



# **MEMS-teknologian opas**

Nicodemo Coco

OPINNÄYTETYÖ  
Marraskuu 2020

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma  
Automaatiotekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma  
Automaatiotekniikka

COCO, NICODEMO:  
MEMS-teknologian opas

Opinnäytetyö 29 sivua  
Marraskuu 2020

---

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on saada lukijalle selkeä ymmärrys MEMS-teknologiasta. MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) on mikropiirisysteemi, joka voi olla esimerkiksi kiihtyvyyssanturi tai gyroskoopianturi. Tässä opinnäytetyössä selvitetään, mitä MEMS-anturit ovat ja mitä niillä voi saavuttaa. Opinnäytetyössä käsitellään valmistusprosessi, käyttökohteet ja tulevaisuus. Opinnäytetyössä käydään läpi, miten MEMS-tuotantoprosessi alkaa yksinkertaisella piikiekolla ja loppuu valmiina mikropiirisysteeminä, kuten MEMS-gyroskoopina. Opinnäytetyössä esitellään, miten elektroniikkakomponentteja valmistetaan mikrometriskaalassa etsauskaiverrusprosessin avulla. Opinnäytetyössä esitellään käyttökohteet, joissa käytetään eniten MEMS-antureita. Näitä ovat autoteollisuus, lääketiede ja teollisuus. Opinnäytetyö sisältää tietoa MEMS-teknologiasta useista artikkeleista ja tutkinnoista.

Opinnäytetyössä tutkitaan MEMS-teknologian hyvät ja huonot puolet ja uutta mahdollista teknologiaa MEMS-teollisuudessa. Opinnäytetyössä todetaan, että MEMS-anturit ovat kooltaan erittäin pieniä ja kevyitä. Ne ovat erittäin halpoja ja niillä on pieni lämpövakio. Tuotantotehtaiden perustamiskustannukset ovat korkeat MEMS-teollisuudessa. MEMS-anturin suunnittelu on haastavaa, koska se sisältää erittäin monimutkaisia toimenpiteitä mikromittakaavassa. MEMS-teknologian kehitys kasvaa jatkuvasti. Paperin käyttöä MEMS-antureiden materiaalina tutkitaan ja kehitetään.

---

Asiasanat: mikromekaniikka, anturit, puolijohdetekniikka, teknologia

## **ABSTRACT**

Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering  
Automation Engineering

COCO, NICODEMO:  
MEMS Technology Guide

Bachelor's thesis 29 pages  
November 2020

---

The purpose of this thesis is to give the reader a clear understanding of MEMS technology. MEMS stands for Micro Electro-Mechanical Systems, a microcircuit system, which for example can be an accelerometer or gyroscope sensor. This thesis presents basic understanding of MEMS and what can be achieved with it. The main topics discussed in this thesis are the following: manufacturing process, applications, and the future of MEMS technology. The thesis includes how the manufacturing process starts with a simple silicon wafer and ends as a finished microcircuit like a gyroscope sensor. The thesis also introduces how electrical components are manufactured in the micrometre scale using the etching engraving process. The thesis looks at applications in the following industries: automotive industry, and medicine industry. The thesis contains information about MEMS technology from several articles and researches.

The thesis examines the pros and cons of MEMS technology and new possible technology in the MEMS industry. The thesis states that MEMS sensors are very small and light in size. They are very cheap and have a low thermal constant. The cost of setting up production plants is high in the MEMS industry. The design of a MEMS sensor is challenging because it involves very complex measures at the micro scale. The development of MEMS technology is constantly growing. The use of paper as a material for MEMS sensors is being researched and developed.

---

Key words: micromechanics, sensors, semiconductor technology, technology

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	YLEISTIETO JA HISTORIA .....	7
	2.1 Lyhyt historia .....	7
	2.2 Hyvät ja huonot puolet .....	8
3	TEKNOLOGIA JA VALMISTUSPROSESSI .....	9
	3.1 Fotesistiivinen etsausprosessi .....	10
	3.2 Märkä kemikaalietsaus .....	13
	3.3 RIE-plasmaetsaus .....	14
	3.4 Anisotrooppinen ja isotrooppinen etsaus .....	15
	3.5 Valmistuotteet .....	16
	3.6 MEMS-kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate .....	17
	3.7 MEMS-gyroskoopin toimintaperiaate .....	18
4	KÄYTTÖKOHTEET .....	19
	4.1 Autoteollisuus .....	20
	4.2 Lääketiede .....	21
	4.3 Siltojen kunnonvalvonta .....	23
	4.4 MEMS lentokoneessa .....	24
5	TULEVAISUUS .....	25
	5.1 Tulostettavat MEMS-anturit .....	25
	5.2 MEMS ja automaattinen autojärjestelmä .....	26
6	POHDINTA .....	27
	LÄHTEET .....	28

**ERITYISSANASTO**

ABS	Anti-lock Braking System, lukkiutumattomat jarrut
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems, kehittyneet kuljettajan avustusjärjestelmät
AHRS	Attitude and Heading Reference System, asenne- ja suuntaviittausjärjestelmä
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit, sovelluskohmainen mikropiiri
ESC	Electronic Stability Control, elektroninen vakautusjärjestelmä
Etsaus	Syövytysprosessi, halutun kuvion muodostamiseksi
Keinohorisontti	Lentokonemittalaite, joka näyttää, missä suunnassa maan pinnan suuntainen horisontti on
MEMS	Micro-Electro-Mechanical system, mikropiirijärjestelmä
Pii	Puolimetalli (Si), toiseksi yleisin alkuaine
Piidioksidi	Silika (SiO <sub>2</sub> ), piin ja hapen yhdiste
Piikarbidi	(SiC), piin ja hiilen keraaminen yhdiste
Substraatti	Puolijohdekomponentin pohjamateriaali

## 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi MEMS-teknologian (Micro Electro Mechanical Systems) kokonaisuudessaan. Tällä työllä on tarkoitus antaa lukijalle selkeää ymmärrys MEMS-antureista. Opinnäytetyössä käydään läpi seuraavat aiheet: yleistieto ja historia, teknologia ja valmistusprosessi, käyttökohteet, vertailu ja yhteenveto ja tulevaisuus. Opinnäytetyössä keskitytään, miten on mahdollista kaihvertaa monimutkaisen mikropiirijärjestelmän piikiekkoon etsausprosessin avulla. Opinnäytetyössä tutustutaan yksityiskohtaisemmin MEMS-kiihtyvyyssanturin ja MEMS-gyroskoopin toimintaperiaatteeseen ja sisäisen rakenteeseen. Myöhemmin opinnäytetyössä tutustutaan MEMS-teknologian useisiin käyttökohteisiin, kuten sydäntahdistin, tulostettaviin antureihin ja itseajaviin autoihin. Lopuksi katsotaan, miltä MEMS-teknologian tulevaisuus näyttää, kuten uudet mahdolliset valmistustavat ja itseajavat autot.

## 2 YLEISTIETO JA HISTORIA

MEMS on lyhenne englannin kielen sanasta Micro Electro Mechanical Systems. Termi MEMS ei koske pelkästään antureita. (What is MEMS Technology?, n.d.) MEMS-anturit luodaan fotolitografian avulla eli samalla periaatteella kuin esimerkiksi tietokoneprosessorit. MEMS tarkoittaa mikrometrimittakaavassa integroitujapiirejä, joilla on kyky havaita, hallita ja luoda vaikutuksia mikrotasolla. MEMS-anturit sisältävät mekaanisia sekä sähkömekaanisia elementtejä. Esimerkki MEMS-anturista on gyroskooppi, joka mittaa asennon muutosta X-, Y- ja Z-akselin suuntaan, tai magnetometri, joka mittaa kulmamuuutoksen nopeutta.

Koska MEMS ei ole sidottu mihinkään tiettyyn käyttöön, sitä voidaan käyttää monissa sovelluksissa, kuten videopeleissä, kännyköissä, painemittauksessa, jne. Opinnäytetyössä käydään tarkemmin seuraavien käyttökohteiden alueet: autoteollisuus, lääketiede ja teollisuus.

### 2.1 Lyhyt historia

Vuonna 1982 otettiin käyttöön autojen automaattiturvatyynyjärjestelmät hyödyntämällä MEMS-antureita törmäyksen havaitsemiseen. Analog Devices -yhtiö loi MEMS-kiiktyvyysanturin, jossa mekaaniset ja elektroniset osat integroititiin samaan siruun. Ensimmäinen luotu kiiktyvyysanturi havaitsee törmäyksen aikana tapahtuvan nopeuden äkillisen kasvun tai laskun. (ETHW, 2017 & The ST blog, 2018)

## 2.2 Hyvät ja huonot puolet

### Hyvät puolet

MEMS-anturit ovat kooltaan erittäin pieniä, sekä eivät paina paljon. Virran kulutus MEMS-antureissa on myöskin erittäin alhainen. MEMS-antureita on helppoa integroida järjestelmiin ja muokata, kuten esimerkiksi autojärjestelmiin. Erät valmistetaan suurissa ryhmissä. Ne ovat erittäin halpoja kustannuksiltaan. Niillä on pieni lämpövakio.

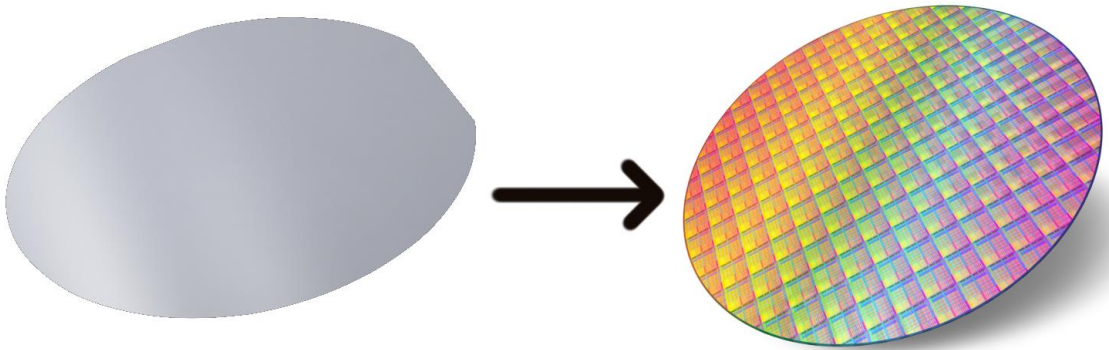
### Huonot puolet

MEMS-anturin suunnittelu on haastava tehtävä, koska se sisältää erittäin monimutkaisia toimenpiteitä mikromittakaavassa. MEMS-antureita voidaan valmistaa pelkästään ISO 4 puhdastiloissa. ISO 4 on puhdastilatase, jossa huoneen sisällä saa olla enintään 10 000 partikkelia. Tuotantotehtaiden perustamiskustannukset ovat myös korkeat MEMS-teollisuudessa.



### 3 TEKNOLOGIA JA VALMISTUSPROSESSI

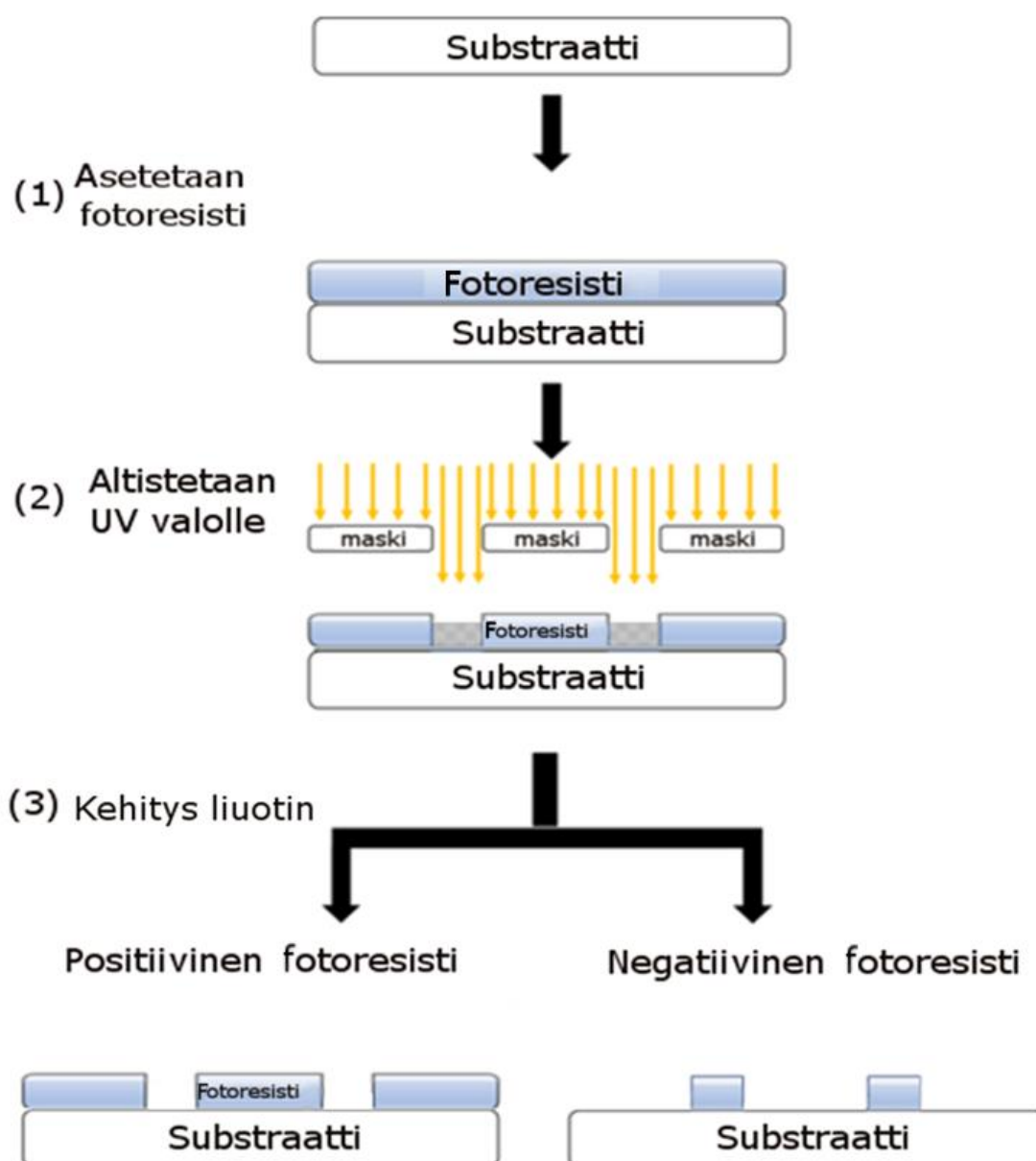
MEMS-valmistusprosessi alkaa puhdashuoneessa, jossa valmistetaan piikiekoja. Pii on puolijohdemateriaali. Kuten normaalit metallit pii johtaa sähköä, mutta sen resistiivisyys laskee lämpötilan kasvaessa. Se on myös joustava materiaali, joka kestää jatkuvaa mekaanista rasitusta. Tämän takia sitä käytetään substraattina, koska se soveltuu hyvin MEMS-antureihin, kuten kiihtyvyyssmittariin tai gyrokooppiin, joissa tarvitaan sekä sähköjohtavaa materiaalia ja mekaanista rasitusta kestävästä materiaalia. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi, miten yksinkertainen piikieppo muunnetaan useiksi sensorelementeiksi (kuva 1).



KUVA 1 Tyhjä piikieppo ja valmis MEMS-kieppo (Project happening 2020)

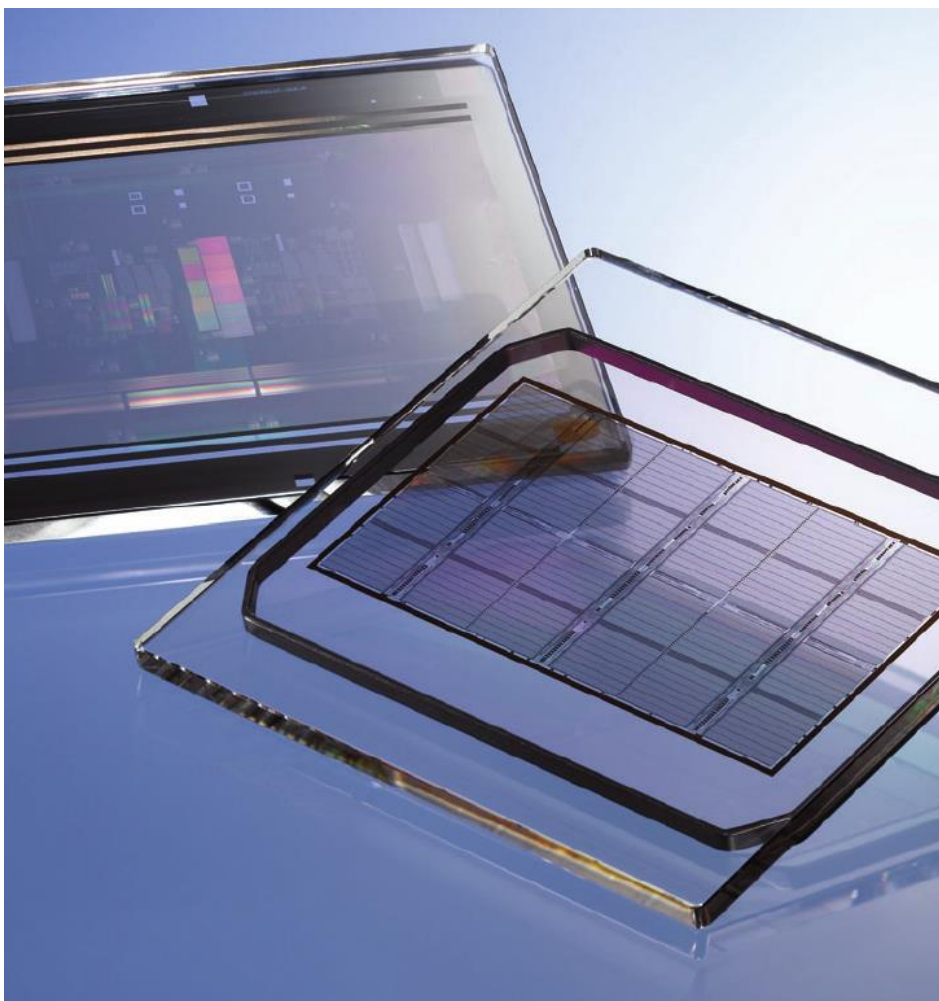
### 3.1 Fotoresistiivinen etsausprosessi

Kiekon päälle asetetaan ohut kerros fotoresistiivistä materiaalia, joka on valoherkkää materiaalia. Tämän jälkeen kiekko asetetaan uuniin, jotta fotoresistiivinen kerros kovettuu. Kiekon päälle asetetaan fotomaski (kuva 3) ja altistetaan UV- tai röntgensäteelle. Fotomaskin avulla fotoresistiivisen kerrokseen saadaan etsattua mukautettu kuvio joko märkäkemikaaleilla tai plasmaetsauksella. Tästä on esimerkki kuvassa 2.



KUVA 2 Fotoresistiivinen etsausprosessi (Singh 2019)

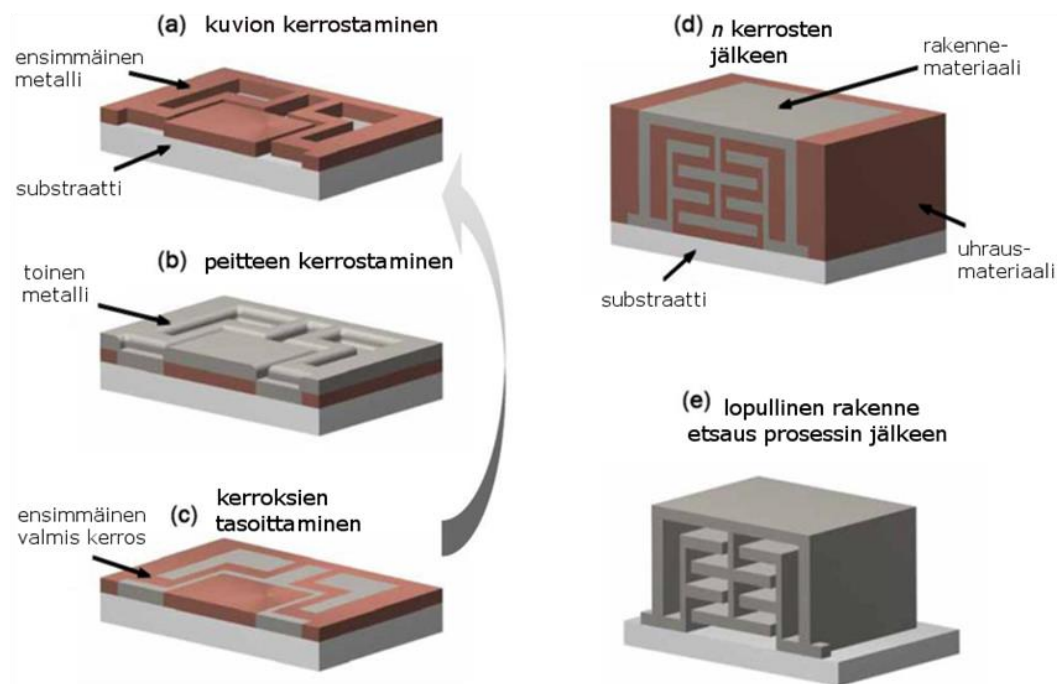
Tämän jälkeen fotoresistiiviset liukoiset osat poistetaan kehitysluottimella. Lopuksi kiekko pestään isopropanolilla ja asetonilla ja kuivataan typellä ja puhdistetaan ylimääräiset orgaaniset jäämät 3:1 rikkihappo- ja vetyperoksidikemikaali yhdistelmällä. (Jove, n.d.)



KUVA 3 Fotomaski (Toppan n.d.)

Monimutkaisempien rakenteiden, kuten kiihtyvyyselementin etsausprosessi on hieman erilainen, mutta periaate on sama. MEMS-valmistus tapahtuu vaiheittain, jossa substraattikerroksen päälle asetetaan uhrauskerros ja rakennekerros yksi kerrallaan. Uhrausmateriaali estää rakennemateriaalin joutumista ei toivottuihin kohtiin, ja kun rakennemateriaali on asettunut ja kovettunut, voidaan etsata uhrausmateriaalin.

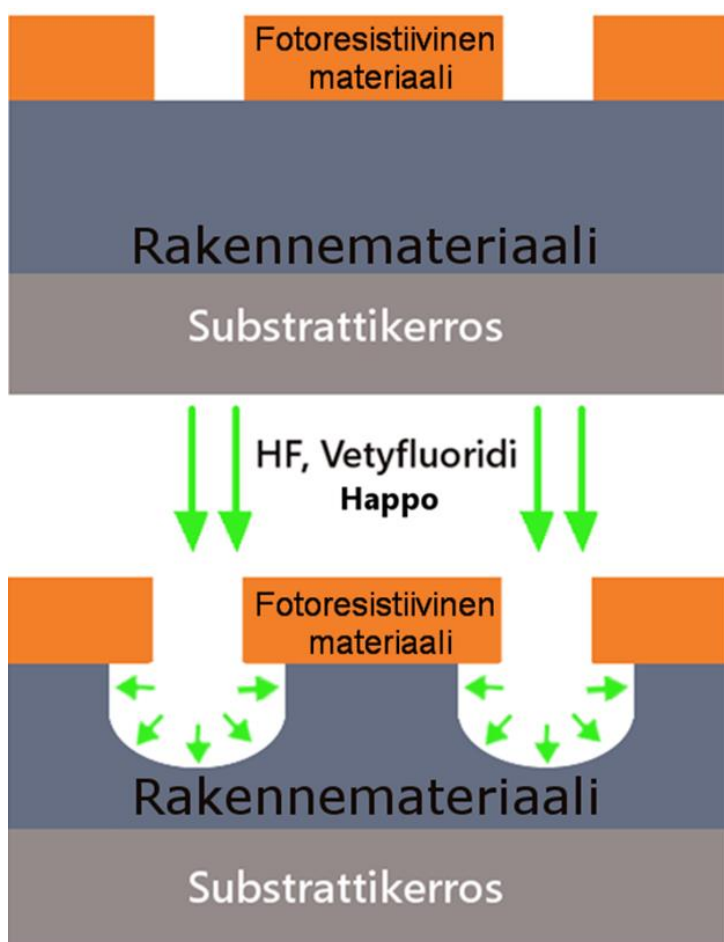
Tämä toistuu, kunnes rakenne on valmis. Uhrausmateriaali etsataan pois joko märkäkemikaali- tai plasmaetsauksella, minkä jälkeen lopullinen rakenne on valmis. Tämä nähdään kuvasta 4.



KUVA 4 MEMS-rakennevalmistus (Butler, E & F 2011)

### 3.2 Märkä kemikaalietsaus

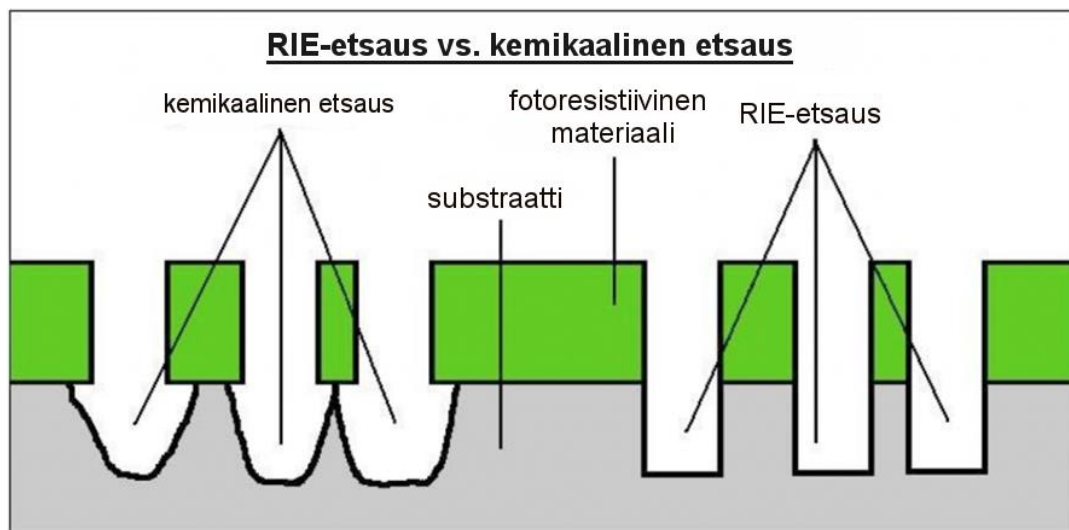
Kun kuvio on etsattu kiekon päälle, voidaan aloittaa varsinaisen rakennemateriaalin etsaus. Rakennemateriaali voi olla metallia, kuten kupari tai kulta, piikarbidi tai sähköjohtavaa polymeeriä. Yleisin ja halvin tapa etsata on kemikaalilla.



KUVA 5 Märkäkemikaalietsausprosessi

### 3.3 RIE-plasmaetsaus

Kuten märkäetsaus, plasmaetsausprosessissa piikerros peitetään naamiokerroksella. Plasmaetsausta kutsutaan kuivaetsaukseksi, koska siinä ei käytetä märkiä kemikaaleja. Verrattuna märkäetsaukseen plasmalla saadaan kaiverrettua pienempiä ominaisuuksia, mutta plasmaprosessi on kalliimpi kuin märkäetsaus. (Utdallas,n.d. & Winn, 2015)

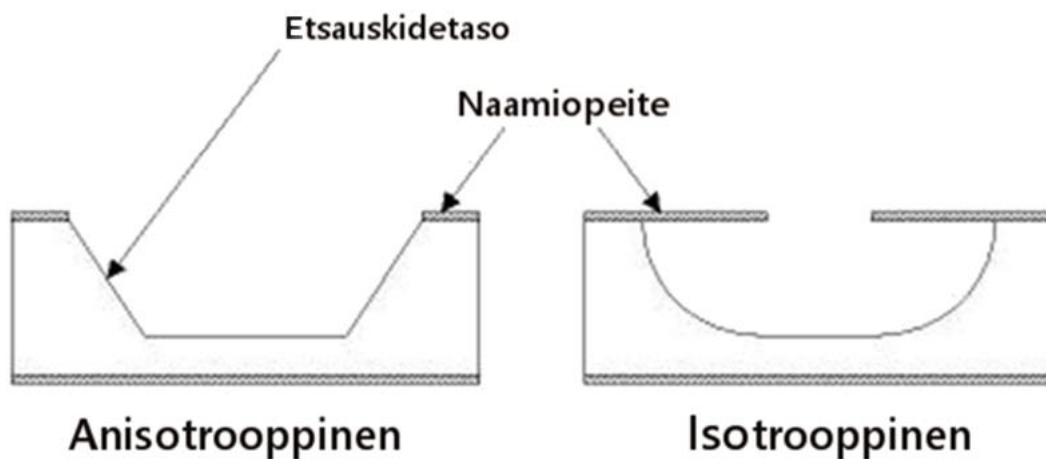


KUVA 6 RIE-plasmaetsaus (Utdallas n.d.)

Silikoniekikko etsataan kaasulla, joka on plasmatilassa. Kun kaasu on plasmatilassa, se ionisoidaan ja plasmamolekyylit kiihdytetään kohdistamalla sähkökenttää kohti substraattipintaa.

### 3.4 Anisotrooppinen ja isotrooppinen etsaus

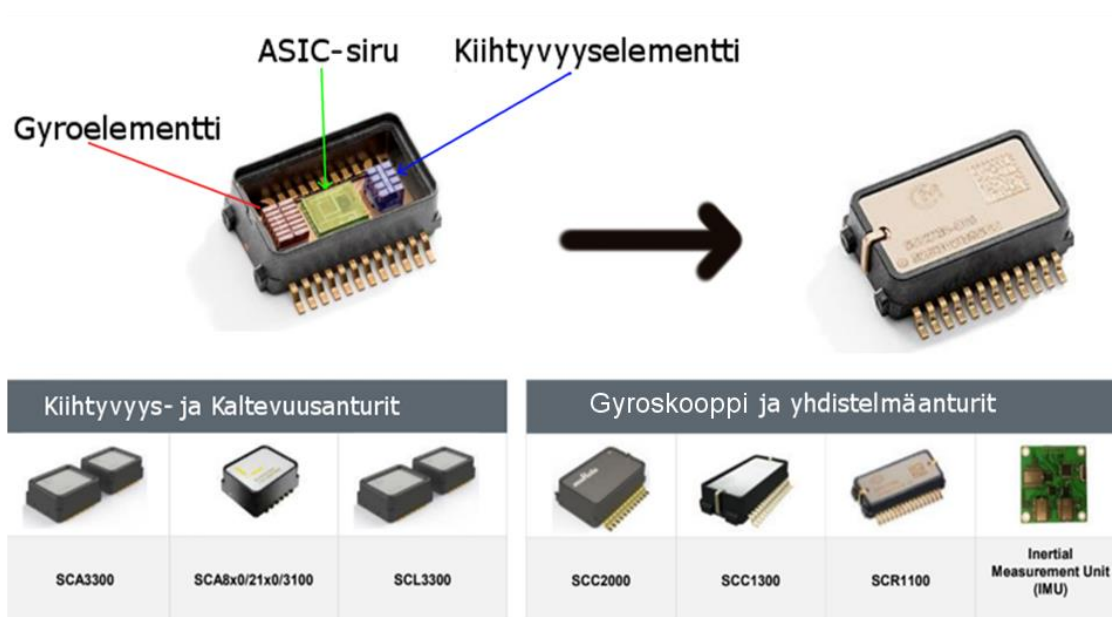
On kahta eri tapaa, miten etsausprosessi voi poistaa uhrausmateriaalin. Anisotrooppisen ja isotrooppisen etsauksen välinen ero on etsauksen vaikutussuunta. (MNX, n.d.) Kuvasta 7 nähdään, miten anisotrooppinen ja isotrooppinen etsaus eroavat toisistaan. Kuivaetsaus on yleensä anisotrooppinen ja märkäetsaus on isotrooppinen.



KUVA 7 Anisotrooppinen ja Isotrooppinen etsaus (MNX n.d.)

### 3.5 Valmistuotteet

MEMS-siruja tai -elementtejä on erilaisia, mutta yleisesti anturit sisältävät 1-2 elementtiä ja ASIC-komponentin. ASIC on sovelluskohtainen mikropiiri. Kuvassa 8 on esimerkki yhdistelmäanturista, jossa on gyro- ja kiihtyvyyselementit ja ASIC, joka auttaa käsittelemään dataa elementeiltä muuttamalla sähköisen tai mekaanisen tulosta digitaaliseksi lähtösignaaliksi.

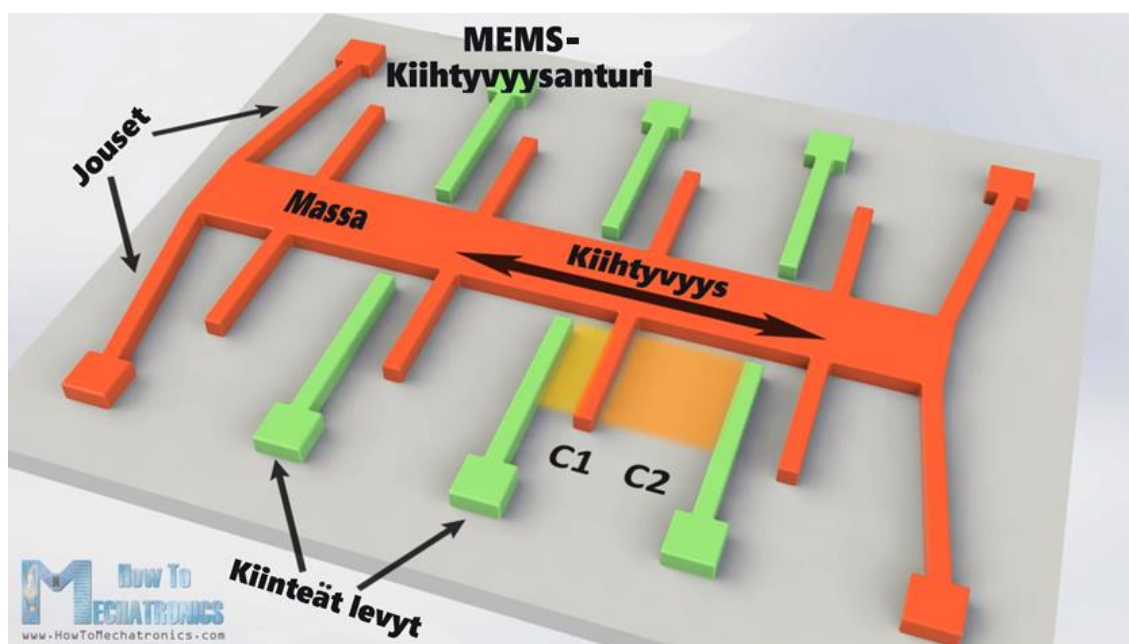


KUVA 8 Murata MEMS-anturit (Murata 2020)



### 3.6 MEMS-kiikhtyvvyysanturin toimintaperiaate

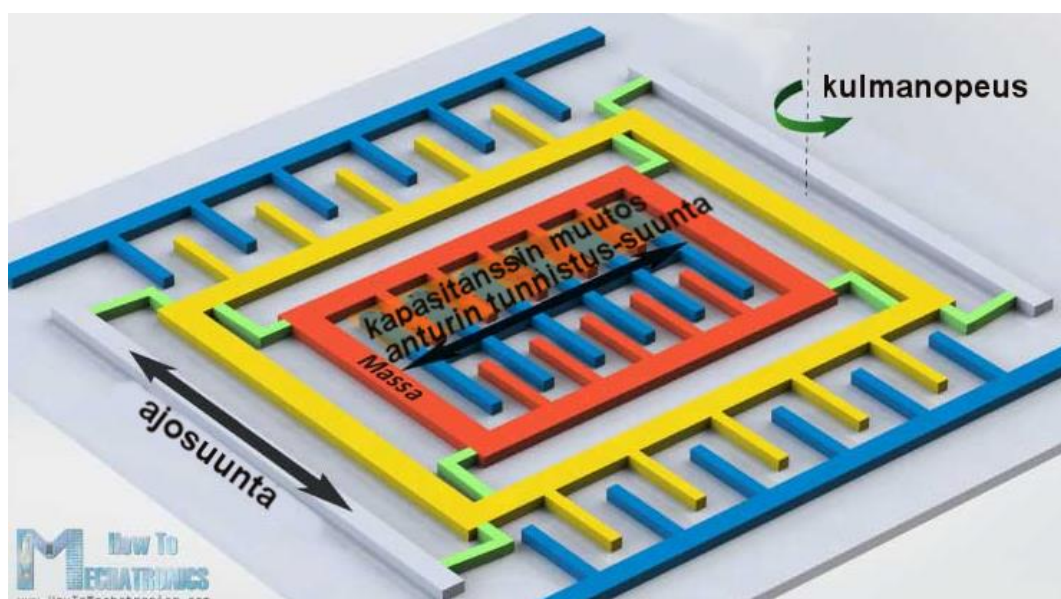
Kiihtyvvyysanturi sisältää kiinteän levyn, joka ei liiku ja toisen levyn, jossa on jouset. Tämä nähdään kuvasta 9. Kun anturiin kohdistuu voimaa, kiihtyvvyysjousitetulevy alkaa liikkua. Jousitetun levyn ja kiinteiden levyjen välieron muuttuminen aiheuttaa kapasitanssieron. Tämä kapasitanssiero mitataan ja muodostetaan vastaavaksi kiihtyvvyysarvoksi. (Nedelkovski 2015)



KUVA 9 MEMS-kiikhtyvvyysanturin toimintaperiaate (Nedelkovski 2015)

### 3.7 MEMS-gyroskoopin toimintaperiaate

MEMS-gyroskooppi sisältää massan, joka värähtelee jatkuvasti, ja kun gyroskooppiin kohdistuu ulkokulmanopeutta, joustava osa massasta liikkuu ja tekee kohtisuoran siirtymän. (Nedelkovski 2015) Samoin, kuten MEMS-kihtyvyyss anturissa, siirtymän muutos luo kapasitanssineron. Tämä kapasitanssiero vastaa gyroskooppiin kohdistuvaa kulmanopeutta. Kuvassa 10 näytetään, miltä MEMS-gyroskooppi näyttää.



KUVA 10 MEMS-gyroskoopin toimintaperiaate (Nedelkovski 2015)

## 4 KÄYTTÖKOHTEET

MEMS-anturien pääkäyttökohteet ovat autoteollisuus, terveydenhuolto ja lääketiede sekä teollisuus. Seuraavassa kuvassa on esimerkkejä käyttökohteista, joissa käytetään MEMS-antureita.



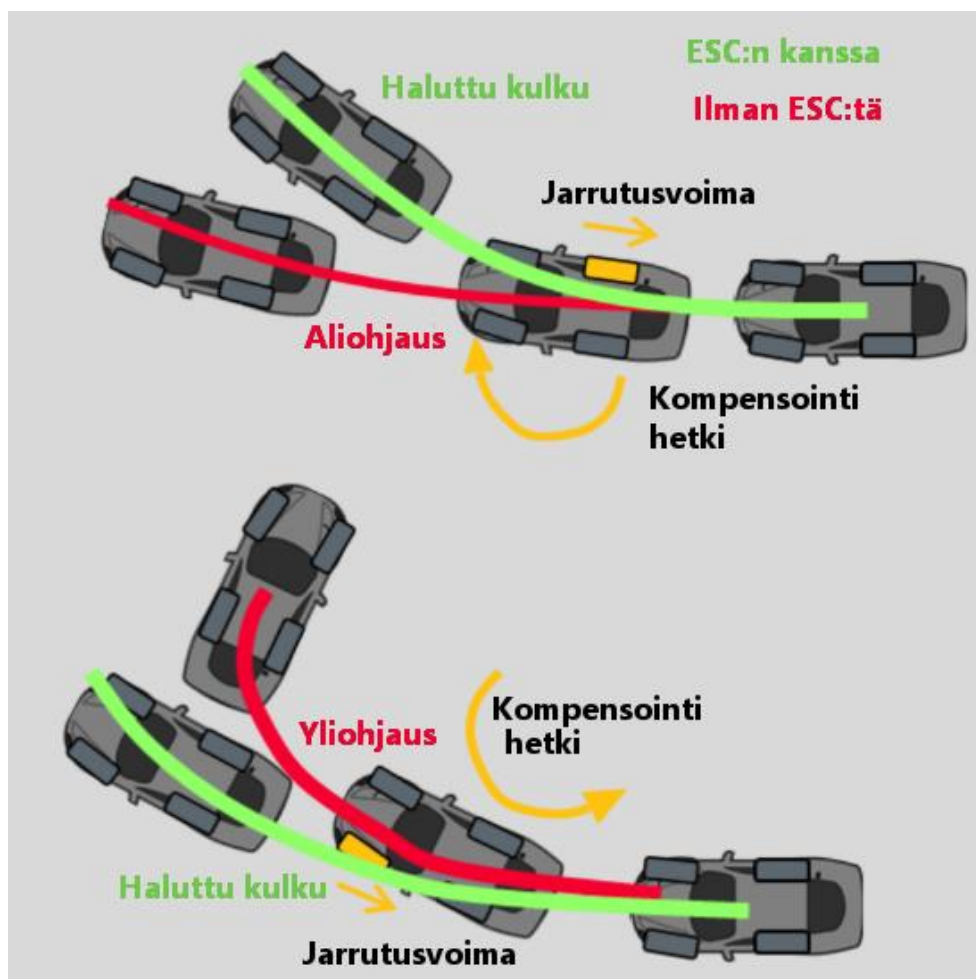
KUVA 11 Muratan MEMS-anturien käyttökohteet (Murata 2020)

On muita sovelluksia, joissa hyödynnetään MEMS-teknologiaa, kuten videopelit, tai pienelektroniikka esim. älypuhelimien sisäinen gyroskooppi.

## 4.1 Autoteollisuus

Pelkät ABS-jarrut autossa eivät riitä, kun ajetaan kaareissa. Tämän takia käytetään ajonvakautusjärjestelmää, jota merkitään lyhenteellä ESC (Electronic Stability Control). ESC käyttää jokaisen pyörän anturia ja kykyä jarruttaa yksittäisiä pyöriä, jotka ovat lukkiutumattomien ABS-jarrujen perustana. ESC lisää ohjausyksikön, joka tarkkailee ohjauspyörän kulmaa ja ajoneuvon pyörimistä ajoneuvon pysty akselin ympäri.

Näitä toimintoja varten ESC hyödyntää MEMS-kiihdytys- ja kulmanopeusantureita. Nämä anturit parantavat ajoneuvon vakautta ja turvallisuutta ajotiellä. Esimerkki ESC:n vaikutuksesta on kuvassa 12. (Murata 2020)

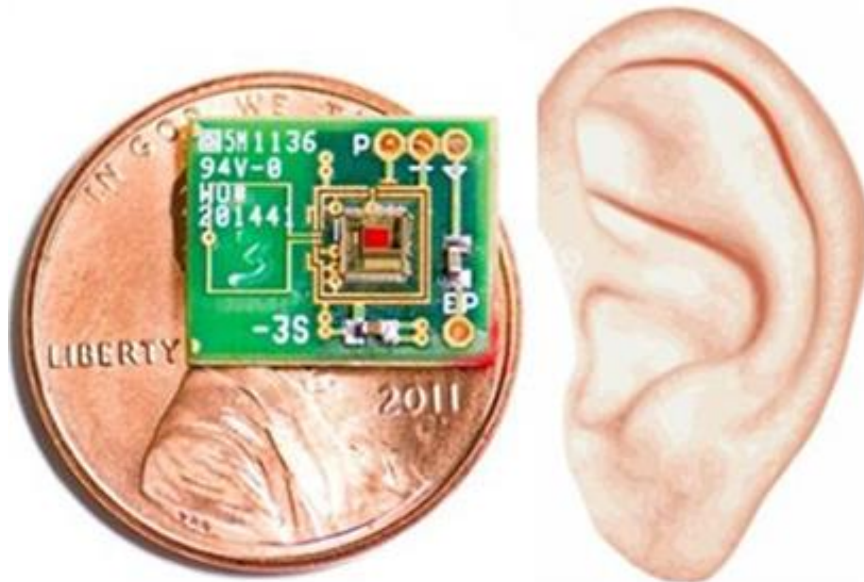


KUVA 12 Ajonvakautusjärjestelmän vaikutus (Murata 2020)

## 4.2 Lääketiede

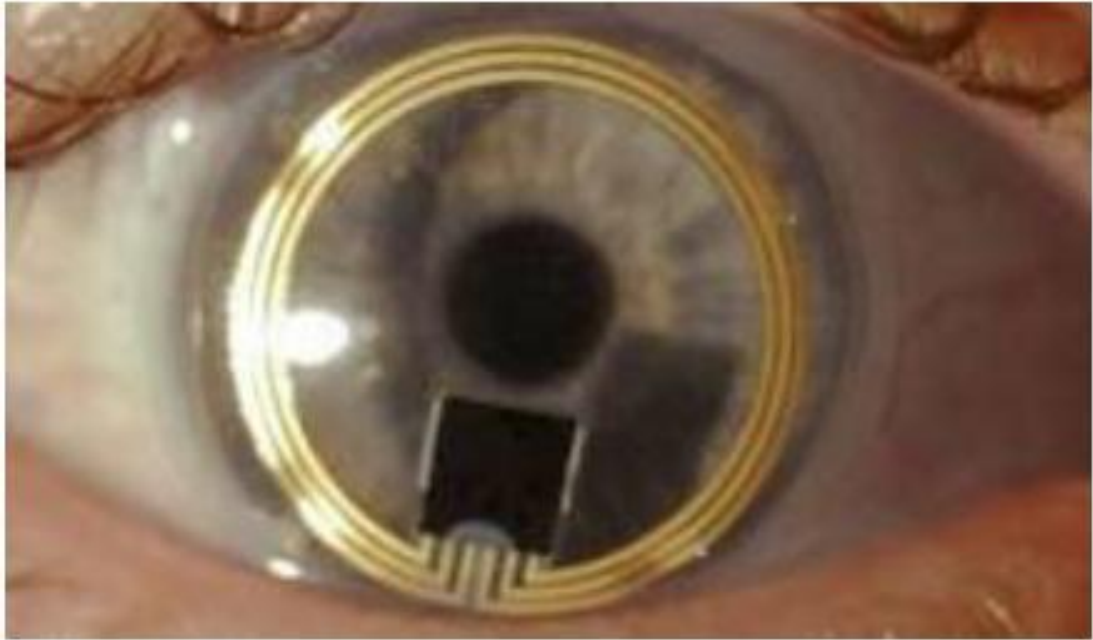
Lääketieteessä on käytetty MEMS-antureita, jotka pystyvät omavaraisesti ylläpitämään jatkuvaa toimintoa. Mikrokondensaattorien avulla MEMS-anturit pystyvät keräämään ympäristöstä energiaa, kuten kehon tuottamaa lämpöä ja kineettistä liike-energiaa. Laitteet, kuten kuulolaite tai sydäntahdistin, jotka vaativat noin 30 – 100  $\mu\text{W}$ , voi toimia jatkuvasti ilman akun vaihtoa jopa 5 - 10 vuotta.

Toinen sovellus on kuulolaite, joka on pienempi kuin kolikko (kuva 13). Tämä kirurginen implantti istutetaan korvan ihon alle ja ääniprosessori muuntaa äänen sähköiseksi signaaliksi. (Abidin & Hamzah, 2016)



KUVA 13 MEMS-kuulolaite (Abidin & Hamzah, 2016)

Glaukoomaa voidaan diagnosoida asentamalla lähetinantenni kertakäyttöiseen piilolinssiin. Glaukooma on näköhermoa vaurioittava sairaus. (Terveyskirjasto, 2018). Tästä on esimerkki kuvassa 14. MEMS-anturi pystyy havaitsemaan sarveiskalvon muodonmuutokset, josta sitten lähetinantenni lähettää tiedon langattomasti luettavaksi. (Eeherald, 2017) Tämän avulla voidaan havaita glaukooman ennen kuin se voi pahentua.

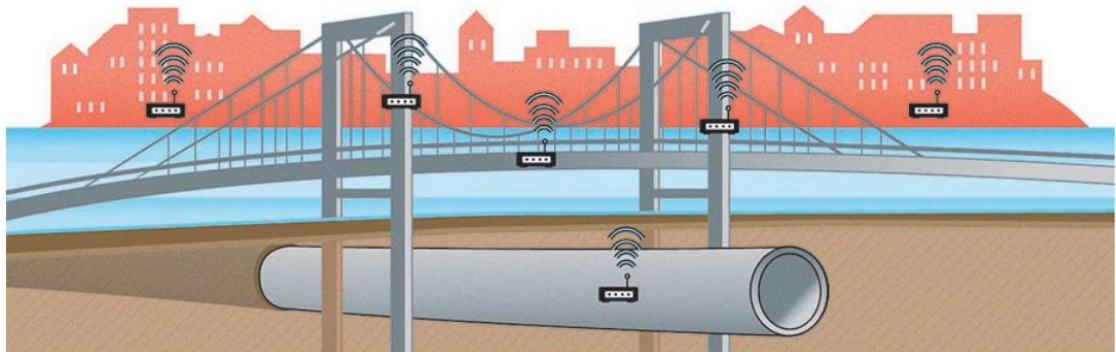


KUVA 14 Glaukooma-MEMS-anturi (Eeherald 2017)

MEMS-antureita hyödynnetään myös leikkaus- ja verisuonitoimenpiteissä. MEMS-paineantureita käytetään erikoisleikkausveitsissä, joiden avulla kirurgit suorittavat tarkkoja leikkauksia. Muita käyttökohteita lääketieteessä ovat askelmittari, verenpainen mittausta, hengityksen- ja sykkeenmittaus.

### 4.3 Siltojen kunnonvalvonta

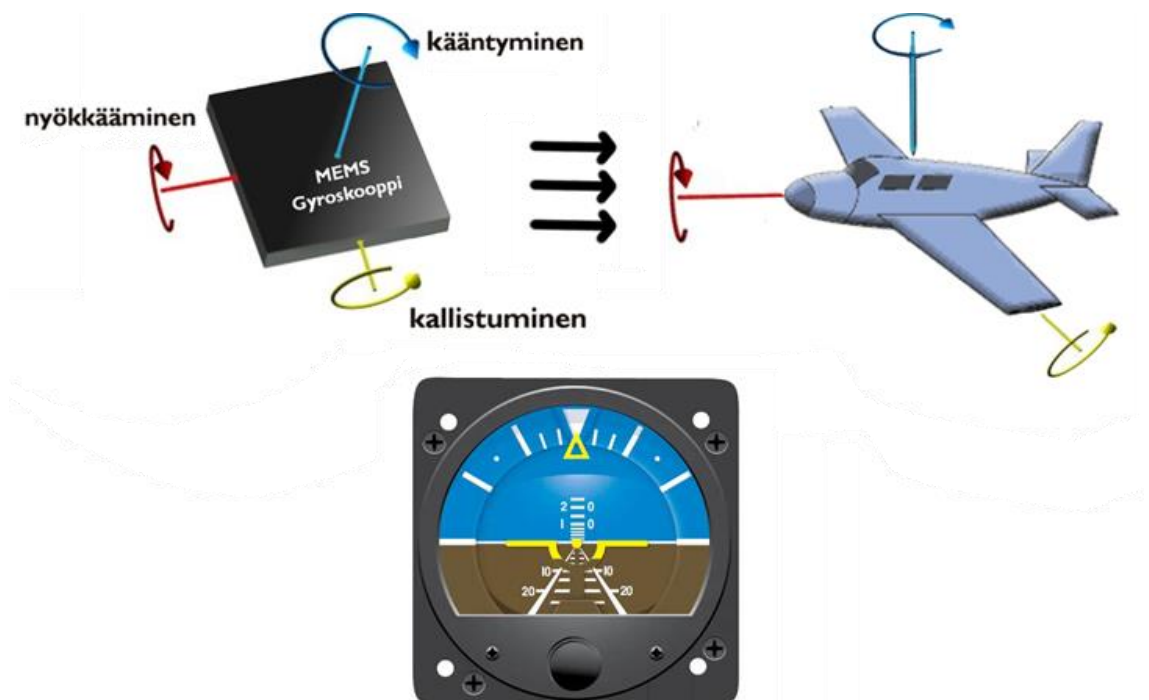
Kiihtyvyyys- ja kaltevuusmittareilla voidaan seurata sillan rakenteellista kuntoa. Mittaamalla sillan värähtelyä ja taivutusta voidaan havaita, milloin silta voi sortua tai ehkäistä sortumista ylipäättänsä. (Murata, 2018)



KUVA 15 Sillan rakenteellinen kunnonvalvonta (Murata 2020)

#### 4.4 MEMS lentokoneessa

MEMS-gyroskooppeja käytetään lentokoneissa vakautta ja suuntausta varten. Gyroskooppi tunnistaa kolme pyörimissuuntaa: nyökkääminen, kääntyminen ja kallistuminen, näin tiedetään lentokoneen suuntautuminen. (EAI, n.d.) Kuvassa 16 nähdään, mitä lentokoneen liikkeenmuutos vastaa gyroskoopissa ja gyroskoopin anturimittaukset muutetaan ymmärrettäväksi tiedoksi keinohorisonttinäytöllä.



KUVA 16 MEMS-gyroskooppi lentokoneessa (Flight Mechanic n.d.)



## 5 TULEVAISUUS

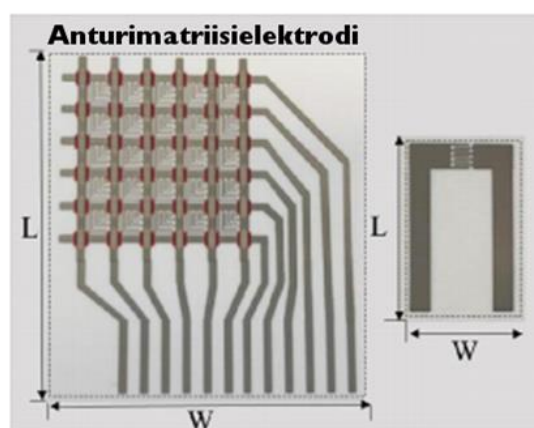
### 5.1 Tulostettavat MEMS-anturit

MEMS-materiaalit ovat olleet pääosin metallia tai lasia, jotka ovat kalliita, mutta tutkijat ovat alkaneet tutkia erilaisia materiaaleja, joita voitaisiin käyttää MEMS-antureissa. Japanilaisessa yliopistossa tutkijat loivat tulostettavan anturin, joka käyttää paperia substraattikerrosta varten. Nämä anturit mittaavat orgaanisen hajoamisprosessin aikana vapautuvat kaasut. Tämän teknologian avulla voidaan arvioida esim. hedelmien tuoreutta. Nämä anturit voivat myös tunnistaa bakteereita esim. E. coli ja muita ruokamyrkytystä tai ihotulehdusta aiheuttavia bakteeria (Pelé, 2019).

Tulostettava MEMS-anturi ei vaadi puhdastilaa tuotantoa varten ja on parempi vaihtoehto niille, jotka tarvitsevat pelkästään 1000 anturia vuodessa. Nämä anturit ovat kertakäyttöisiä, mutta substraatti voi olla myös biohajoava paperi, jotta ne eivät olisi haitallisia ympäristölle. Tämä teknologia on vielä kehitysvaiheessa ja anturit ovat postimerkin kokoisia, joten on vielä paljon parannettavaa.



#### 36 kaasuantureiden ryhmä

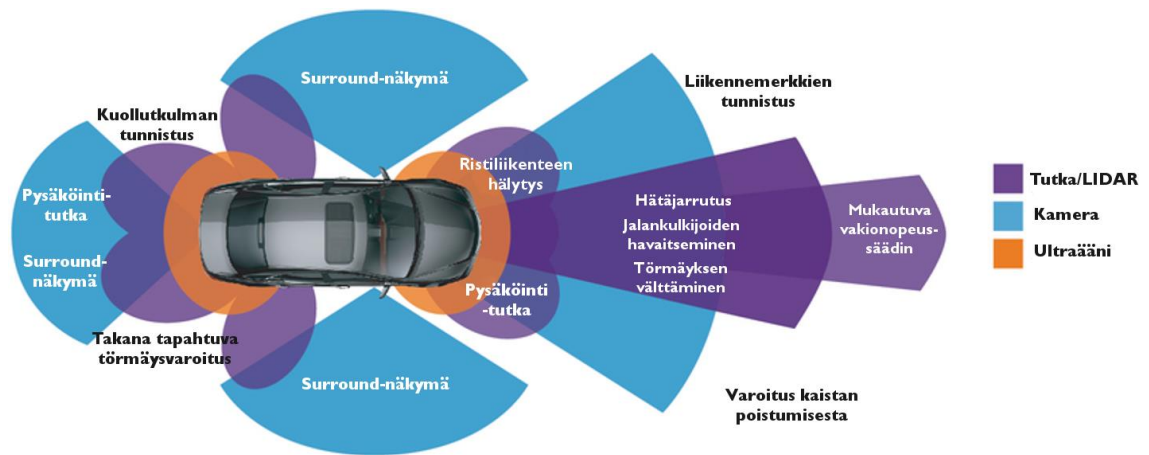


Lomitut elektrodit  
kaasuselektiivisillä polymeereillä

KUVA 17 Paperisubstraatti-MEMS-anturit (Eetimes 2019)

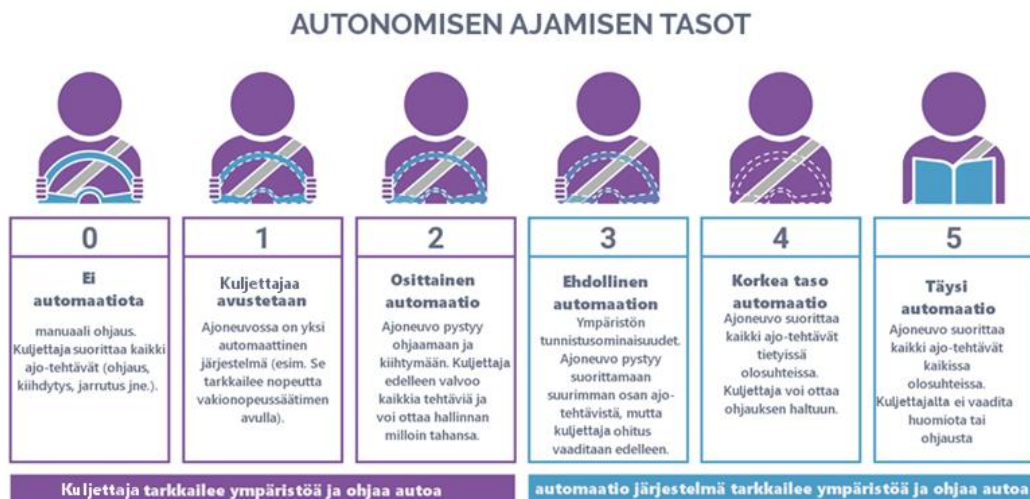
## 5.2 MEMS ja automaattinen autojärjestelmä

Autoilla on automaatiotasoja, jossa taso määrittää koneen ja ihmisen osallistumisasteen. Tasoissa 0,1 ja 2 automaatiojärjestelmä avustaa kuljettajaa, mutta ei missään vaiheessa ohjaa autoa. Esimerkki tasosta 1 on ESC, jossa MEMS-kiihdytys- ja kulmanopeusantureita käytetään keinona estää onnettomuuksia. Taso 2 on ADAS eli kehittynyt kuljettajan avustusjärjestelmä. ADAS hyödyntää useita antureita ja laitteita kuljettajan avustamista varten. (Synopsis, n.d.). Kaikki ADAS-sovellukset näkyvät kuvasta 18.



KUVA 18 ADAS-sovellukset (Synopsis n.d.)

Tasoissa 3, 4 ja 5 automaatiojärjestelmä ohjaa autoa. Kuvassa 19 kerrotaan tarkemmin kunkin tason kuvaus. Tason 3 Automaatioteknologian hyväksyminen on hankalaa lakisyistä, koska tason 2 ja tason 3 välissä on suuri teknologiahyppy. (Thomson & Granath, 2020)



KUVA 19 Autonomisen ajamisen tasot (Synopsis n.d.)

## 6 POHDINTA

Opinnäytetyössä käytiin läpi, miten MEMS-antureilla on laaja soveltamisala etenkin autoteollisuudessa ajonvakaussjärjestelmät ja lääketieteellisuudessa kuulolaite ja sydänterveyslaitteet. MEMS-anturit, kuten kiihtyvyyssanturi ja gyroskooppi, toimivat hyödyntämällä joustavia ja kiinteitä levyjä. Hyödyntämällä fotomaskeja ja fotoresistiivisiä materiaalia voidaan kaivertaa monimutkaisia kuvioita piikiekkoihin ja luoda älykkäitä mikropiirijärjestelmiä. Kun valitaan etsausprosessi, tulee harkita märkä- ja kuivaetsauksen erot. Kuivaetsaus on tarkempi etsaus mutta märkäetsaus edullisempi. MEMS-antureilla on muita käyttökohteita, joita ei katsottu tarkemmin opinnäytetyössä, kuten videopelit ja älypuhelimet.

Väestön kasvaessa täytyy jatkuvasti suunnitella laitteita ja työkaluja, jotka vievät mahdollisimman vähän tilaa. Kuten ennen vanhaan ensimmäinen tietokone ENIAC painoi 50 tonnia ja vei 167 kuutiometriä tilaa (CHM, n.d.), niin tulee myös anturiteknologian koko ja massa pienenemään tulevaisuudessa. Seuraava looginen vaihe MEMS-antureille on NEMS eli nanometrinen kokoiset anturit. Tällä hetkellä NEMS-antureilla ei ole vielä kysyntää ja on muita tärkeimpiä haasteita ja ongelmia, jotka vaativat huomiota, kuten itsensä varaavat MEMS-akut ja muiden materiaalien tutkinta ja käyttö. MEMS-teknologia on jatkuvasti laajentumassa. Uusia ympäristöystävällisiä materiaaleja luodaan MEMS-antureita varten.

## LÄHTEET

Abidin, H-Z, Hamzah, A-A, Yunas, J, Mohamed, M-A, Majlis, B-Y, 2.11.2016, Interdigitated MEMS Supercapacitor for Powering Heart Pacemaker, Supercapacitor Design and Applications, Luettu 7.7.2020

<https://www.intechopen.com/books/supercapacitor-design-and-applications/interdigitated-mems-supercapacitor-for-powering-heart-pacemaker>

Butler, E & F, C & Cohen, A & Vasilyev, N & Chen, R & del Nido, P & Dupont, Pi. (2011). Metal MEMS Tools for Beating-heart Tissue Approximation. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1.5.2011 Luettu 15.5.2020

[https://www.researchgate.net/figure/Metal-MEMS-fabrication-process-The-formation-of-each-layer-involves-three-steps-a\\_fig3\\_221732940](https://www.researchgate.net/figure/Metal-MEMS-fabrication-process-The-formation-of-each-layer-involves-three-steps-a_fig3_221732940)

CHM, ENIAC, n.d. Luettu 8.8.2020

<https://www.computerhistory.org/revolution/birth-of-the-computer/4/78>

EAI, MEMS Gyroscopic Devices, n.d. Luettu 18.7.2020

<https://www.experimentalaircraft.info/articles/mems-gyroscopic-principles.php#:~:text=%F0%9F%91%8D-.MEMS%20Gyroscopic%20Devices,important%20properties%3A%20rigidity%20and%20precession.>

Eeherald, MEMS in Healthcare, 01.02.2017, Luettu 14.7.2020

[http://www.eeherald.com/section/design-guide/mems\\_medical.html](http://www.eeherald.com/section/design-guide/mems_medical.html)

ETHW, MEMS 12.4.2017, Luettu 5.5.2020

<https://ethw.org/MEMS#:~:text=In%201982%2C%20automotive%20air-bag%20systems,integrated%20on%20the%20same%20chip.>

Flight Mechanic, Common Gyroscopic Instruments (Part One), n.d.

Luettu 18.7.2020

<https://www.flight-mechanic.com/common-gyroscopic-instruments-part-one/>

Jove, Microfabrication via Photolithography, n.d. Luettu 16.5.2020

<https://www.jove.com/v/5789/microfabrication-via-photolithography>

MEMSnet, What is MEMS Technology?, n.d. Luettu 3.5.2020

<https://www.memsnet.org/about/what-is.html>

MNX, Etching Processes, n.d. Luettu 27.6.2020

<https://www.mems-exchange.net/MEMS/processes/etch.html>

Murata, Structural Health Monitoring with MEMS, 1.11.2018, Luettu 14.7.2020

[https://www.murata.com/-/media/webrenewal/products/sensor/pdf/flyer/appslite-structural\\_health\\_monitoring.ashx?la=en#:~:text=MEMS%20sensors%20of-fer%20reasonably%20priced,minor%20changes%20in%20structural%20health.](https://www.murata.com/-/media/webrenewal/products/sensor/pdf/flyer/appslite-structural_health_monitoring.ashx?la=en#:~:text=MEMS%20sensors%20of-fer%20reasonably%20priced,minor%20changes%20in%20structural%20health.)

Nedelkovski, D, MEMS Accelerometer Gyroscope Magnetometer & Arduino, 18.11.2015, Luettu 8.7.2020

<https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/mems-accelerometer-gyroscope-magnetometer-arduino/>

Pelé, A-F, MEMS' Future is Made in Paper, 10.30.2019, Luettu 16.5.2020

<https://www.eetimes.com/mems-future-is-made-in-paper/>

Project happening, What are semiconductors? Part 2, 25.01.2020 Luettu 27.6.2020

<http://projecthappening.com/what-are-semiconductors-part-2/>

Synopsys, The 6 Levels of Vehicle Autonomy Explained, n.d. Luettu 1.8.2020

<https://www.synopsys.com/automotive/autonomous-driving-levels.html>

Synopsys, What is ADAS?, n.d. Luettu 3.4.2020

<https://www.synopsys.com/automotive/what-is-adas.html>

Terveyskirjasto, Silmänpainetauti (glaukooma), 27.2.2018 Luettu 21.9.2020

[https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p\\_artikkeli=dlk00452](https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk00452)

The ST blog, MEMS Sensors are coming to Industrial Applications, 8.11.2018 Luettu 7.5.2020

<https://blog.st.com/mems-sensors-are-coming-to-industrial-applications/>

Thomson, J, Granath, E, 09.03.2020, Luettu 2.8.2020

[https://www.intelligent-mobility-xperience.com/the-5-levels-of-autonomous-driving-explained-a-912861/?cmp=go-aw-art-trf-IMX\\_DSA-20200217&qclid=Cj0KCCQjwsuP5BRCoARIsAPtX\\_wFyz82XzXbwgNzVxJcqUt6ZLM\\_aci4DGjidMhrzGDJvGG824LnRN-jgaAgR\\_EALw\\_wcB](https://www.intelligent-mobility-xperience.com/the-5-levels-of-autonomous-driving-explained-a-912861/?cmp=go-aw-art-trf-IMX_DSA-20200217&qclid=Cj0KCCQjwsuP5BRCoARIsAPtX_wFyz82XzXbwgNzVxJcqUt6ZLM_aci4DGjidMhrzGDJvGG824LnRN-jgaAgR_EALw_wcB)

Toppan, Photomasks, n.d. Luettu 3.4.2020

[https://www.toppan.co.jp/electronics/english/semicon/photo\\_mask/](https://www.toppan.co.jp/electronics/english/semicon/photo_mask/)

Utdallas, Reactive Ion Etching Tool and Wafer Etching, n.d. Luettu 25.6.2020

<https://research.utdallas.edu/cleanroom/manuals/reactive-ion-etching-tool-and-wafer-etching>

Winn, A, Wet Etching Vs Dry Etching Processes for Current and Next-Generation MEMS Devices, 4.6.2015, Luettu 26.6.2020

<https://memsstar.com/wet-etching-vs-dry-etching/>