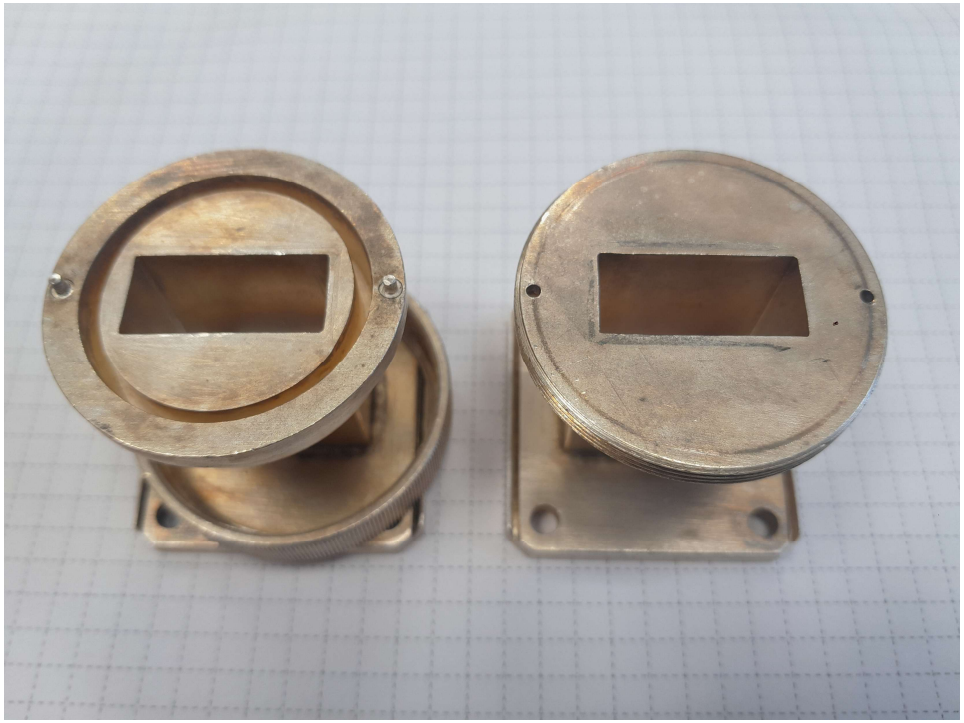
Elliptilised lainejuhid



- Ovaalse ristlõikega.
- Valmistatakse lainelise seinaga mis võimaldab lainejuhti ümber takistuste painutada ilma selle sisemist geomeetriat kahjustamata.
- Paigaldamisel ei tohi ületada lubatud painderaadiust.
- Valmistatakse ilmastikukindlana välitingimustes kasutamiseks.
- Säilitab edastatava laine polarisatsiooni.
- Kallim ja keerukam valmistada.

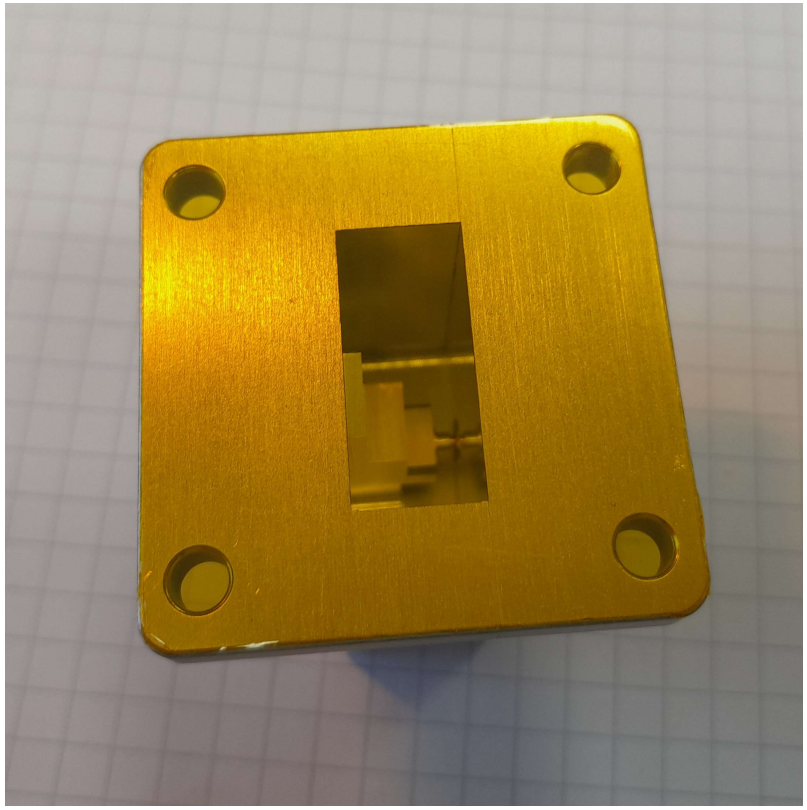
Lainejuhtide omavaheline ühendamine

- Enamasti ei ole praktiline valmistada kogu lainejuhtidel põhinevat RS süsteemi ühes tükis.
- Sellega seoses tekib vajadus lainejuhtide omavaheliseks ühendamiseks.
- Selleks kasutatakse lainejuhist eenduvaid **ääriseid** (*flange*).
- Levinuimad äärise kujud on nelinurkne ja ümmargune.



Lainejuhtide äärised

- Kõige lihtsam ja tavapärasem on sileda pinnaga ääris (*plain flange*).
- Kõige lihtsam ja odavam. Kasutatakse kas paaris teise samasugusega või koos soonega äärisega (*grooved flange*).
- Sobivad nõrkade signaalide ülekandeks.
- Kui ühendus ei ole korralik, siis tekivad ühenduskohtades peegeldused ja suurematel võimsustel sädelemine.



Soonega ääris

- Korrosiooni ja kadude vähendamiseks ning elektrilise läbilöögi vältimiseks täidetakse lainejuhid mõnikord gaasiga. Näiteks lämmastiku või väävelheksafluoriidiga SF_6.
- Sellisel juhul peavad lainejuhtide vahelised ühendused olema **hermeetilised**.
- Tihendi jaoks lõigatakse äärise sisse, ümmargune või nelinurkne, soon.



Foto: https://dolphmicrowave.com/product/waveguide-flange-shim/

Drosselääris

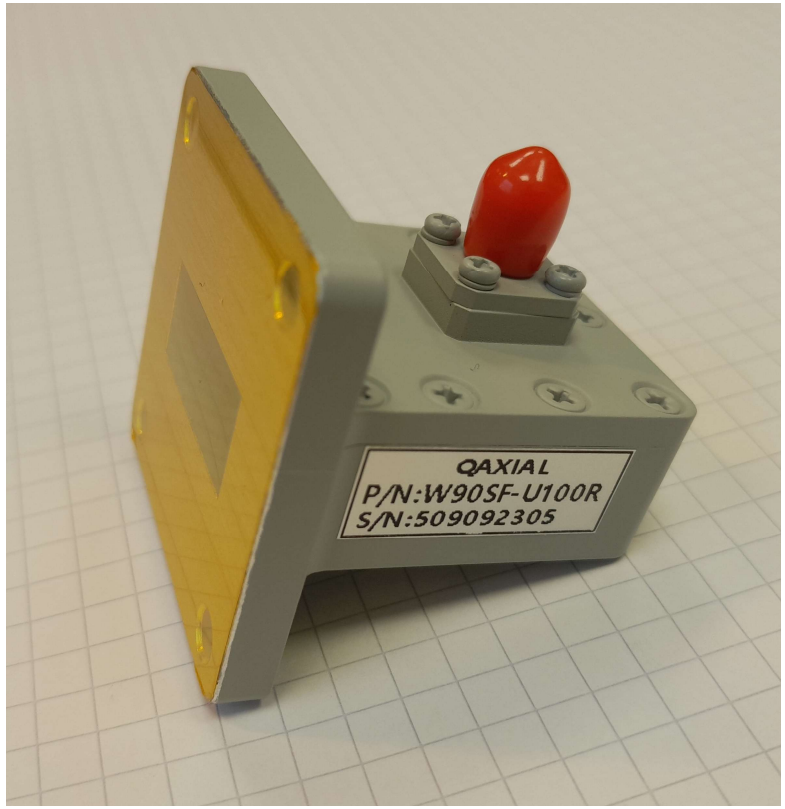
- Tihend muudab lainejuhid hermeetilised kuid ei paranda nendevahelist elektrilist ühendust.
- Probleemi põhjustab ääriste vahele jääma kippuv õhupilu.
- **Drosselääris** (*choke flange*) on mõeldud just selle probleemi lahendamiseks. Kogupikkusega 2 x $\lambda/4$ õhupilu tekitatakse meelega.



Foto: https://newerasystems.net/

Signaali sisestamine lainejuhti

- Energia sisestamiseks lainejuhti ja selle sealt väljastamiseks on kolm põhilist viisi.
- Sond - monopolantenn lainejuhi sees.
- Aas – raamantenn lainejuhi sees.
- Apertuur – ava lainejuhi sees või otsas.



Painduvad lainejuhid





Lainejuhi suuna muutmine

E-tasandi pööre

(*E-Plane Bend*)



H-tasandi pööre

(*H-Plane Bend*)





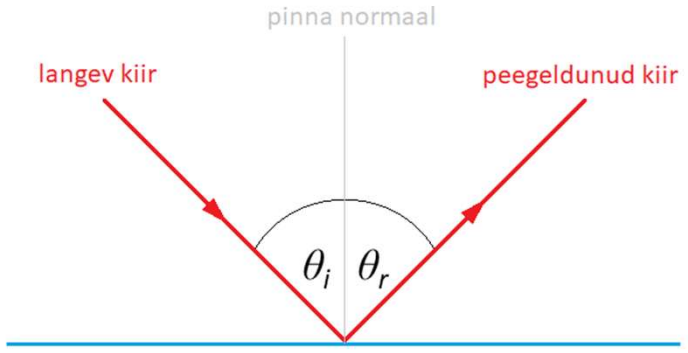
Dielekriline lainejuht – fiiberoptiline kaabel

Peegeldumisseadused

- Langeva ja peegeldunud laine levimissuunad asuvad lahutuspinna normaaliga samal tasandil.
- Seda tasandit nimetatakse ka **langemistasandiks** (*plane of incidence*).
- Peegeldumisnurk θ_r on võrde langemisnurgaga θ_i

$$\theta_r = \theta_i.$$

- Fermat' (vähima aja) printsiip.



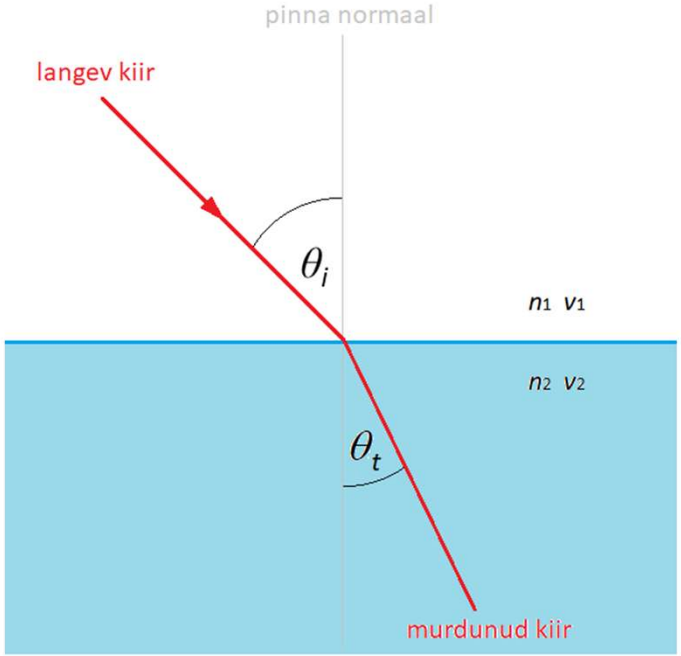


Snelli seadus

- Laine üleminekul ühest keskkonnast teise toimub **murdumine**, ehk leviteekonna suuna muutus.
- Murdumist kirjeldab **Snelli seadus**

$$\frac{\sin\theta_t}{\sin\theta_i} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2}.$$

- Kus θ_i ja θ_t on vastavalt langemis- ja murdumisnurgad ning v_1, v_2, n_1 ja n_2 on vastavalt lainete faasikiirused ja levikeskkondade murdumisnäitajad.



Täielik sisepeegeldus

- Kui laine levib suurema murdumisnäitajaga n_2 materjalist keskkonda mille murdumisnäitaja n_1 on madalam ($n_2 > n_1$), siis on murdumisurk suurem langemisnurgast: $\theta_t > \theta_i$.
- Langemisnurka, mille juures on murdumisnurk võrdne π/2 radiaaniga (90°), nimetatakse **kriitiliseks nurgaks**

$$\theta_{cr} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right).$$

- Kui langemisnurk on kriitilisest suurem, siis peegeldub kogu langev laine tagasi suurema murdumisnäitajaga keskkonda. Seda nähtust tuntakse **täieliku sisepeegelduse** nime all (*total internal reflection*).

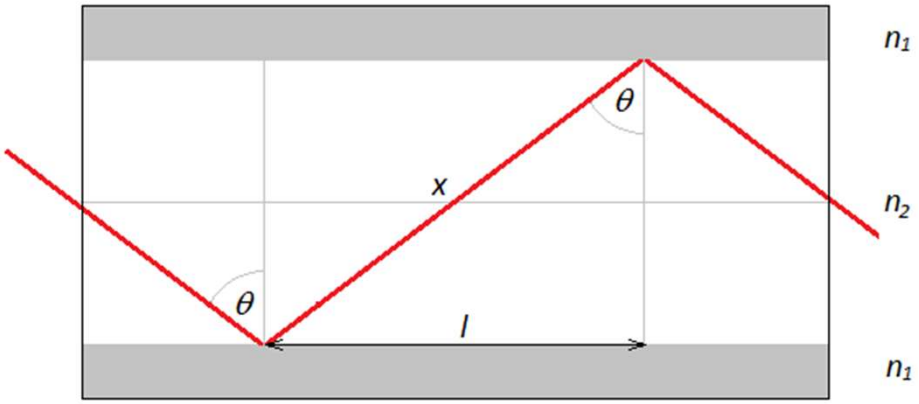


Täielik sisepeegeldus

- Nurgad mis jäävad vahemikku $\pm\theta_{cr}$ moodustavad optilise kaabli jaoks koonusekujulise ala (*acceptance cone*) millest saabuvad signaalid levivad kaablis edasi väga väikeste kadudega.
- Fiiberoptilise kaabli numbriline apertuur (*numerical aperture*):

$$NA = n \cdot \sin\theta_{cr} = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}.$$

Fiiberoptilise kaabli tööpõhimõte



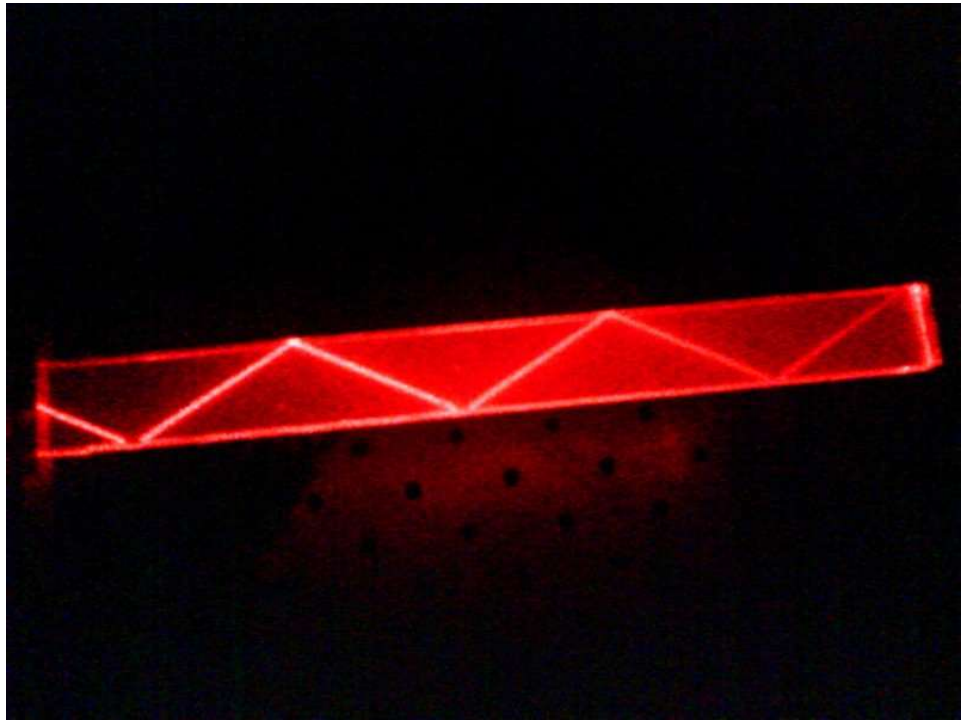
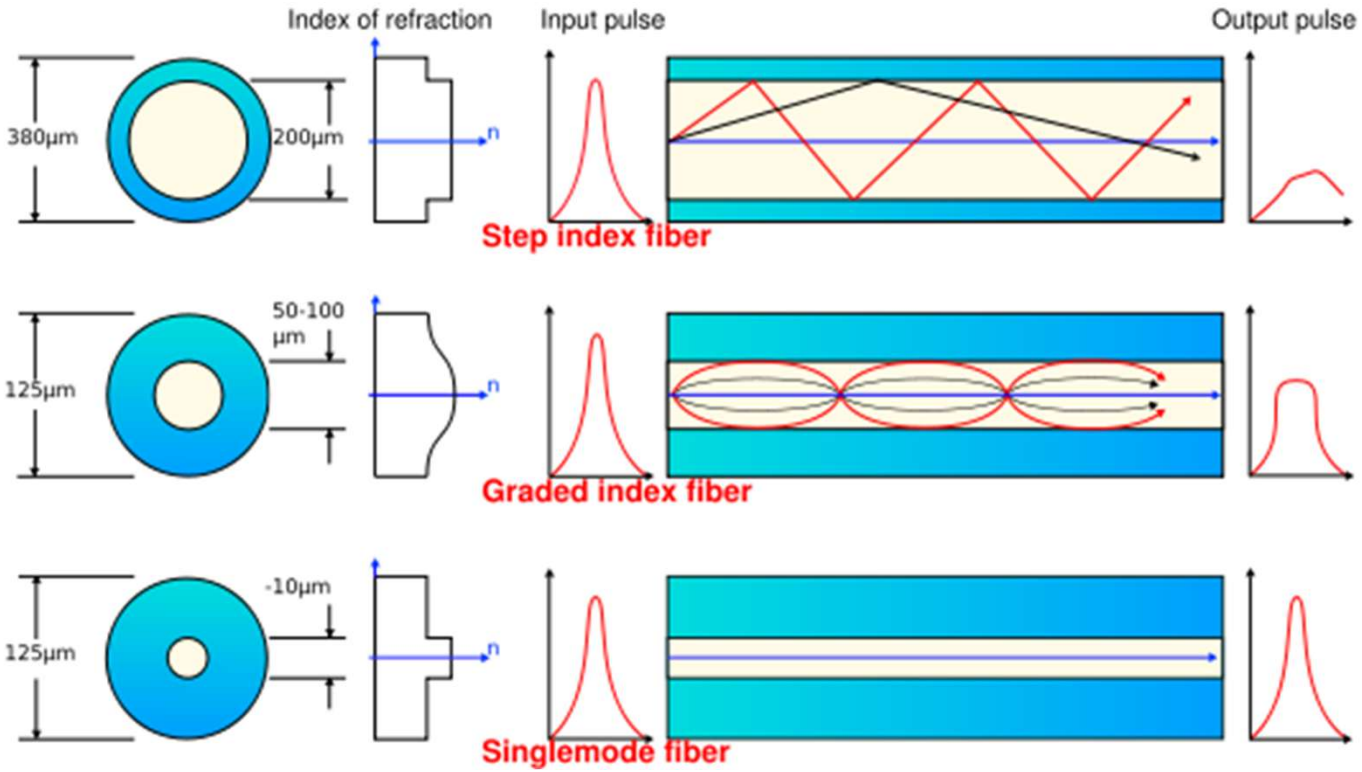


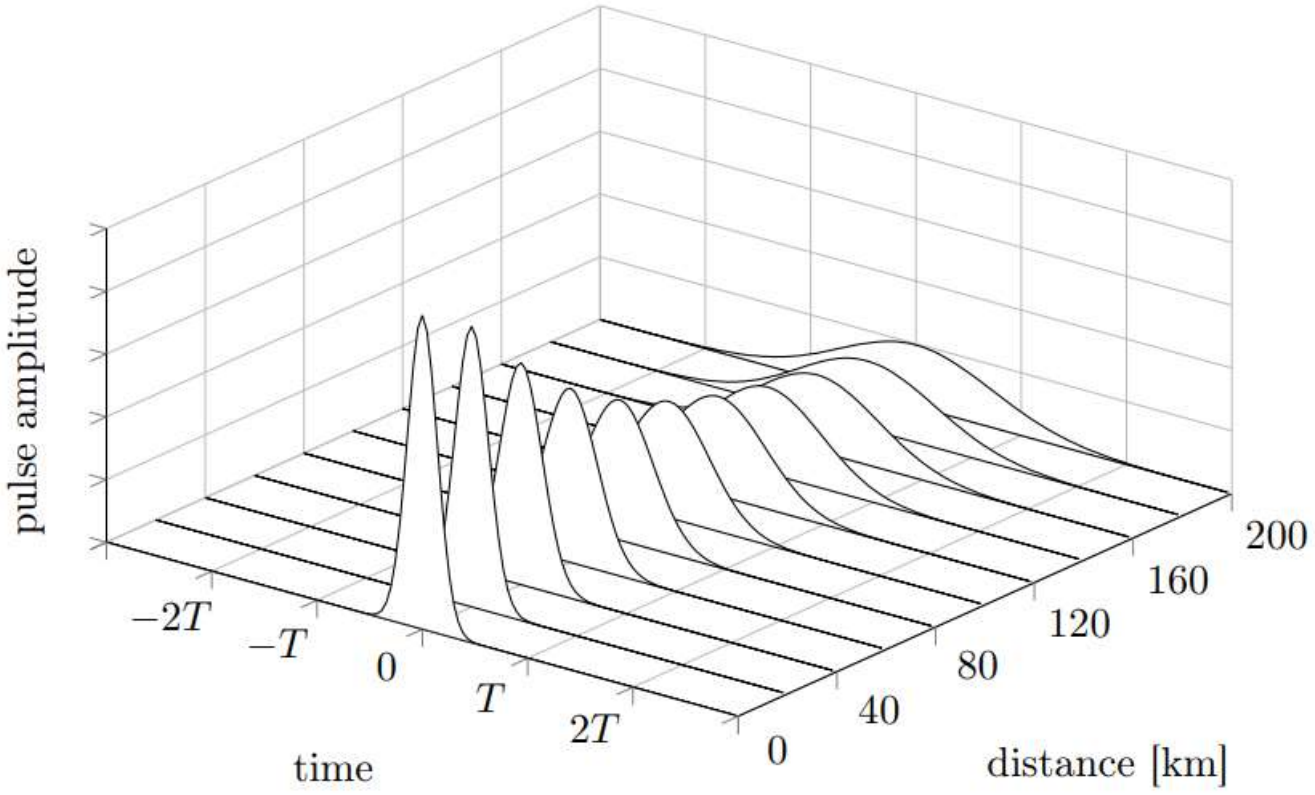
Foto: https://nigerianscholars.com/tutorials/optics-and-optical-phenomena/critical-angles-and-total-internal-reflection/

Fiiberoptilise kaabli liigid



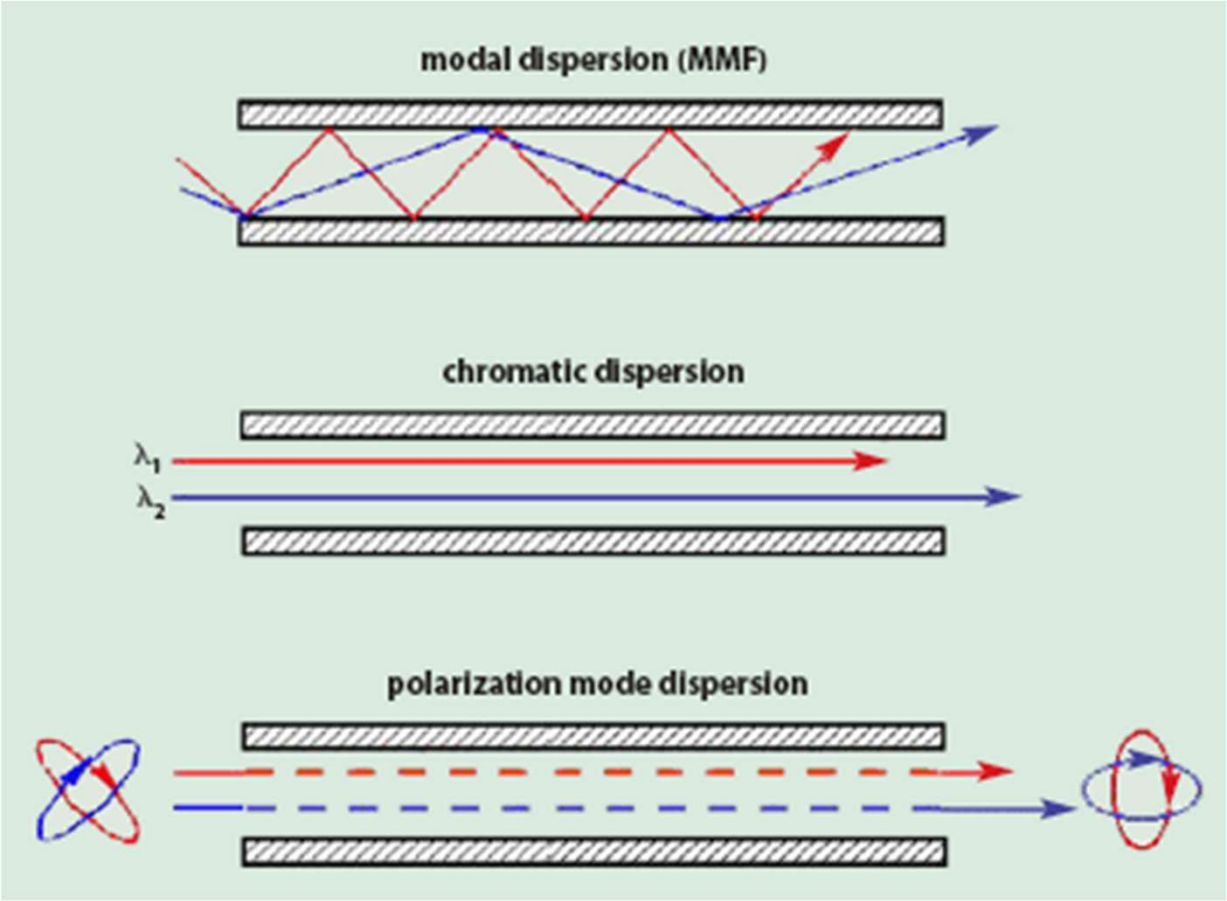
Joonised: http://www.wikipedia.org/

Dispersioon fiiberoptilises kaablis



Joonis: Cristian B. Czegledi .**Modeling and Tracking of Stochastic Polarization Drifts in Fiber-Optic Systems.**
http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/231662/231662.pdf

Dispersioon fiiberoptilises kaablis



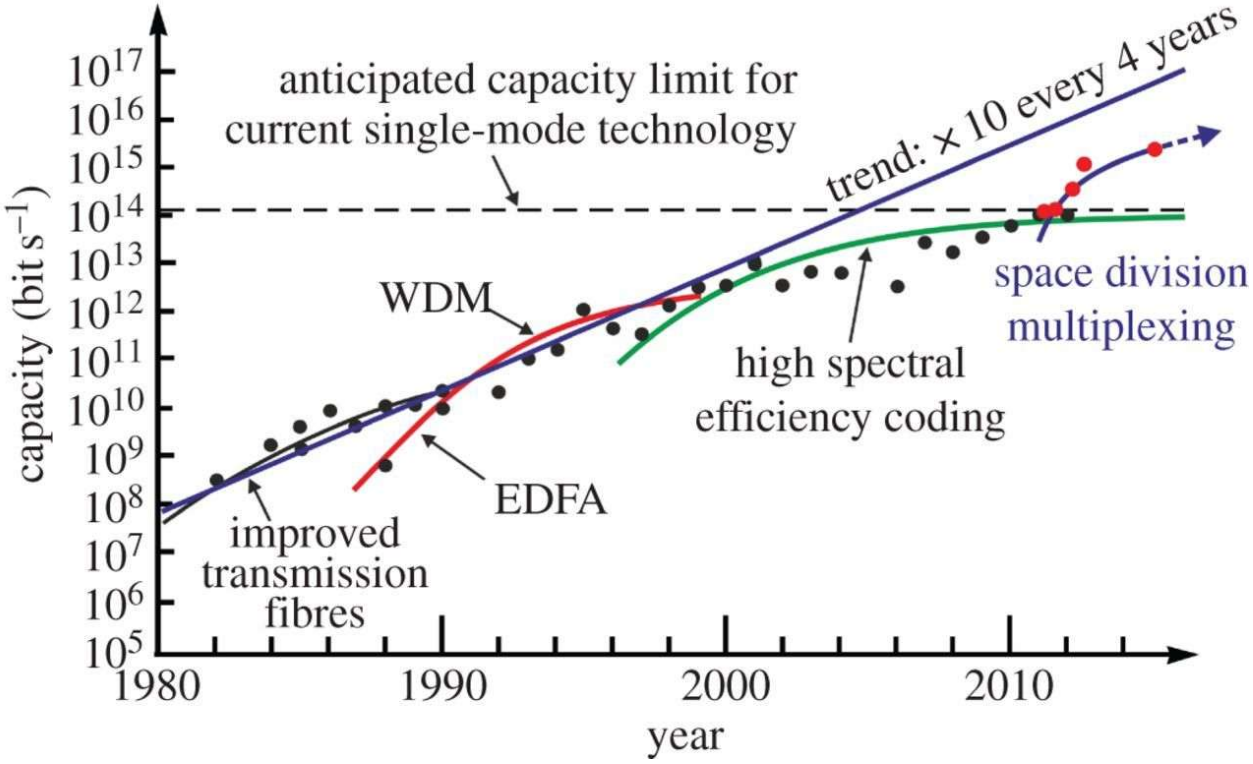
- Modaalne dispersioon
  - Mitu erineva pikkusega leviteed.
- Kromaatiline dispersioon
  - Levikiiruse sagedussõltuvus-
- Polarisatsioonidispersioon
  - Levikiiruse sõltuvus valguse polarisatsioonist.

Joonis: http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=25153

Edastuskiirused

- Dispersiooninähtus seab piirid optilise fiibri pikkusele. Viimaseid iseloomustatakse tihtipeale ribalaiuse ja pikkuse korrutisega (*bandwidth-distance product, bit-rate distance*) $B \cdot L$ mille ühikuks on [MHz·km].
- NEC korporatsioon 2011 aastal: **101,7 Tbitt/s**.
  - 370 kanalit, igaüks 273 Gbitt/s 165 km kaugusele.
- Ühe kanali kiirus **1 Tbitt/s** (2016, Bell labs, Deutche Telecom, Münheni tehnikaülikool)
- 2009 Alcatel-Lucent 15,5 Tbitt/s **7000 km** kaugusele.

Fiiberoptilise kanali läbilaskevõime

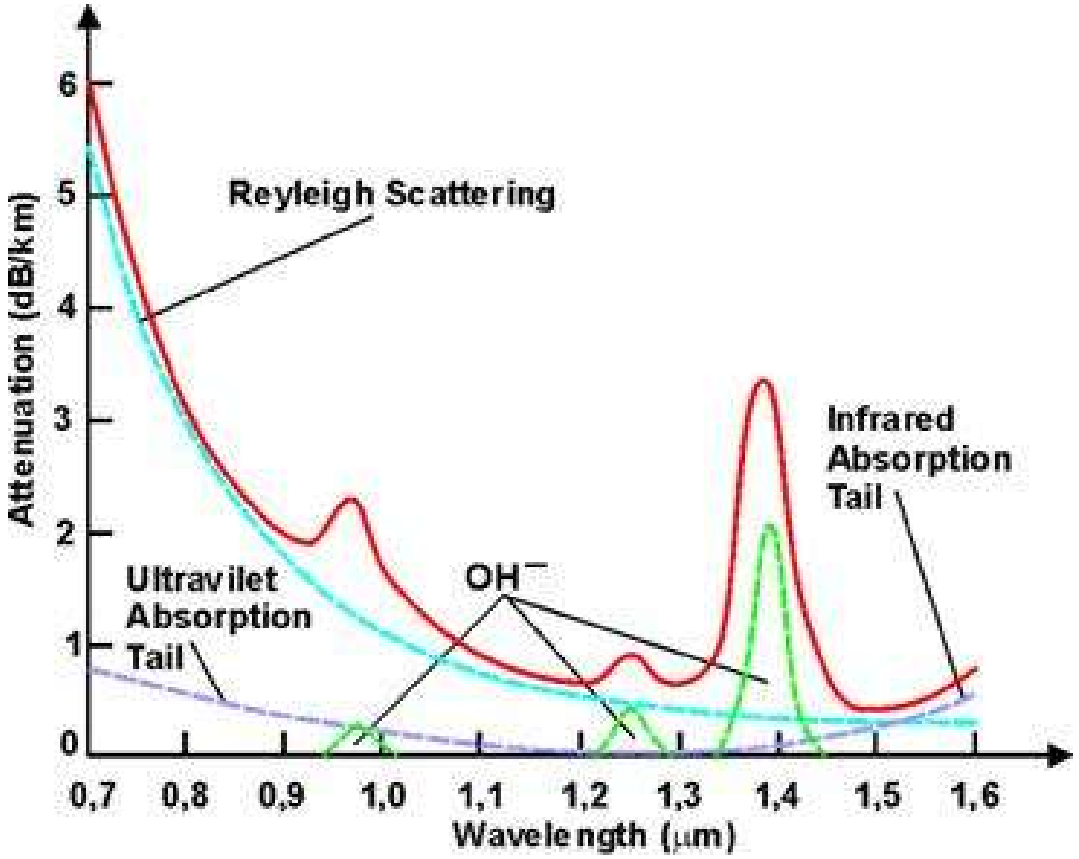


Joonis: D.J. Richardson. **New optical fibres for high-capacity optical communications.** https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0441

Kategooriad

- Lühidistantsi fiiberoptiline side (*short-haul*):
  - Kaugustele kuni mõni kilomeeter;
  - Kasutab multimodaalset fiibrit MMF;
  - Kasutab 850 nm lainepikkusega signaali.
- Pika distantsi fiiberoptiline side (*long-haul*):
  - Vahemaadele kuni kümned tuhanded kilomeetrid;
  - Kasutab standardset monomodaalset fiibrit SSMF;
  - Opereerib 1550 nm lainepikkusel (vanemad süsteemid 1310 nm).
- Optiline side vabas ruumis FSO (*Free-Space Optical*) :
  - Li-Fi.

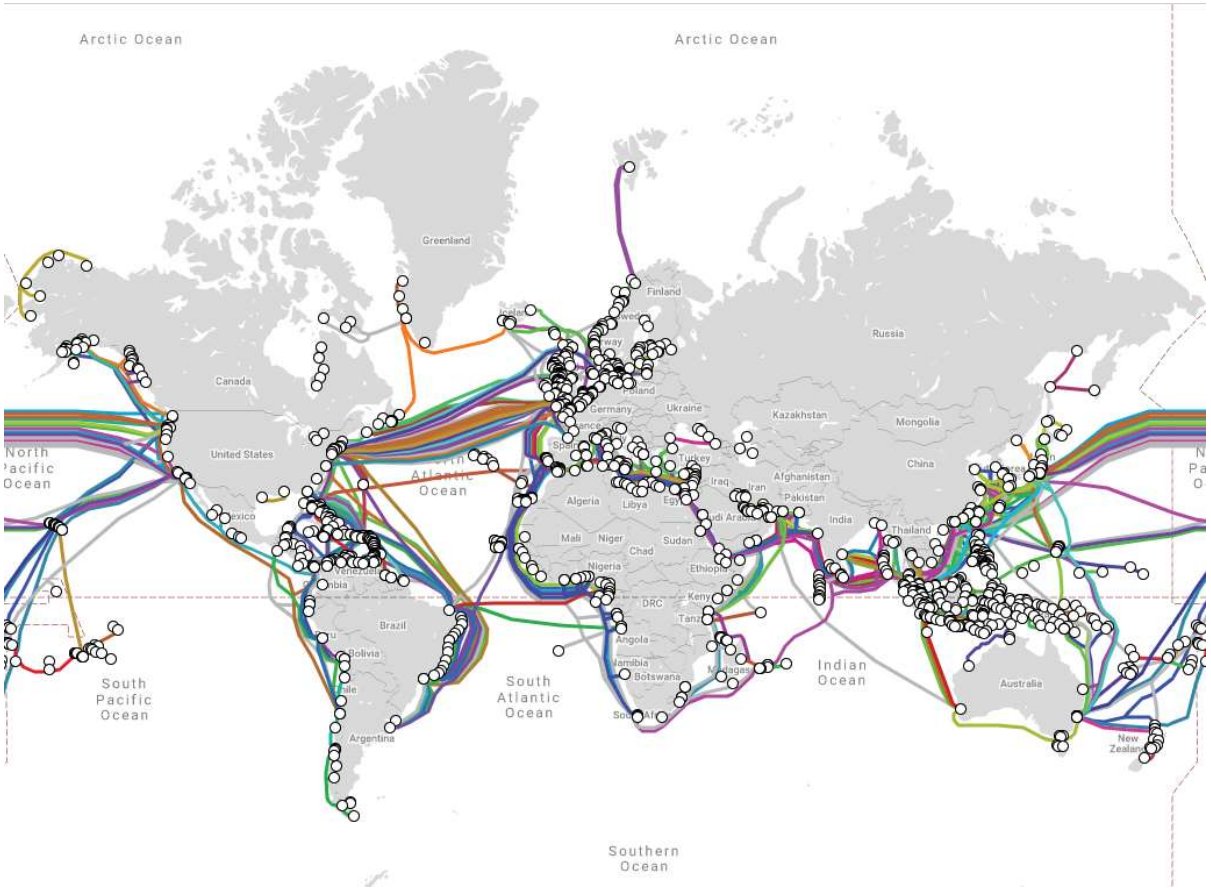
Kaod optilistes kaablites



- Sumbumus optilises fiibris:
  $$P(x) = P_0 e^{-\alpha} .$$
- Tüüpiline sumbumus SSMF fiibris on 0,2 dB/km.
- Rayleigh hajumine on pöördvõrdeline lainepikkuse neljanda astmega: $\alpha \sim \lambda^{-4}$.

Joonis: http://www.invocom.et.put.poznan.pl/~invocom/C/P1-9/swiatlowody_en/p1-1_2_2.htm

Fiiberoptilised lingid



Joonis: https://www.submarinecablemap.com/

Materjalid

[1] William H. Hayt, Jr. John A. Buck. **Engineering Electromagnetics**. 6th ed.

- Peatükid. 12.6 *Wave Propagation in Dispersive Media* ja 14.1-14.5 *Waveguide and antenna Fundamentals*.

[2] D. M. Pozar, **Microwave Engineering, Fourth Edition,** John Wiley & Sons, Inc, 2012.

- Kolmanda peatüki *Transmission Lines and Waveguides* esimesed neli alapeatükki.

[3] Electronics notes. Waveguide modes: TE. TM, TEM.. https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/rf-feeders-transmission-lines/waveguide-modes-te-tm-tem.php, 02.20.26

[4] Microwaves101. **Dispersion**. https://www.microwaves101.com/encyclopedias/dispersion, 02.20.26

[5] Photonics. **Fiber Optics: Understanding the Basics.** https://www.photonics.com/Articles/Fiber_Optics_Understanding_the_Basics/a25151, 02.20.26

[6] Microwavew101. **Waveguide Primer**. Microwaves101 | Waveguide Primer, 06.10.26