

Elektroakustiset mittaukset

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2026
LuK Vivi Iisakka
Tarkastaja:
Dos. M.Murtomaa

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO
Fysiikan ja tähtitieteen laitos

Iisakka, Vivi Elektroakustiset mittaukset

LuK-tutkielma, 10 s., 3 liites.
Fysiikka
Toukokuu 2026

Elektroakustiikka on yksi akustiikan osa-alueista, joissa sähkökenttä kytketään yhteen akustisen kentän kanssa. Elektroakustiikassa on mahdollista muodostaa aineessa sähkökenttää akustisten aaltojen seurauksena, mutta myös akustisia aaltoja kohdistamalla aineeseen vaihtelevaa sähkökenttää. Elektroakustiikalla voidaan tutkia aineiden akustisia ominaisuuksia, kuten äänennopeutta väliaineessa sekä vaimentumista, että sähköisiä ominaisuuksia, kuten zeta-potentiaali ja tilavaraus. UVP eli ultraääni värähtelypotentiaali on sitä, kun elektrolyyttiin kohdistettu pitkittäinen ääniaalto saa varautuneet hiukkaset liikkumaan ja näiden hiukkasten välille muodostuu sähkökenttää. ESA eli elektrokineettinen ääniamplitudi on taas vastakkainen reaktio UVP:lle, missä elektrolyyttiin kohdistettu vaihteleva sähkökenttä liikuttaa varautuneita hiukkasia ja näiden liikkeestä muodostuu akustista painetta.

Tässä tutkielmassa käsittelemme tarkemmin UVP:n ja ESA:n muodostumista, sekä erilaisia tapoja mihin elektroakustiikkaa hyödynnetään sekä miten. Esimerkiksi PEA-menetelmällä mitataan dielektrien tilavarausta, ja acoustosizer-laitteella voidaan tutkia nesteen tai dispersion erilaisia ominaisuuksia. Elektroakustiikalla voidaan myös selvittää kolloidin zeta-potentiaalia.

Asiasanat: elektroakustiikka, UVP, ESA, PEA, acoustosizer, zeta-potentiaali

Sisällys

Johdanto	1
1 Elektroakustiikan perusteet	1
1.1 UVP	1
1.2 ESA	3
2 PEA-menetelmä	3
2.1 Tilavaraus kiinteässä aineessa	4
3 Sovelluksia	5
3.1 zeta-potentiaali mittaukset	6
3.2 Acoustosizer	6
4 Yhteenveto	8
Viitteet	10

Johdanto

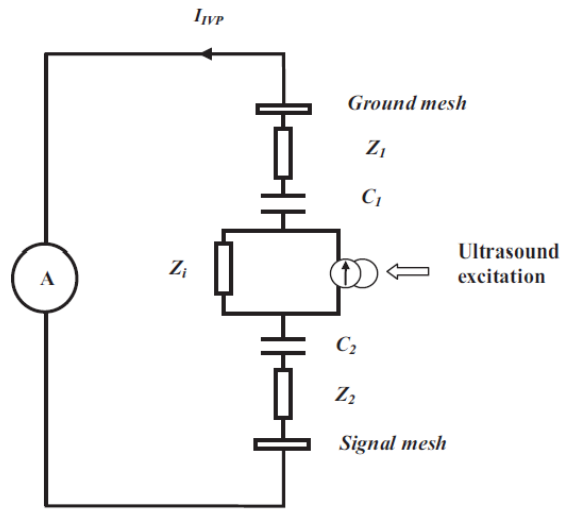
Kun materiaaliin kohdistetaan akustinen kenttä, materiaalin atomit ja ionit liikkuvat paineaallon mukana. Ionien siirtymät saattavat erota toisistaan niiden massan ja kitkakertoimen mukaan. Jos vastakkaismerkkiset ionit ovat eri vaiheessa paineaaltoa, niiden välille muodostuu sähkökenttä. Vastaavasti kun materiaaliin tuodaan vaihteleva sähkökenttä, ionit siirtyvät ja saavat aikaan pitkittäisen ääniaallon eli akustisen vasteen. Esimerkiksi, kun elektrolyyttiin kohdistettaessa pitkittäisiä ääniaaltoja, liuokseen syntyy sähkökenttä, jota voi mitata.

1 Elektroakustiikan perusteet

Elektroakustiikka on akustiikan osa-alue, jossa sähkökenttä ja akustinen kenttä ovat kytkettynä toisiinsa. Elektroakustiikalla on mahdollista selvittää dispersioiden, eli kahden toisiinsa liukenemattoman aineen seos, jossa aineet ovat jakautuneet taiseesti toisiinsa, sähköisiä ja akustisia ominaisuuksia. Elektroakustiikka toimii sekä sähkökentästä akustiseksi kentäksi (ESA) ja akustisesta kentästä sähkökentäksi (UVP).

1.1 UVP

Ultraääni värähtelypotentiaali (engl. ultrasonic Vibration Potential, UVP) syntyy, kun elektrolyyttiin kohdistettaessa pitkittäinen ääniaalto muodostuu liuokseen sähkökenttä. Kun dynaamiset reaktiot huomioidaan elektrolyysissä, liuos ei käyttäydy homogeenisen liuoksen tavoin. Eri massaisilla ja varaukseltaan eri merkkisillä ioneilla on toisiinsa verraten poikkeavat amplitudit. Ääniaaltoa seuraa eri rytmisissä liikkuvien kationien ja anionien liikkeestä syntyvä jaksollisesti muuttuva varaustiheys. Kationien ja anionien liike-ero voi syntyä eri massojen lisäksi hiukkasten erilaisista kitkakertoimista. [1, 2]



Kuva 1. Piirikaavio IVP signaalin luonnista ja havaitsemisesta [3]

Amplitudipoikkeamista syntyvän vaihtelevan varaustiheyden seurauksena muodostuu ääniaallon jaksoja seuraava vaihtuva sähköinen potentiaali liuoksen pisteiden välille. Tätä potentiaaliero on mahdollista mitata ja sen avulla päätellä ionien ominaisuuksia esimerkiksi niiden massoja ja laskea niistä liuoksen molekyylien määrää. Tälle menetelmälle on useita eri nimityksiä riippuen minkälaisessa väliaineessa ilmiö tapahtuu, mutta yleisesti sitä kutsutaan UVP:ksi. Ilmiön tapahtuessa homogeenisessä nesteessä on kyseessä ionien värähtelypotentiaali (engl. Ion Vibration Potential) eli IVP, ja kun ilmiö tapahtuu kolloidissa, emulsiossa tai heterogeenisessä nesteessä on kyseessä kolloidien värähtelypotentiaali (engl. Colloid Vibration Potential) eli CVP. [1, 2]

Kuvassa 1 on esimerkki laitteesta, jolla voi mitata IVP:tä. Piirissä kahden kalvon rajaamalla alueella on ionipitoista liuosta, johon tuodaan ultraääntä tasoaaltona. Ääniaalto synnyttää vaihtojännitteen ja piirissä kulkevan virran. Liuoksen sisäinen impedanssi Z_i , ja aluetta rajaavien kalvojen impedanssit Z_1 ja Z_2 rajoittavat piirissä kulkevaa virtaa I_{IVP} , jota mitataan virtamittarilla. [3]

1.2 ESA

Elektrokineettinen ääniamplitudi (engl. Electrokinetic Sonic Amplitude, ESA) on käänteinen reaktio CVP:stä. ESA:ssa elektrolyyttiin kohdistettava vaihteleva sähkökenttä synnyttää saman taajuisen ääniaallon, jonka akustista painetta on mahdollista mitata.[4] Kohdistettu vaihteleva sähkökenttä saa varautuneet hiukkaset värähtelemään edestakaisin samalla taajuudella, joka muodostaa pieniä akustisia dipoleita jokaista hiukkasta kohden olettaen, että hiukkasten ja väliaineen välillä on tiheysero. Kyseiset äänidipolit kumoavat toisiaan suspensiossa kaikkialla muualla paitsi elektrodien läheisyydessä, jossa akustiset dipolit muodostavat ääniaallon, joka voi tulla esiin suspensiosta ja kulkeutua muuntimelle. Muunnin voi sitten havaita ääniaallon amplitudin ja aallon vaihekulman, joka mittaa aikaeroa sähkökentän ja hiukkasten liikkeen välillä. Vaihekulma on nolla matalilla taajuuksilla ja kasvaa taajuuksien ja hiukkaskoon kasvaessa. [5]

2 PEA-menetelmä

Tilavaraus (engl. space charge) on tietyn tilavuuden nettovaraus, jolla on suuri vaikutus kiinteiden dielektristen aineiden konduktanssiin, ikääntymiseen ja hajoamiseen. Tilavarauksen mittaamisen tapoja jaetaan akustisiin, termisiin ja optisiin menetelmiin. Pulsitetut akustiset menetelmät ovat suosittuja niiden säilyttävän luonteen takia. Jos ääniaalto syntyy dielektrisen aineen sisällä eikä ole luotu ulkoisesti, on kyseessä pulsitettu elektroakustinen menetelmä (engl. Pulsed Electroacoustic Method, PEA) [6].

PEA-menetelmä kehitettiin alun perin 1980-luvulla ja pystyttiin todistamaan teoreettisesti PEA:n käyttö tilavarauksen mittaamiseen [6]. PEA:ssa sähköeriste varastoi itseensä tilavarausta korkeapotentiaalisessa sähkökentässä, jolloin elektrodis-

sa syntyy akustisia signaaleja. Jos pietsosähköinen¹ sensori kiinnitetään elektrodiin, se voi mitata materiaalin tilavarausta signaalin voimakkuudesta ja saapumisajasta. Ääniaaltojen vaimentumisen ja dekonvuluution takia vain staattista yksiulotteista varausta on mahdollista mitata yksikerroksisessa materiaalissa perinteisellä PEA-menetelmällä. [7]

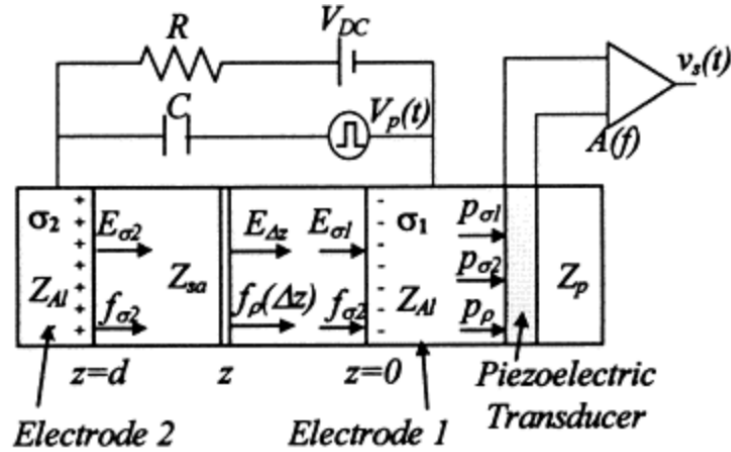
Kuvassa 2 on esitettyä PEA-menetelmän periaate. Oletetaan, että on d -paksuinen levynäyte jossa on $\rho(z)$ verran tilavarausta varastoituna. Jotta tilavaraus voidaan mitata täytyy elektrodien 1 ja 2 välillä olevaan näytteeseen kohdistaa korkeajännitteinen kapea pulssi $e_p(t)$ ajalla ΔT lyhyellä nousu- ja laskuajalla. Tämä pulssi synnyttää sähköistä kuormitusta, joka muodostaa akustisen paineaallon jokaiseen varauskerrokseen. Havaitsemalla elektrodissa 1 kiinni olevaan pietsoelektriseen muuntimeen saapuva paine $p(t)$, pystytään päättelemään dielektreetin näytteen varausjakauma lähtöjännitteestä $v_s(t)$. [8]

2.1 Tilavaraus kiinteässä aineessa

Dielektrisissä aineissa kuten elektreeteissä, eli pysyvästi sähköisesti varautuneissa tai polarisoituneissa aineissa, tai eristeissä tilavarauksen mittaaminen näytettä rikkomatta on tärkeää, kun ne altistetaan sähköiselle rasitteelle. Tilavaraukselle on pääasiassa kaksi mittaustapaa: PWP ja PEA, jotka eroavat toisistaan akustisten aallon luontitavalla. PEA:lla tilavarausta mitataan kohdistamalla kapea korkeajännitepulssi lyhyellä nousu- ja laskuajalla elektrodien 1 ja 2 välillä (kuvassa 2). Pulssi synnyttää sähköistä stressiä, joka tässä tapauksessa on Lorenzin voima. Lorenzin voima synnyttää pulsitettuja akustisia paineaaltoja, ja havaitsemalla pietsokiteeseen saapuva paineaalto voidaan määrittää eristeen varausjakauma. [8]

Erityisesti tilavarauksen mittaaminen eristeissä, ja varsinkin korkeajännite eristeisissä systeemeissä, on tärkeää, sillä liiallinen tilavarauksen kertymä vääristää eris-

¹ilmiö, jossa mekaaninen jännitys aiheuttaa sähköistä polarisoitumista



Kuva 2. PEA-menetelmä periaate [8]

teen sisäistä kenttää ja voi johtaa eristeen hajoamiseen. Tämän takia säännöllinen tilavarauksen kertymän mittaaminen ja analysointi on tärkeää. Ottaen huomioon PEA:n akustiset ominaisuudet, systeemin impulssivastetta vastaava referenssi signaali on korvaamaton kalibroitua varten. Kuitenkaan perinteinen tapa kohdistaa matala tasavirtasähkökenttä ja saada referenssi signaali ennen tilavarauksen syntymistä ei välttämättä aina toimi, varsinkaan suurjännitetasavirta (engl. high-voltage direct current, HVDC) kaapeleissa, joissa voi olla entuudestaan tilavarausta kaapelin korkeajännitteellisen ja termisen historian takia. [9] Tilavarauksen kertymä HVDC-kaapeleissa vääristää sen sisäistä sähkökenttää ja lisää paikallisesti rasitusta, joka aiheuttaa ennen aikaisesti eristysvian. Siksi tilavarauskertymän tarkka mittaaminen on tärkeää eristekaapeleissa korkeajännitteisen tasavirran rasituksen alaisuudessa. PEA-menetelmät ovat käytännöllisiä tähän tarkoitukseen, koska ne sopeutuvat monenlaisiin eri geometrioihin. [10]

3 Sovelluksia

Elektroakustiikkaa käytetään hyödyksi monilla eri teollisuuden aloilla, kuten kosmetiikassa, elintarvikkeissa, keramiikassa ja mikroemulsioissa. Elektroakustiikalla on

mahdollista selvittää materiaalien, erimerkiksi elektrolyyttien ja kolloidien, erilaisia ominaisuuksia, muun muassa hiukkasten kokoa ja zeta-potentiaalia. [11]

3.1 zeta-potentiaali mittaukset

Kolloideja käytetään monella eri teollisuuden alalla, muun muassa lääke-, ruoka-, elektroniikka- ja keramiikkateollisuudessa. zeta-potentiaali (ζ) on nimitys elektrokineettiselle ilmiölle, joka on dispersioväliaineen ja dispergoituneen hiukkasen välisen paikalleen kiinnitetyn nestekerroksen potentiaaliero. [5]

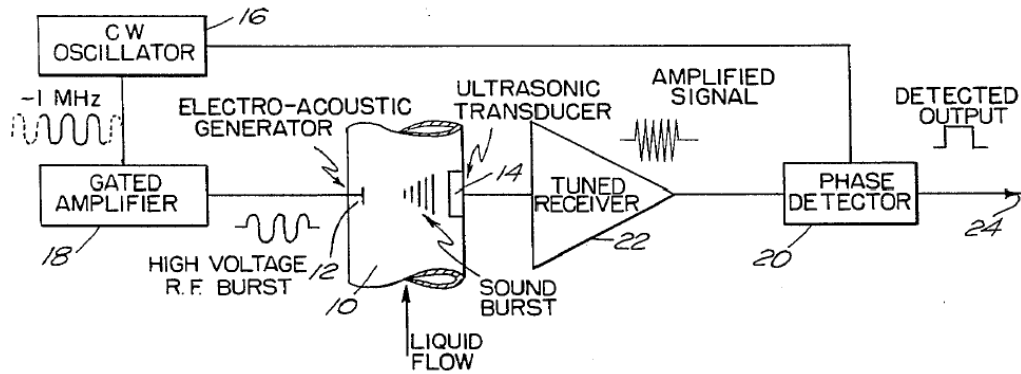
zeta-potentiaalimittaukset ovat tärkeässä osassa dispersioiden, emulsioiden ja suspensioiden käytöksen ymmärtämisessä erilaisissa olosuhteissa, kuten säilyvyydessä, stabiloinnissa, uusissa formulaatioissa. Se on myös kriittinen parametri soluvuorovaikutuksissa ja bioyhteesopivuudessa. [5]

ζ -potentiaalia ei voi mitata suoraan sellaisenaan, mutta sitä voi selvittää erilaisilla elektrokineettisillä menetelmillä mukaan lukien elektroakustiikalla. Menetelmistä suosituin ja eniten käytetty on elektroforeesi. Elektroakustiikka on kuitenkin paras vaihtoehto selvittämään läpikuultamattomien ja valoherkkien aineiden ominaisuuksia, koska se ei tarvitse valoa ja on täten vapaa optisten menetelmien epäpuhtauksilta. Elektroakustiikalla pystytään myös analysoimaan efektiivisesti konsertoitujen ja kompleksisten suspensioita nanometristä kymmeneen mikrometriin. [5]

3.2 Acoustosizer

Acoustosizer on laite, jolla voidaan mitata nesteen, esimerkiksi hiukkaslietteen tai dispersion, elektrokineettisiä ominaisuuksia kuten zeta-potentiaalia, hiukkaskokoa ja sähkönjohtavuutta. Acoustosizer määrittää näitä ominaisuuksia ESA-menetelmällä, kun hiukkaset ovat suurempia kuin $0,1 \mu\text{m}$ sillä näitä pienemmät hiukkaset pysyvät samassa tahdissa kohdistetun kentän kanssa. [12].

Piirroskaavion, kuva 3, acoustosizer-laitteessa on putki, jossa on kiinnitettynä



Kuva 3. Kaaviokuva acoustosizer-laitteesta [13]

elektrodi ja akustinen anturi kosketuksissa nesteen kanssa. Jatkuva aalto-oskillaattori tuottaa 0,5 ja 5,0 MHz väliltä taajuutta, joka syötetään yhtäaikaaisesti vahvistimeen ja vaiheilmaisimeen. Vahvistin syöttää, yleensä satojen volttien suuruisen signaalin akustiseen lähettimeen. Näytteen läpi akustiseen vastaanottimeen saapunut signaali ohjataan vaiheherkkään ilmaisimeen ja sen jälkeen vaihe- tai amplitudianturiin, josta voidaan mitata saapuneen ja lähetetyn aallon suhteellinen vaihe-ero. Pohjimmiltaan tämä vaihe-ero riippuu lähettimen ja anturin välisestä matkasta, äänennopeudesta nestemäisessä väliaineessa, ja hiukkas- tai emulsiopisaroiden nettovarauksen merkistä. [13]

Äänen luomiselle pulssitetussa sähkökentässä on muutama etu verrattuna sen havaitsemiseksi vaihtelevasta sähkökentästä. Ensinnäkin, on helpompi ylläpitää vakio amplitudista sähkökenttää elektrodien välillä. Tämä kompensoi nesteen johtavuuden muutoksia. Toiseksi, on kohtuullisen helppoa muodostaa suuri sähkökenttä nesteessä ja tapa havaita matalaa ultraääntä on tunnettu. Varsinkin kun on huomattavasti hankalampaa optimoida nesteessä käytettävää vastaanotin elektrodi kokoonpanoa, jonka sähköiset ominaisuudet muuttuvat paljon. [13]

4 Yhteenveto

Elektroakustiikka on akustiikan osa-alue, jossa akustinen ja sähköinen kenttä kytkeytyy. Elektroakustiikalla on mahdollista selvittää erilaisten aineiden akustisia sekä sähköisiä ominaisuuksia. Ilmiönä elektroakustiikkaa tapahtuu sekä ääniaallosta sähkökentäksi että sähkökentästä ääniaalloksi. Ensimmäinen näistä ilmiöistä on UVP, jossa varautuneiden hiukkasten vaihe-ero muodostaa sähkökentän. UVP:n vastakainen ilmiö on ESA, jossa vaihteleva sähkökenttä saa varautuneet hiukkaset värähtelemään edestakaisin muodostaen mitattavan akustisen aallon.

PEA-menetelmät ovat elektroakustisia menetelmiä, joita käytetään selvittämään tilavarausta dielektrisissä aineissa. Tilavaraus voi vaikuttaa dielektreettien aineiden ominaisuuksiin negatiivisesti ja sen takia sitä halutaan mitata. PEA:ssa elektreettiin kohdistetaan akustisia pulsseja ja mitataan tilavarauksen muuttumista. Nämä menetelmät ovat suosittuja niiden näytettä rikkomattoman luonteen takia.

Elektroakustiikalla on myös mahdollista mitata aineiden muita ominaisuuksia, kuten zeta-potentiaalia. zeta-potentiaali vaikuttaa suspensioiden, emulsioiden ja dispersioiden erilaisiin ominaisuuksiin, kuten säilyvyyteen. Elektroakustiikka on suosittu mittaussuomenelmä varsinkin valoherkkien ja läpikuultamattomien aineiden kanssa.

Tekoälyn käyttö tutkielmassa

Tutkielman teossa ei ole hyödynnetty tekoälyä.

Viitteet

- [1] A. S. Dukhin ja P. J. Goetz, *Characterization of Liquids, Dispersions, Emulsions, and Porous Materials Using Ultrasound*, third edition ed. (ElsevierAmsterdam, 2017).
- [2] P. Debye, *The Journal of Chemical Physics* **1**, 13 (1933) [doi:10.1063/1.1749213](https://doi.org/10.1063/1.1749213).
- [3] J. Khan, M. Wang, H. Schlaberg ja P. Guan, *Chemical Physics* **425**, 14 (2013) [doi:10.1016/j.chemphys.2013.07.015](https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2013.07.015).
- [4] A. Babchin, R. Chow ja R. Sawatzky, *Advances in Colloid and Interface Science* **30**, 111 (1989) [doi:10.1016/0001-8686\(89\)80005-3](https://doi.org/10.1016/0001-8686(89)80005-3).
- [5] R. Greenwood, *Advances in Colloid and Interface Science* **106**, 55 (2003) [doi:10.1016/S0001-8686\(03\)00105-2](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(03)00105-2).
- [6] Ying Li, M. Yasuda ja T. Takada, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* **1**, 188 (1994) [doi:10.1109/94.300251](https://doi.org/10.1109/94.300251).
- [7] H. Rao, B. Zhou, F. Zhang, Y. Xu, C. Hong ja J. Yang, kirjassa *2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)* (IEEEChengdu, China, 2021), pp. 979–983 [doi:10.1109/AEEES51875.2021.9403102](https://doi.org/10.1109/AEEES51875.2021.9403102).
- [8] A. Vázquez, G. Chen, A. Davies ja R. Bosch, *Journal of the European Ceramic Society* **19**, 1219 (1999) [doi:10.1016/S0955-2219\(98\)00406-3](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(98)00406-3).
- [9] X. Li, T. Kawashima, Y. Murakami, N. Hozumi ja P. Morshuis, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* **32**, 797 (2025) [doi:10.1109/TDEI.2024.3449269](https://doi.org/10.1109/TDEI.2024.3449269).
- [10] A. Raja, B. Vissouvanadin, T. Vu, G. Teyssedre ja N. Sinisuka, *Procedia Technology* **11**, 327 (2013) [doi:10.1016/j.protcy.2013.12.198](https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.198).
- [11] A. S. Dukhin ja P. J. Goetz, *Advances in Colloid and Interface Science* **92**, 73 (2001) [doi:10.1016/S0001-8686\(00\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00035-X).
- [12] R. J. Hunter ja R. W. O'Brien, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **126**, 123 (1997) [doi:10.1016/S0927-7757\(96\)03964-7](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(96)03964-7).
- [13] T. Oja, G. L. Petersen ja D. W. Cannon, US Patent 4497,208, 1985.