



Antti Portaankorva

# **AMPEROMETRISEN BIOSENSORIMITTAUSLAITTEEN MITTA- USTARKKUUDEN ANALYSOINTI**

# **AMPEROMETRISEN BIOSENSORIMITTAUSLAITTEEN MITTA- USTARKKUUDEN ANALYSOINTI**

Antti Portaankorva  
Opinnäytetyö  
Kevät 2014  
Hyvinvointiteknologian koulutusohjelma  
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu  
Hyvinvointiteknologian koulutusohjelma

---

Tekijä(t): Antti Portaankorva

Opinnäytetyön nimi: Amperometrisen biosensorimittauslaitteen mittaustarkkuuden analysointi

Työn ohjaaja(t): Jukka Jauhiainen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi:

Sivumäärä: 50 + 7 liitettä

Kevät 2014

---

Opinnäytetyön aiheena oli biosensorimittauslaitteen Sara-prototyypin teknisten tietojen dokumentointi ja mittaustulosten analysointi. Tavoitteena oli saada prototyypin mittauksista selville mittaustarkkuus ja verrata sitä kaupalliseen biosensorimittauslaitteeseen. Lisäksi selvitettiin prototyypin mittauksiin vaikuttavia häiriölähteitä.

Sara-prototyyppi kehitettiin ja testattiin HYTKE:n (hyvinvointiteknologian tutkimus- ja tuotekehityskeskus) sekä PrinLabin (painettavien anturien kehityslaboratorio) tiloissa. Kaupallisena referenssimittauslaitteena käytettiin PrinLabin omistamaa Palmsense-mittauslaitetta.

Prototyypin toiminnan ydin perustui potentiostaattiin, jonka avulla saatiin pidettyä jännite tasaisena biosensorin pinnalla. Amperometrinen mittaustekniikka mahdollisti hyvän ajallisen resoluution. Mitattavana nesteinä käytetty kaliumferrosyanidi reagoi hyvin PrinLabista saatujen painettujen biosensoreiden kanssa. Sara-prototyypin mittaustarkkuus laskettiin keskiarvo- ja keskihajontalaskuja hyödyntäen. Mittaustarkkuudeksi saatiin noin  $\pm 0,25$  mmol:n erottelukyky. Referenssimittauslaitteen tuloksia vertailtiin prototyypin tuloksiin, jolloin selvisi prototyypin hyvä lineaarisuus mittaustuloksien konsentraatioiden välillä. Prototyyppi soveltui paremmin isojen konsentraatioiden mittaukseen kuin Palmsense-mittauslaite.

Mittaustuloksien avulla voidaan löytää prototyypin ominaisuuksien rajoissa souvia sovelluksia ja tulevaisuuden kehitysmahdollisuuksia.

---

Asiasanat: biosensori, amperometria, mittauslaite, potentiostaatti

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Biomedical Engineering

---

Author(s): Antti Portaankorva

Title of thesis: Analysing the measurement accuracy of amperometric biosensor instrument

Supervisor(s): Jukka Jauhiainen

Term and year when the thesis was submitted: Pages: 50 + 7 appendices

Spring 2014

---

The goal of my thesis was to find out how well a biosensor instrument prototype worked. By analysing measurements of the prototype, we found out the exact measurement accuracy and ways to improve it.

For my thesis, we researched information about biosensors, potentiostats and amperometric detection. The core function of the biosensor instrument was the potentiostat, which keeps potential on the surface of the biosensor steady. Single-potential amperometry provides a good measurement resolution and comparison between results.

Results from the prototype were compared to results of the reference biosensor instrument. Measurement results from the prototype were analysed by standard deviation and average calculations. Calculations were defined as the measurement accuracy of the prototype.

The results present information about what kind of applications are suitable for the prototype in terms of accuracy and features. The research data and results of this thesis can be used for further development of the prototype.

---

Keywords: biosensor, amperometry, instrument, potentiostat

## ALKULAUSE

Haluan kiittää työni tilaajaa Manne Hannulaa, joka mahdollisti opinnäytetyöni teon HYTKEn (hyvinvointiteknologian tutkimus- ja tuotekehityskeskus) tiloissa. Iso kiitos yliopettaja Jukka Jauhiaiselle opinnäytetyöni ohjauksesta. Hänen avulleen työn aihe saatiin hiottua järkevään muotoon. Kielenohjaaja Tuula Hopeavuoren ansiosta opinnäytetyöni rakenne ja kielioppi ovat hyvässä kunnossa.

Lisäksi haluaisin kiittää PrinLabin väkeä, jotka ovat olleet yhteistyössä opinnäytetyön tekemisessä ja prototyyppilaitteen kehittämisessä.

Erityiskiitokset haluan osoittaa Jaakko Korvalle ja Nuutti Santaniemelle, jotka ovat olleet projektissa mukana. Ilman heidän työpanostaan Sara-prototyypin toiminta olisi tuskin onnistunut halutulla tavalla.

Oulussa 6.2.2014

Antti Portaankorva

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
KÄSITTEET	8
1 JOHDANTO	12
2 BIOSENSORIT	13
2.1 Tutkimustuloksia	13
2.2 Biosensorisovellukset	14
2.3 Biosensoreiden vahvuudet	15
2.4 Biosensoreiden heikkoudet	15
3 TEORIA	16
3.1 Elektrodipotentiaali	16
3.2 Amperogrammi	17
3.3 Steady state -tila	18
3.4 Hapettumis- ja pelkistymisreaktiot	19
4 MITTAUSLAITTEISTO	21
4.1 Piirikaavio	21
4.2 Arduino	22
4.2.1 Liitännät	22
4.2.2 Arduino Mega 2560:n tekniset ominaisuudet	23
4.3 A/D-muunnin	24
4.3.1 A/D-muuntimen toiminta	24
4.3.2 LTC2471 16-bittinen A/D-muunnin	25
4.3.3 LTC2471 tekniset ominaisuudet	26
4.4 Potentiostaatti	26
4.4.1 LMP91000-potentiostaatti	26
4.4.2 LMP91000:n tekniset ominaisuudet	27
4.5 Sensori	28
4.6 Sara-prototyyppi	29
4.7 Tekniset rajoitteet	30

5 MITTAUKSET	31
5.1 Mittausjärjestelyt	31
5.2 Mitattava neste	32
5.3 Referenssimittaus	32
5.4 Palmsense-mittauslaite	32
5.5 Häiriötekijät	33
6 TULOKSET	34
6.1 Sara-prototyypimittauksien analysointi	35
6.2 Referenssimittauksien analysointi	39
7 POHDINTA	43
8 YHTEENVETO	44
LÄHTEET	45
LIITTEET	50

## KÄSITTEET

A/D-muunnin	Mikropiiri, joka muuttaa analogisen signaalin digitaalseksi. Prototyypissä käytettiin 16-bittistä A/D-muunninta LTC2471.
Amperogrammi	Amperometristä mittaustulosta kuvaava diagrammi, jossa virta ampeereina on y-akselilla ja aika sekunteina x-akselilla.
Amperometrinen mittaus	Amperometrisessä mittauksessa tarkastellaan mittauslaitteelta saatavaa virtaa ajan suhteen. Mittauksessa pidetään työelektroodin ja vertailuelektroodin välistä potentiaalia vakiona, ja saadussa reaktiossa virta kulkee vastaelektroodin kautta. Amperometrinen mittaustulos kuvataan amperogrammissa.
Arduino	Mikrokontrolleri-elektroniikka-alusta ja ohjelmointiympäristö, joka perustuu avoimeen lähdekoodiin ja laitteistoon.
Biosensori	Biosensorit ovat antureita, jotka havaitsevat biologisen aineen, joka hapettumis- ja pelkistymisreaktioiden vaikutuksesta synnyttää sähkövirtaa, mikä luetaan mittauslaitteen avulla.
C++	Yleisesti käytetty ohjelmointikieli, jota käytetään sekä matalan tason ohjelmoinnissa sekä monimutkaisten ohjelmistojen tekemisessä.
EEPROM	Haihtumaton puolijohdemuisti, jota käytetään yleensä mikrokontrollereiden asetus-



	tietojen tallentamiseen. Arduinossa siihen tallennetut tiedot pysyvät muistissa, vaikka laite on sammutettu.
Elektrodipotentiaali	Työelektrodin, vastaelektrodin ja vertailuelektrodin välillä syntyvä sähkömotorinen voima.
Flash-muisti	EEPROM-muistin tavoin Flash-muisti on haihtumaton. Flash-muisti on nopea muistipiiri, joten se soveltuu kirjoittamiseen ja lukemiseen hyvin.
Hapettumisreaktio	Kemiallinen reaktio, jossa luovutetaan elektroneita pelkistyvälle aineelle, jolloin aineen hapettumisluku kasvaa.
Hiilinanoputki	Hiiliatomeista muodostunut sähköä johtava molekyyli.
Ioni	Hapettumis- ja pelkistymisreaktiossa vapautuu ioneita, joiden vaikutuksesta syntyy sähkövirtaa. Anioni on negatiivisesti varautunut ja kationi on positiivisesti varautunut ioni.
I <sup>2</sup> C-väylä	Kaksisuuntainen ohjaus-tiedonsiirtoväylä. Arduinon I <sup>2</sup> C-väylän kautta voidaan ajaa rekistereiden sisältö erillisille mikrokontrollereille käyttäen niitä yksilöiviä osoitteita
Kellotaajuus	Kertoo, kuinka monta tilanvaihdosta tapahtuu suorittimessa sekunnin aikana. Taajuus ilmoitetaan hertseinä.
Mooli	SI-järjestelmän mukainen mittayksikkö, joka kertoo tietyn aineen pitoisuuden.

Pelkistymisreaktio	Kemiallinen reaktio, jossa vastaanotetaan elektroneita hapettavalta aineelta, jolloin hapetusluku pienenee.
Potentiostaatti	Pitää jännitettä vakiona biosensorin työelektrodin ja vertailuelektrodin välillä. Potentiostaatilla voidaan vahvistaa biosensorin pinnalla tapahtuvaa hapettumis- ja pelkistymisreaktiota.
Pulssinleveysmodulaatio	Modulointitapa, jossa sähköistä kuormaa säädetään pulssisuhteen ON- ja OFF-tilojen avulla. Mitä pidempään pulssisuhteen ON-tilaa pitää päällä sitä isompi on kuormalle tuleva teho.
Serial-monitori	Serial-monitorin avulla luetaan prototyypiltä USB-sarjaväylän kautta tuleva data, joka voidaan myöhemmin tallentaa tiedostoon. Serial-monitori on Arduino-ohjelmistoon kuuluva osa.
SRAM	Staattinen muisti, joka vaatii jatkuvan virkistysjännitteen. Toimii välimuistina ja on yleensä erittäin nopea muisti.
Steady state -tila	Tila, jossa amperometrisen mittauksen aikana virta tasoittuu. Steady state -tilasta otetaan yleensä 5 sekunnin ajalta keskiarvo, josta lasketaan mitattavan nesteen pitoisuus.
Työelektrodi	Työelektrodilla tapahtuu mittaustilanteen aikana reaktio, kun sillä pidetään potentiaali vakiona vertailuelektrodin suhteen. Työelektrodi myös välittää reaktiossa ta-

pahtuvan ioneista syntyvän virran vastaelektrodille.

USB-sarjaväylä

Yleinen sarjaväyläarkkitehtuuri, jonka avulla voidaan liittää laitteita tietokoneeseen sekä kaksisuuntaisesti välittää dataa.

Vastaelektrodi

Vastaelektrodin kautta kulkee elektrodipotentiaalissa saatu virta.

Vertailuelektrodi

Vertailuelektrodi toimii vasteena työelektrodille, kun niiden välillä on potentiaali ja sähkökemiallinen reaktio. Sensorissa käytettiin hopea-hopeakloridipinnoitetta.

# 1 JOHDANTO

Nykyään on tärkeä saada reaaliaikaista tietoa ihmisen terveydentilasta. Terveystilan nopea tulkitseminen tarvitsee uudenlaisia diagnostiikkavälineitä, joissa biosensorit ovat osoittautuneet tehokkaiksi. Biosensoreista on kaavailtu ratkaisua moneen eri pulmaan, sillä sen käyttö on mahdollista lääketieteeseen, teollisuuden, tutkimuksen ja monen muun eri alan sovelluksissa. Biosensorien mittaustarkkuuskohteet vaativat tarkkoja mittaustaitteita, joiden avulla voidaan saada luotettavia tuloksia nopeasti.

Tämä opinnäytetyö kuuluu Oulun seudun ammattikorkeakoulun Hyvinvointiteknologian tutkimus ja tuotekehitysyksikön alaiseen projektiin, jossa oli tarkoitus rakentaa biosensorimittauslaite nimeltään Sara-prototyyppi. Työssäni dokumentoitiin Sara-prototyypin kaikki tekniset tiedot ja ominaisuudet sekä selvitettiin sen mittaustarkkuus. Mittauslaitetta oli mahdollista käyttää erilaisten biosensoriliuskojen sekä mitattavien näytteiden analysointia varten, joten suuri mittaustarkkuus oli prioriteetti.

Työssäni selvitettiin referenssimittauslaitteen avulla mittaustarkkuus. Referenssimittauslaitteena käytettiin kaupallista Palmsense-mittauslaitetta. Mittauksen virhelähteet olivat mittaustarkkuuden kannalta tärkeä selvityksen aihe.

## 2 BIOSENSORIT

### 2.1 Tutkimustuloksia

Amperometrisiä biosensorimittauksia on tehty ympäri maailmaa ja niistä löytyy paljon tutkimustietoa (1). Tutkimustuloksia hyödynnettiin Sara-prototyypin suunnittelussa.

Biosensoreista on kehitetty hemoglobiinin mittausta varten optinen sensori, jolla pystyy mittaamaan nopeasti hemoglobiinin verestä. Tämä sovellus käyttää valon heijastuksista tulevaa signaalia hemoglobiinin määrittelyä varten. Mittauksissa käytettiin amperometristä mittaustekniikkaa sekä mitattavana nesteenä kaliumferrosyanidia. Mittaus toimii lineaarisesti huoneenlämpötilassa, jolloin mittausaika on noin 60 sekuntia. (2, s. 1008–1011.)

Glukoosin eli verensokerin mittausta on tutkittu paljon ja siihen on tehty useita kaupallisia sovelluksia (3). Verensokeria mittaavalla kultapinnoitteisella ja nanoteknologiaa sisältävällä sensorilla yritetään parantaa mittaustarkkuutta. Kulta on sensorin pinnalla 3D-nanotekniikan avulla. Kullan avulla tehostetaan vertailuelektrodin toimivuutta. Sensori on tehty painettavalla tekniikalla ja toimii myös kaliumferrosyanidiliuoksella. Sensorin lineaarinen toimintaväli on 0,27–5,6 millimoolia. Vasteaika mittauksessa on vain 2 sekuntia. (4, s. 1–3.)

Biosensoreilla on tutkittu myös kolesterolia (5, s. 138). Kolesterolia voidaan mitata, kun tiedetään sen standardipotentiaali, joka on  $-0,4$  volttia. Biosensorina käytettiin monikerroksista nanoputkisensoria. Kolesterolimäärän mittaamisessa käytettiin amperometristä mittausta. Kolesterolia pystyttiin mittaamaan, koska biosensoreilla oli hyvä sähkökemiallinen toiminta ja tasaisuus. Kolesterolin mitaus perustuu hapettumis- ja pelkistymisreaktioihin ja nanoputkisensorit parantavat kolesterolioksidaasin (ChOx) elektronien suoraa liikettä. (5, s. 138–140.)

Nämä edellä mainitut tutkimukset antavat kuvaa millaisia mittauksia biosensoreilla on mahdollista tehdä. Sara-prototyypistä pyrittiin tekemään mahdollisimman monikäyttöinen, sillä tarkkaa mittauskohdetta tai sovellusta ei ollut määritelty.

## 2.2 Biosensorisovellukset

Biosensorien käyttökohteet ovat laajat, ja uusia käyttösovelluksia syntyy jatkuvasti lisää. Biosensorit ovat tehokkaita antureita ja niitä on mahdollista valmistaa eri käyttötarkoituksiin. Biosensoreilla on lääketieteen lisäksi muitakin sovel-lusalueita. (3.)

Ympäristötieteessä käytetään biosensorisovelluksia erilaisten mittauksien tekemiseen. Biosensoreilla pystyy mittaamaan vedenlaatua nopeammin kuin laboratorioissa (6). Ilmanlaadun seurannassa käytetään myös biosensorisovel-luksia, sillä biosensorit pystyvät reaaliaikaiseen ilmansaasteiden kartoitukseen (3). Maataloudessa biosensoreilla on käyttökohteita maaperän pitoisuuksien mittauksen kannalta. Maaperästä voidaan mitata lannoitemääriä sekä happa-muuksia biosensoreiden avulla, mikä helpottaa maanviljelijöiden lannoitemää-rän arvioimista. (3.) Kaivosteollisuuden kannalta biosensorit tuovat uusia keino- ja mineraalien tunnistamiseen (7, s. 116). Uusiutuvien polttoaineiden kartoitus käyttää biosensoreita sellaisten entsyymien löytämiseen, joita tarvitaan bio-etanolin tuotantoa varten. (8.)

Elintarviketeollisuudessa biosensoreita käytetään ruuan laadunvalvonnassa. (6.) Ruuasta voidaan biosensorin avulla löytää ihmiselle haitallisia aineita, kuten hormoneita, myrkyjä sekä huumeita. (9.) Haitallisten aineiden tutkimisen lisäksi biosensoreilla pystyy selvittämään ihmiselle terveellisten aineiden määrä ruuas-sa, näitä ovat mm. antioksidantit, hyvät bakteerit ja proteiinien koostumus. (10.)

Sotilas- ja viranomaissovelluksissa käytetään biosensoreita huumeiden ja räjäh-teiden tunnistamiseen. Markkinoilla on sovelluksia, joilla pystytään tunnistamaan räjähteitä ja huumeita biosensoreiden avulla. Näitä sovelluksia käytetään rajatarkastusasemilla sekä lentokentillä. (11.)

Biosensorit ovat mukana nanoteknologian kehityksessä. On kehitetty hii-linanoputkista valmistettuja sensoreita, jotka soveltuvat entistä tarkempiin ja pienempien pitoisuuksien mittaamiseen. (7, s. 116.)

### **2.3 Biosensoreiden vahvuudet**

Biosensoreilla on monien käyttökohteiden lisäksi etuja verrattuna laboratoriomittauksiin. Biosensoreiden mittaussnopeus on yleensä nopea, jolloin saadaan reaaliaikaista dataa mitattavasta kohteesta. Biosensoreita pystyy valmistamaan erikokoisia, joten niiden kannettavuus on hyvä. Biosensoreja voidaan valmistaa myös suuria määriä kerrallaan, jolloin niiden kappalehinta alenee. Sensoreita voidaan valmistaa tarkalleen määritetyille käyttökohteille, jonka vuoksi biosensoreilla on laajat käyttömahdollisuudet. (3.)

### **2.4 Biosensoreiden heikkoudet**

Biosensoreita ei voida höyrysterilisoida autoklaavissa, sillä sensorin materiaali menettää biologisen toimintakyvyn eli denaturoituu (7, s. 116). Autoklaavia käytetään, kun halutaan sterilisoida mittaussvälineet uutta mittausta varten (12).

Biosensorissa olevan biologisen aineen tasapainoinen toiminta riippuu sen luonnollisista ominaisuuksista, joten esimerkiksi lämpötila ja happamuus vaikuttavat mittaustuloksiin (7, s. 116). Biosensoreilla mitattaessa tulee ottaa huomioon eri biologisten aineiden vaikutus keskenään, sillä jotkin aineet neutralisoivat toisia aineita (7, s. 116).

## 3 TEORIA

### 3.1 Elektrodipotentiaali

Prototyypin amperometrinen mittaus perustui single potential amperometry-mittaustekniikkaan, jossa biosensorin työelektroodin ja vertailuelektroodin välillä jännite pidettiin vakiona. Jännitettä pidettiin vakiona potentiostaattimikropiirin avulla. Mittauksen aikana saatu virta mitattiin työelektroodin ja vastaelektroodin väliltä, sillä virta ei saa kulkea vertailuelektroodin lävitse. (13.)

Amperometrisessä mittauksessa syntyy sähkökemiallisessa kennossa muodostuva sähkömotorinen voima nimeltään elektrodipotentiaali. Elektrolyyttiliuoksen ja elektrodin välistä jännitettä on mahdoton mitata ilman toista elektrodia, joten toinen vertailuelektrodi mittaa elektrolyyttiliuoksen ja ensimmäisen elektrodin välisen potentiaalin. (14.) Vertailuelektrodina käytetään yleensä standardielektrodia, jonka elektrodipotentiaali tiedetään ennalta (15). Nernstin yhtälön avulla voidaan myös laskea standardiolosuhteesta poikkeavan standardielektroodin potentiaalin. Kaavassa 1 näkyy Nernstin yhtälö.

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{zF} \ln \frac{a_{Re}}{a_{Ox^{+}}} \quad \text{KAAVA 1}$$

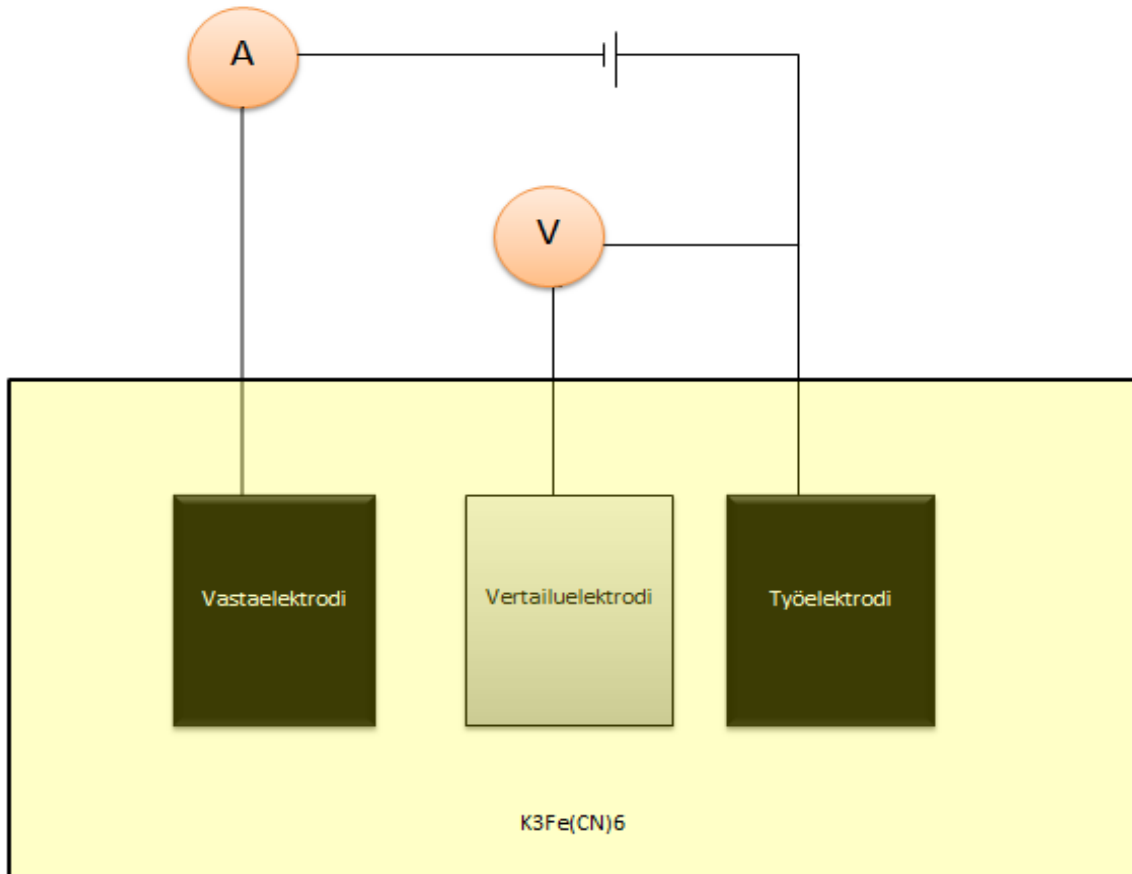
Nernstin yhtälössä  $E^{\circ}$  tarkoittaa standardipotentiaalia,  $T$  lämpötila kelvineinä,  $R$  on kaasuvakio ja  $z$  alkuaineen sidosten atomimäärää.  $a_{Re}$  ja  $a_{Ox^{+}}$  ovat pelkistyneen ja hapettuneen muodon kemiallista aktiivisuutta. Lyhenne Re tulee englannin kielestä reduced, joka tarkoittaa pelkistynyttä ja Ox on lyhenne sanasta oxidized, joka tarkoittaa hapettunutta. (16.)

Prototyypissä sähkömotorinen voima tapahtui biosensorin elektrodien välillä, sillä vertailuelektrodi mittasi työelektroodin ja nesteen välillä olevaa potentiaaliero eli jännitettä. Vastaelektrodia käytettiin virran lukemiseen, kun pelkistymis- ja hapettumisreaktiossa alkoi syntyä sähkövirtaa.

Kuvassa 1 näkyy Sara-prototyypin elektrodipotentiaalin mittaamiseen käytetty kokoonpano. Vastaelektrodille menevä ympyrä, jossa on A tarkoittaa ampeeria, koska virta luetaan vastaelektrodilta. Vertailuelektroodin ja työelektroodin välillä



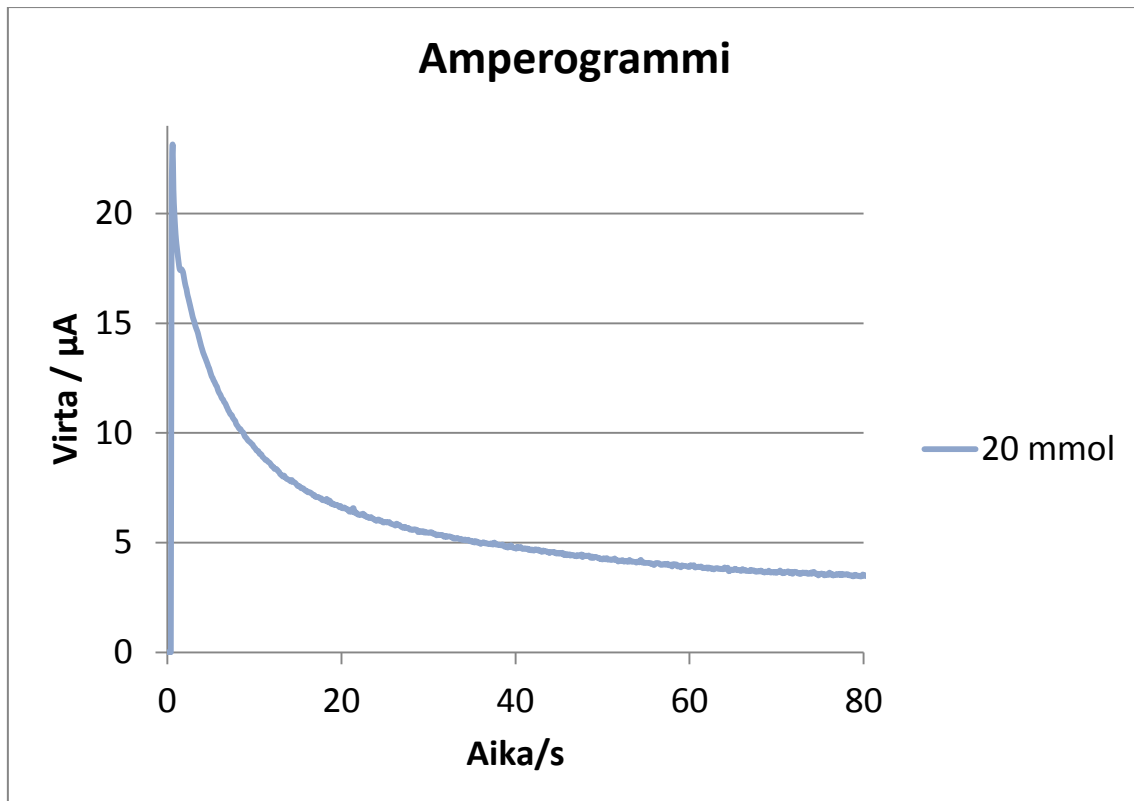
olevassa ympyrässä V tarkoittaa voltia, koska jännite luetaan näiden elektrodien väliltä. Elektrodien päällä oleva kellertävä suorakulmio kuvaa mitattavaa nestettä, joka on kaliumferrosyanidia ( $K_3Fe(CN)_6$ ). (7, s. 117–119.)



*KUVA 1. Elektrodipotentiaalin mittaaminen vastaelektrodin, vertailuelektrodin ja työelektrodin avulla*

### 3.2 Amperogrammi

Amperometrisestä mittauksesta tehdään yleensä amperogrammikuvaaja, jossa aika on sekunteina y-akselilla ja virta ampeereina x-akselilla. Kuvassa 2 näkyy, miten virta-arvo tasoittuu noin 60 sekunnin jälkeen. Amperogrammien avulla on helppo vertailla eri nesteiden konsentraatioita ja niistä saatuja jännitearvoja tietyllä ajan hetkellä.

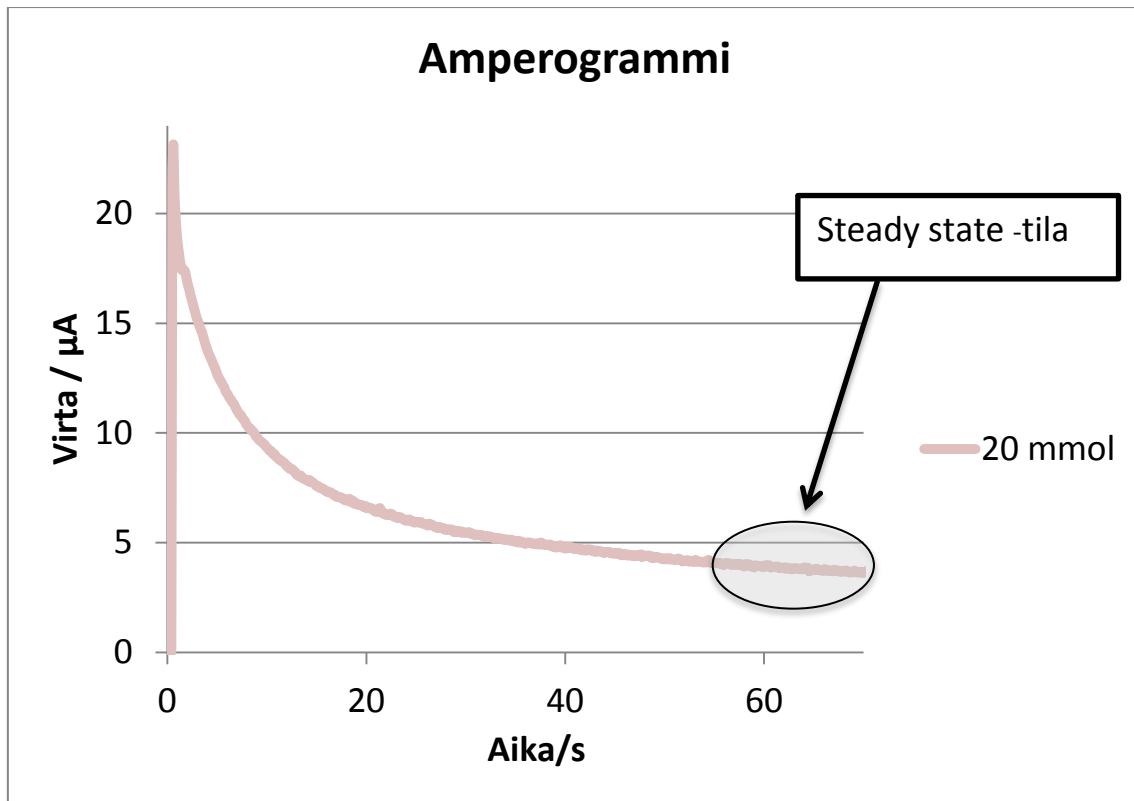


KUVA 2. Amperogrammikuvaaja 20 millimoolin mitattavalla nesteellä

### 3.3 Steady state -tila

Amperometrisissä mittauksissa odotetaan, että virta-arvo tasoittuu steady state -tilaan. Steady state -tilassa virta ei laske enää merkittävästi, jolloin otetaan virta-arvo muistiin vertailumittausta varten.

Kuvan 3 amperogrammikuvaajassa steady state -tila on noin 60 sekunnissa ja siitä voidaan ottaa keskiarvo väliltä 60–65 sekuntia. Keskiarvon laskeminen 5 sekunnin ajalta poistaa mittauksen aikana tulleita pieniä häiriöitä, joten mittaus-tulos on vertailukelpoisempi. (17.)

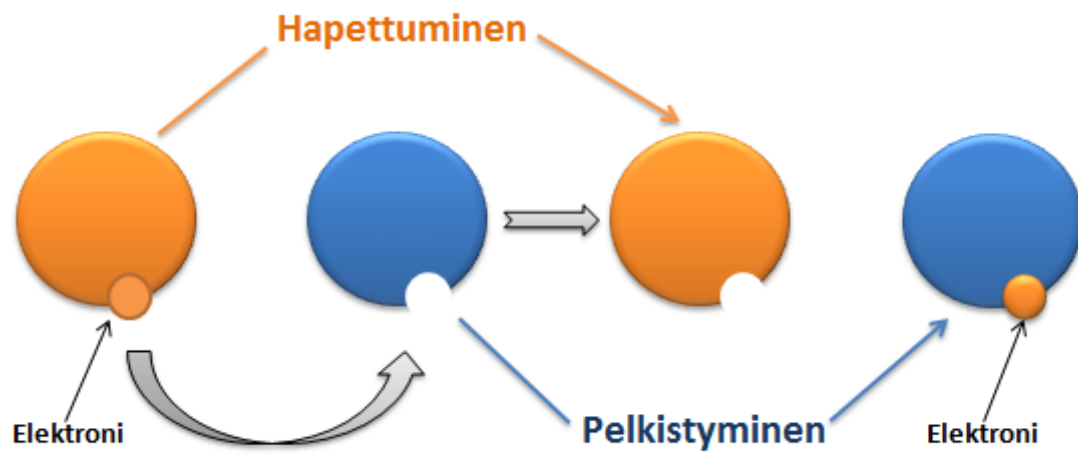


KUVA 3. Amperogrammikuvaajan steady state -tila

### 3.4 Hapettumis- ja pelkistymisreaktiot

Biosensorin toimintaperiaate perustuu hapettumis- ja pelkistymisreaktioihin. Sähkökemiallisen kennon muodostavat anodi- ja katodielektrodit. Anodi on positiivisesti varautunut elektrodi, jonka pinnalla tapahtuu hapettumisreaktio. Katodi on negatiivisesti varautunut elektrodi, jonka pinnalla tapahtuu pelkistymisreaktio. Hapettumis- ja pelkistymisreaktiossa vapautuu ioneita, joiden vaikutuksesta syntyy sähkövirtaa. (18.)

Hapettumis- ja pelkistymisreaktiota voidaan voimistaa ulkoisella jännitelähteellä, jolloin hapetus- ja pelkistymisreaktiot voimistuvat ja kiihtyvät. Ulkoinen virtalähde mahdollistaa tarkemman mittaustarkkuuden, kun halutaan erotella nesteiden konsentraatiot toisistaan. Kuvassa 4 on hapettumis- ja pelkistymisreaktion eroavaisuus. Hapettumisreaktiossa menetetään elektroneita, kun taas pelkistymisreaktiossa saadaan lisää elektroneita. (18.)

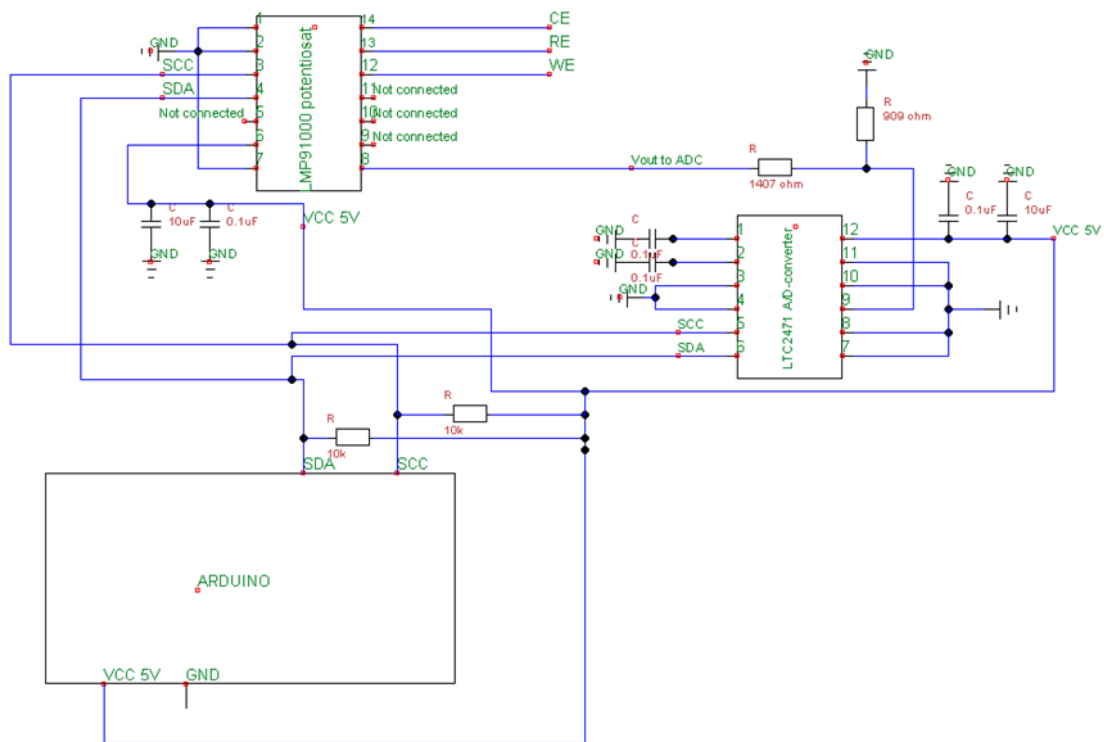


KUVA 4. Hapettumis- ja pelkistymisreaktio (19.)

## 4 MITTAUSLAITTEISTO

### 4.1 Piirikaavio

Sara-prototyypistä tehtiin piirikaavio, joka on kuvassa 5. Piirikaaviossa näkyy miten A/D-muuntaja, potentiostaatti ja Arduino ovat kytkettyinä keskenään.



KUVA 5. Sara-prototyypin piirikaavio

Kuvassa 5 näkyy potentiostaatin 8 pinnistä lähtevän johtimen välillä olevat vastukset. Vastuksien avulla tehtiin jännitteen jako, jotta potentiostaatilta tuleva jännite A/D-muuntajalle saataisiin 1,25 volttiin. Jännitteen saaminen 1,25 volttiin on tärkeää kytkennän kannalta, sillä A/D-muunnin saa tällöin käyttöönsä koko 16-bitin resoluution.

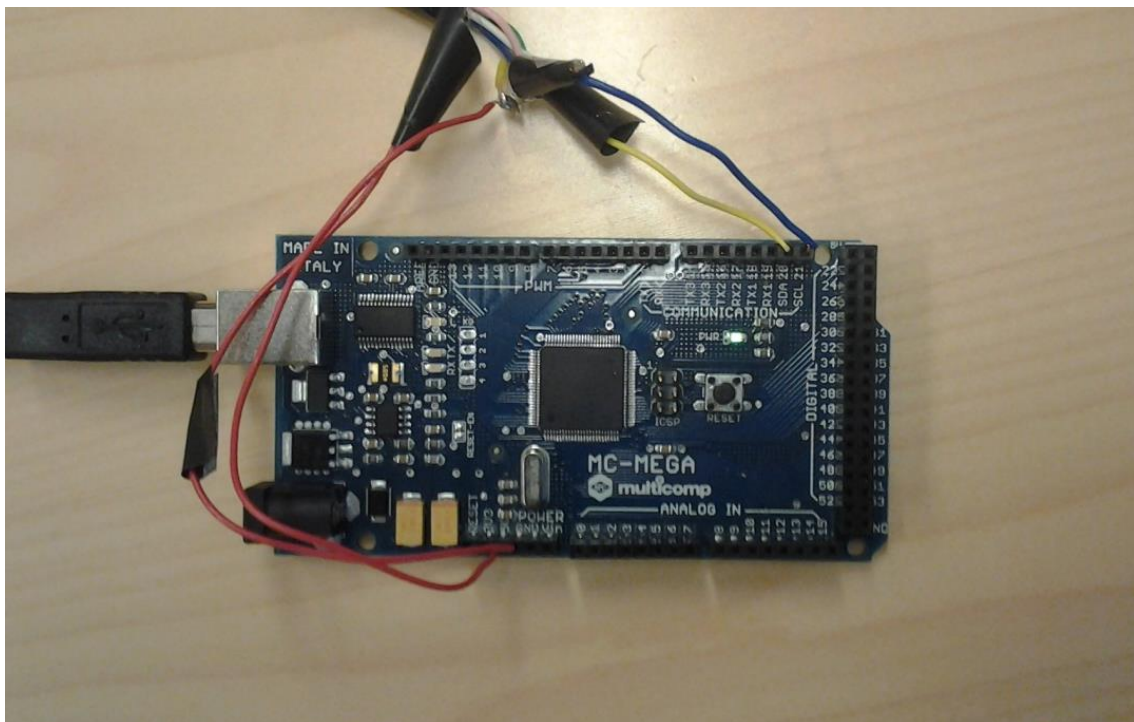
Potentiostaatin ja A/D-muuntimen jalkoihin kiinnitetyt 10  $\mu\text{F}$ :n ja 0,1  $\mu\text{F}$ :n kondensaattorit ovat häiriönpoistokondensaattoreita. Kuvassa 5 näkyvät maadoi-

tusmerkit menevät kaikki lopulta Arduinon maahan nimeltä GND. SDA- ja SCC-väylät ovat Arduinon I<sup>2</sup>C-väyliä.

Potentistaatilta tulevat pinnit 12–14 ovat sensorille menevien elektrodien pinnejä. CE tarkoittaa vastaelektrodia, RE vertailuelektrodia ja WE on työelektrodi. Pinnit on kytketty kiinnikkeeseen johon sensori laitetaan. (7, s. 118–119.)

## 4.2 Arduino

Sara-prototyypissä käytettiin mikrokontrolleri Arduino Mega 2560:tä rekistereiden ohjaamiseen ja dataan keräämiseen (20). Arduino Mega 2560 perustuu avoimeen lähdekoodiin ja laitteistoon. Arduino käyttää omaa C++-ohjelmointikieleen perustuvaa Arduino-ohjelmointikieltä. Kuvassa 6 on Arduino Mega 2560 ja siitä lähtevät liitännät A/D-muuntimeen sekä potentiostaattiin.



KUVA 6. Arduino Mega 2560

### 4.2.1 Liitännät

Arduino Mega 2560 sisältää useita digitaalisia liitäntöjä sekä analogisia sisääntuloja (input). Arduino Mega 2560:ssä on 54 digitaalista pinniä, joita voi käyttää joko sisääntulona (input) tai ulostulona (output). Digitaalisten pinnien toimintata-

van voi määrittää Arduino-koodin avulla. Digitaaliset pinnit käyttävät 5 voltin jännitettä ja kestävät maksimissaan 40 milliampeerin virran. Lisäksi ne sisältävät sisäisen vastuksen, joka vaihtelee 20–50 kilo-ohmin välillä. Prototyypissä käytetyt I<sup>2</sup>C-väylän pinnit SDA ja SCL ovat myös digitaalisia, ja niitä voidaan käyttää ulostuloina sekä sisääntuloina. SDA on kaksisuuntainen sarjamuotoinen dataväylä ja SCL on sarjamuotoinen kelloväylä. (21.) I<sup>2</sup>C-väylän pinnien kautta välitetään A/D-muuntimeen ja potentiostaattiin rekisteriarvot ja niitä käytetään myös raakadatan vastaanottoon A/D-muuntimelta. 15 digitaalista pinniä toimivat myös pulssinleveysmodulaation avulla. Pulssinleveysmodulaatiossa sähköistä kuormaa säädetään pulssisuhteen ON- ja OFF -tilojen avulla. Mitä pidempään pulssisuhteen ON -tilaa pitää päällä sitä isompi on kuormalle tuleva teho. Arduinon avulla voidaan säätää haluttu pulssisuhde modulointia varten. (22.)

Arduino Mega 2560:llä on 16 analogista input-pinniä. Ennen lopullisen prototyypin erillisen A/D-muuntimen asentamista käytettiin analogista sisääntulopinniä potentiostaatilta tulevan jännitteen lukemiseksi. Analogiset pinnit antavat vain 10-bitin resoluution eli 1024 eri arvoa, minkä takia Arduinon kautta luettu arvo oli resoluutioltaan liian heikko hyvää mittaustarkkuutta varten. Sara-prototyypin kytkennässä ei enää käytetä Arduinon analogisia pinnejä. (23.)

Sara-prototyypissä käytettiin Arduinon 5 voltin jännitelähdettä A/D-muuntimen ja potentiostaatin käyttöjännitteitä varten. Arduino sisältää lisäksi 3,3 voltin syöttöjännitelähteen. Prototyypin kokoonpanossa Arduino sai virtansa USB-väylän kautta, mutta se voi käyttää myös omaa erillistä tasavirtalähdettä 7–12 voltin jännitteellä. Arduinon VIN-pinnin kautta voidaan myös saada käyttöjännite. (24.) Arduinon pinnien kytkennät näkyvät tarkemmin luvun 4.1 kuvassa 5.

#### **4.2.2 Arduino Mega 2560:n tekniset ominaisuudet**

Arduino Mega 2560 käyttää Atmelin ATmega2560-mikrokontrolleria (24). ATmega2560 on korkean suorituskyvyn 8-bittinen mikrokontrolleri. Maksimikellotaajuus on 16 MHz ja se toimii 4,5–5,5 voltin jännitteellä. Mikrokontrolleri sisältää myös 10-bittisen A/D-muuntimen sekä muistiominaisuuksia. SRAM-välimuistia ATmega2560 sisältää 8 kilotavua (25). EEPROM-muistia mikrokont-

rolleri sisältää 4 kilotavua (26). Flash-muistia ATmega2560:ssä on 256 kilotavua (27).

Suurin osa Arduino Mega 2560:n ominaisuuksista perustuu ATmega2560- mikrokontrolleriin. Arduinon monien pinnien lisäksi siinä on USB-väylä, joka helpottaa sen kytkemistä tietokoneen kanssa, sillä Arduinon-koodit ajetaan tietokoneen USB-väylän kautta Arduinoon. (24.)

### **4.3 A/D-muunnin**

A/D-muuntimen tarkoitus on Sara-prototyypissä muuntaa potentiostaatilta tulevat jännitearvot digitaalisesti luettavaan binääriluku muotoon. A/D-muuntimen erottelukyky on tärkeää prototyypin kannalta, sillä Arduinon sisäisen 10-bittisen A/D-muuntimen resoluutio riittää vain 1024:n eri arvon erotteluun. Prototyyppiin liitettiin 16-bittinen LTC2471 A/D-muunnin, joka kommunikoi I<sup>2</sup>C-väylän kautta. (Liite 6.)

#### **4.3.1 A/D-muuntimen toiminta**

A/D-muuntimen toiminta voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen, jotka ovat suodatus, näytteistys, kvantisointi ja koodaus. A/D-muunnin suodattaa ensimmäisenä analogisen signaalin suurtaajuiset häiriöt pois. (28.)

Suodatettu signaali näytteistetään, jolloin signaalista otetaan tasaisin välein näytteitä. Näytteistyksessä tulee ottaa huomioon Nyquistin teoreema, jonka mukaan näytteitä tulee ottaa kaksinkertaisella taajuudella alkuperäisen signaalin taajuuteen verrattuna. Liian harvakseltaan otettu näytteistys johtaa signaalin laskostumiseen eli signaalin muoto vääristyy.

Näytteistetty signaali pitää seuraavaksi kvantisoida. Kvantisoinnissa signaalin arvot pyöristetään ennalta määriteltyyn lähimpään lukuarvoon. Esimerkiksi jännite 0,9 voltia voidaan pyöristää 1 volttiin. Prototyypissä käytetty 16-bittinen A/D-muunnin kvantisoi näytteet kokonaisluvuiksi, jolloin syntyy 65 536 eri lukuarvoa.

Kvantisoinnin jälkeen kokonaisluvut koodataan binääriluvuiksi. Koodaus suoritetaan, jotta datan siirto tai tallennus digitaalisena olisi mahdollista. Prototyypissä



koodauksen jälkeen data lähetetään A/D-muuntimen ulostulopinnistä Arduinon I<sup>2</sup>C-väylälle, josta se voidaan lukea PC-tiekoneella olevaan Serial-monitoriohjelmaan.

A/D-muuntimen muunnosvaiheet kadottavat aina informaatiota, joten tärkeää dataa saattaa kadota. Tarvittavan informaation saamiseksi on näytetaajuden oltava tarpeeksi tiheä sekä kvantisointitasojen määrä pitää olla riittävä hyvään tarkkuuteen. (28.)

#### **4.3.2 LTC2471 16-bittinen A/D-muunnin**

LTC2471 on tarkka 16-bittinen A/D-muunnin. Tämä A/D-muunnin valittiin prototyyppiin, koska se on I<sup>2</sup>C-väylälle yhteensopiva ja riittävän tarkka. Muunnin on kooltaan erittäin pieni, 3 mm x 3 mm, ja siinä on 12 pinniä sekä muovinen kotelokäyttö. 16-bittinen muunnin kasvatti resoluution 65 536 eri lukuarvoon Arduinon 10-bittisen A/D-muuntimen 1024 lukuarvosta. LTC2471 on tällöin 64 kertaa tarkempi kuin Arduinon alkuperäinen A/D-muunnin. (29, s. 1.)

LTC2471 A/D-muuntimen merkittävä ominaisuus on sisääntulon jännitteen vaihteluväli, sillä yli 1,25 voltin jännitteet näkyvät maksimina eli arvona 65 535. Alun perin potentiostaatilta tulevat jännitteet menivät reilusti yli 1,25 voltin, joten prototyyppiin tehtiin jännitteenjako potentiostaatin ulostulopinnin ja A/D-muuntimen sisääntulopinnin välille. Jännitteenjaon jälkeen A/D-muuntimelle tuli maksimissaan 1,25 voltin jännite, jonka ansiosta saimme A/D-muuntimen koko resoluution hyödynnettyä. (29, s. 9.)

LTC2471 käytti sisääntulopinnin lisäksi SCL- ja SDA-pinnejä sekä Vcc- jännitelähdettä. SCL- ja SDA-pinnit (4 ja 5) liitetään yhteen Arduino I<sup>2</sup>C-väylän pinnien kanssa. SCL eli sarjamuotoinen kelloväylä käyttää ulkoistaa kellopulssia. Arduino antaa ulkoiselle A/D-muuntimelle kellopulssin. SDA eli sarjamuotoinen dataväylä on kaksisuuntainen dataväylä, jonka avulla A/D-muunnin voi vastaanottaa ja lähettää tietoa Arduinolle. SDA-väylän kautta voidaan Arduino-koodin avulla lähettää rekisterit, jotka mahdollistavat datan luvun A/D-muuntimelta. A/D-muuntimelta tuleva data menee Arduinolle SDA-väylän kautta. Käyttöjännitepinni (12) saa jännitteen Arduinon 5 voltin jännitelähteestä.

Käyttöjännitepinnan rinnalle on myös kytketty 0,1  $\mu\text{F}$ :n ja 10  $\mu\text{F}$ :n kondensaattorit, jotka näkyvät luvun 4.1 piirikaavio kuvassa 5. (29, s. 6.)

### **4.3.3 LTC2471 tekniset ominaisuudet**

LTC2471 voi valita 208 hertsin tai 833 hertsin näytteen uloslähtötaajuuden. Vahvistusvirhe (Gain error) A/D-muuntimella on 0,01 prosenttia. Vahvistusvirhe kertoo kuinka hyvin muuntimelta ulostuleva data vastaa ideaalista dataa. Offsetvirhe (Offset error) on jännitteen nollatason virhe, jolloin esimerkiksi 0 voltia näkyy 0,1 voltina, mutta jatkuu lineaarisesti koko skaalassa. Tällä piirillä Offsetvirhe on 1 millivoltti. (30.) LTC2471:n syöttövirta on maksimissaan 5 milliampeeria ja nukkumavirta (Sleep current) maksimissaan 2 mikroampeeria. Muuntimen maksimisyöttöjännite on 5,5 voltia. A/D-muunnin sisältää sisäisen oskillaattorin, joten se ei tarvitse ulkoisia komponentteja toimiakseen. (29, s. 1.)

## **4.4 Potentiostaatti**

Potentiostaatti pitää prototyypin biosensorin pinnalla olevien työ- ja vertailuelektrodien välillä olevaa jännitettä tasaisena. Potentiostaatin jännitteen avulla voidaan vahvistaa biosensorilla tapahtuvaa sähkökemiallista reaktiota. Prototyypissä oleva potentiostaatti pystyy myös vastaanottamaan vastaelektrodit tulevan sähkövirran, jonka se muuttaa transimpedanssinvahvistimen avulla jännitteeksi, jolloin se voidaan lukea A/D-muuntimella. (31.) Potentiostaatin transimpedanssivahvistusta voidaan säätää rekistereiden avulla, joita ohjataan I<sup>2</sup>C-väylän kautta.

### **4.4.1 LMP91000-potentiostaatti**

Sara-prototyypissä käytettiin LMP91000-potentiostaattia, joka on matalan energian sähkökemiallisiin reaktioihin suunniteltu mikropiiri. Potentiostaatissa on 14 pinniä ja se on muovikoteloitu. (Liite 7.) Potentiostaatin suojarekisteri piti avata ensin, sillä muuten ei pystynyt lisäämään muita rekistereitä piirille. (32, s. 16.)

LMP91000-potentiostaatin transimpedanssivahvistus on virrasta jännitteeseenmuunnin. Transimpedanssivahvistusta voidaan säätää 2,5 kilo-ohmista 350 kilo-ohmiin asti. Transimpedanssivahvistuksen kasvaessa myös potentiostaatilta

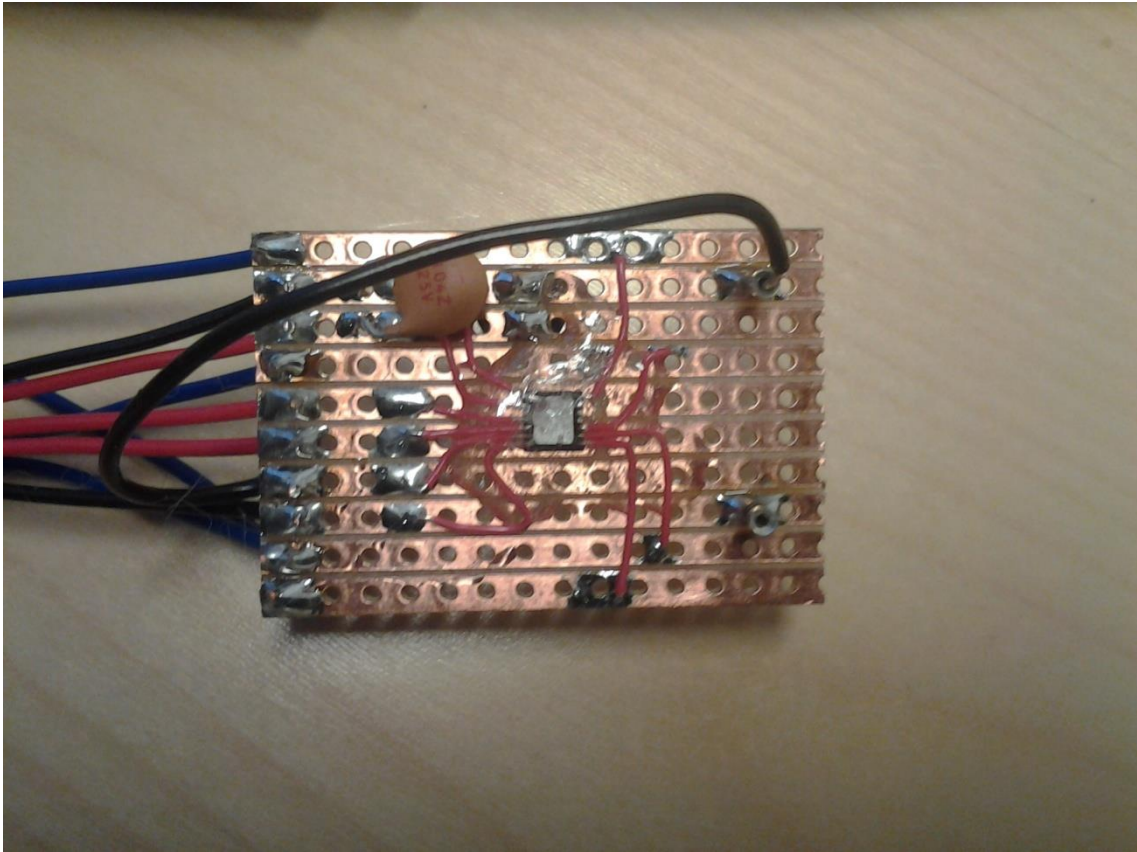
uloslähtevä jännite kasvaa. Prototyypissä käytimme 7 kilo-ohmin vahvistusta. Transimpedanssivahvistuksen parametrit ajetaan TIA Control -rekisterin kautta. (32, s. 17.)

Potentiostaatin Reference Control -rekisterin avulla voidaan säätää biasin polaarisuus, sisäinen nollassa, vertailujännitelähde ja biasin prosentuaalinen osuus vertailujännitteestä. Biasin polaarisuus määrittelee, onko työ- ja vertailuelektrodin välinen jännite positiivinen vai negatiivinen. Sisäisellä nollassa ja biasilla pystytään säätämään jännitteen voimakkuutta. (32, s. 17.) Prototyypissä jännite säädettiin 90–100 millivoltin välille, sillä se oli optimaalinen prototyypissä käytettyjen sensoreiden kanssa. Jännitteen säätö pitää tehdä silloin kun mitattava neste on sensorin pinnalla. Prototyypissä vertailujännitelähde tulee suoraan sisäisestä 5 voltin käyttöjännitteestä.

Mode Control -rekisterin avulla määritetään potentiostaatin toimintatapa. Toimintatavaksi valitaan 3-napainen amperometrinen kenno (3-lead amperometric cell), sillä prototyyppi käyttää kolmea elektrodia. Kaikkien rekistereiden kirjoitus tehtiin I<sup>2</sup>C-väylän kautta. (32, s. 18.)

#### **4.4.2 LMP91000:n tekniset ominaisuudet**

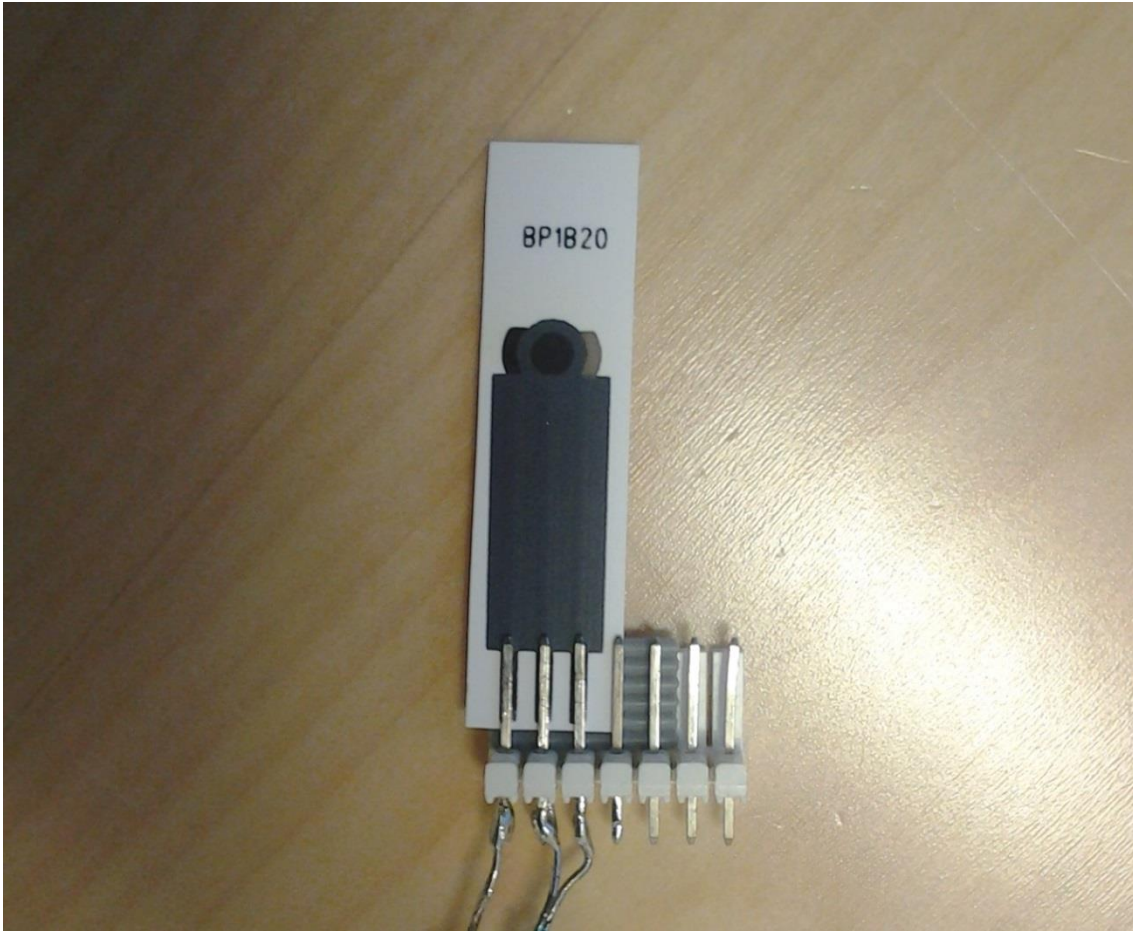
LMP91000 on monikäyttöinen potentiostaatti sen rekistereiden laajojen säätöominaisuuksien ansiosta. Potentiostaatti käyttää 2,7–5,25 voltin jännitelähdettä. Maksimi virtalähde 3-napaisen amperometrisen kennon käytössä on 15 mikroampeeria. Ulosmenovirta on maksimissaan 750 mikroampeeria ja toimintalämpötila -40–(+80) celsiusastetta. Potentiostaatin I<sup>2</sup>C-väylä toimii A/D-muuntimen tavoin Arduino-koodien välityksellä. Potentiostaatin I<sup>2</sup>C-väylää ei käytetä raakadatan lukemiseen, sillä datan ulostulopinni on yhdistetty A/D-muuntimen sisääntulopinniin. (32, s. 1.) Kuvassa 7 on LMP91000-potentiostaatti kytkettynä prototyyppiin. Potentiostaatti kytkettiin juottamalla ohuita johtoja sen jalkoihin, jonka jälkeen se upotettiin epoksiliimaan. Luvun 4.1 kuvassa 5 näkyy tarkemmin miten potentiostaatti kytkeytyy prototyyppiin.



*KUVA 7. LMP91000-potentiostaatti kytkettynä prototyyppiin*

#### **4.5 Sensori**

Prototyypimittauslaitteen sensoreina toimivat painettavalla tekniikalla valmistetut biosensorit. Sensorit on valmistanut Oulun seudun ammattikorkeakoulussa toimiva PrinLab eli painettavan tekniikan laboratorio, joka valmistaa painettavan elektronikan tuotteita. Kuvassa 8 on PrinLabissä valmistettu biosensori kiinnitettynä prototyyppiin.



*KUVA 8. PrinLabissä painettavalla teknologialla valmistettu biosensori*

Sensorit sisältivät työ- ja vastaelektrodissa grafiittia sekä vertailuelektrodissa hopeakloridin ja hopean seosta. Sensorit on painettu PET-kalvolle (polyeteenitereftalaatti), joka on yleisesti pakkausteollisuudessa käytetty muovi. (33.) Sensorin pinnalla on lisäksi eristekerros häiriöiden suojaksi. Kuvassa 8 näkyy oikeassa kulmassa vaalean harmaalla vertailuelektrodin hopea-hopeakloridipinnoite, keskellä oleva pyöreä musta alue on työelektrodi ja vasemmalla musta alue on vastaelektrodi. (34.)

#### **4.6 Sara-prototyyppi**

Sara-prototyyppi perustui mikrokontrolleri Arduino Mega 2560:n ympärille tehtyyn mittauslaitteistoon. Arduino soveltuu hyvin prototyypin alustaksi sen avoimen lähdekoodin vuoksi. Kuvassa 9 on Sara-prototyyppi. Kuvasta näkyy Arduinolta mustaan koteloon menevät johdot, sillä A/D-muunnin sekä potentio-

staatti ovat laatikon sisällä. Laitteen kytkennät selitettiin tarkemmin luvussa 4.1 Piirikaavio.



*KUVA 9. Sara-prototyyppi*

#### **4.7 Tekniset rajoitteet**

Sara-prototyyppimittauslaitteella on muokattavuudesta huolimatta teknisiä rajoitteita. Yksi keskeinen puute on sensorin pinnalle tulevan jännitteen katkaiseminen ilman, että kaikkia registreitä tarvitsee ajaa uudelleen. Mittausta aloittaessa olisi hyvä jos mitattavan nesteen voisi laittaa sensorin pinnalle silloin, kun mittaus ei ole vielä käynnissä eikä sensorin pinnalla ole jännitettä, sillä mittauksen aikana nesteen tiputtaminen sensorille aiheuttaa häiriöitä mittaustuloksiin. Potentiostaatille ja A/D-muuntimelle ajatut rekisterit nollautuvat aina, kun Arduinon sammuttaa. Rekistereiden nollautuminen hidastaa mittauksen aloittamista, sillä Arduinon kautta pitää ajaa viisi erilaista koodia A/D-muuntimen ja potentiostaatin rekistereille.

Prototyypiltä tuleva data on raakadataa eikä sitä pysty lukemaan ilman käsitteilyä Excel- tai Matlab-ohjelmistolla. Raakadatan käsittely on aikaa vievää, minkä vuoksi mittauksien teko on työlästä.

## 5 MITTAUKSET

### 5.1 Mittausjärjestelyt

Sara-prototyypin mittausjärjestelyissä piti ottaa huomioon monta osa aluetta, jotta mittaus onnistuu. Prototyypin Arduino tuli olla kytkettynä USB-liittimellä tietokoneeseen, jolloin Arduino, potentiostaatti sekä A/D-muunnin saivat virran ja Arduino-koodit voitiin ajaa. (23.) Arduinon, potentiostaatin ja A/D-muuntimien ohjelmointi vaatii jatkuvan jännitteen, sillä rekisterit tyhjäntyvät joka kerta kun prototyypin virran katkaisee.

Arduino-ohjelmointikielellä ajettiin neljä eri koodia potentiostaattia varten, sillä jokainen ohjelma sisältää rekisteriarvoja ja ilman niitä potentiostaatin toiminta ei ole mahdollista. Ensimmäinen koodi oli potentiostaatin lukituksen poistamista varten (Liite 1). Kolmen seuraavan potentiostaatille ajettujen koodien järjestyksellä ei ollut väliä. Transimpedanssivahvistus säädettiin koodilla. Arduino-koodi määritteli vahvistuksen suuruuden potentiostaatille ajetuilla rekistereillä. (Liite 2.) Referenssirekisteri määritteli referenssijännitelähteen ja biastasot (Liite 3). Potentiostaatin toimintataparekisteri määritteli potentiostaatin käyttötavan (Liite 4). Rekistereiden toiminta selitettiin tarkemmin luvussa 4.4.1. Prototyypissä potentiostaatin transimpedanssivahvistus säädettiin 7 kilo-ohmiin. Prototyypille tehdyn jännitejaon takia potentiostaatin transimpedanssivahvistusta ei voida muuttaa ilman, että se vaikuttaa A/D-muuntimen nollatasoon.

A/D-muuntimen ja Arduinon välillä aukaistiin yhteys, jolloin voitiin lukea dataa A/D-muuntimelta Arduinolle. A/D-muuntimen sisällä ei ollut säädettäviä asetuksia, joten erillisiä rekistereitä ei tarvittu. Koodi aukaisi yhteyden A/D-muuntimen ja Arduinon I<sup>2</sup>C-väylän välillä, minkä avulla dataa voitiin lukea Arduinon kautta Serial-monitoriohjelmaan. (Liite 5.)

Mittauksessa seuraava vaihe oli mitattavan neste asettaminen biosensorin pinnalle. Mitattava neste asetettiin sensorille käyttäen pipettiä, joka helpotti nesteen annostelua. Mitattavaa nestettä tarvittiin tipan verran, jolloin biosensorin elektrodit olivat kokonaan nesteen alla. Sara-prototyyppi oli päällä koko mittauksen ajan, ja siksi nesteen asettaminen sensorille aiheutti häiriöitä. Kun neste

oli laitettu sensorin pinnalle, täytyi odottaa yli minuutin, jotta sähkökemiallinen reaktio tasoittui steady state -tilaan. Saatu mittaustulos kopioidaan Serial-monitorilta ja lisättiin Exceliin käsiteltäväksi. Excelillä raakadata muutettiin sekunti- ja virta-arvoiksi sekä niistä tehtiin amperogrammikuvaaja.

## **5.2 Mitattava neste**

Mitattavina nesteinä käytettiin kaliumferrosyanidia ( $K_3Fe(CN)_6$ ), jota oli liuotettu fosfaattipuskuriin. Puskuri sisältää myös kaliumkloridia pitoisuutena 0,1 moolia. Mittauksissa käytetyn kaliumferrosyanidinesteen pitoisuudet olivat 0–30 millimoolin välillä. (35.)

## **5.3 Referenssimittaus**

Sara-prototyypin referenssimittauslaitteena käytettiin PrinLabissä olevaa Palmsense-mittauslaitetta. (36, s. 86.) Palmsense-mittauslaite on erittäin tarkka ja sitä pystyy säätämään eri mittaustilanteita varten. Sara-prototyypin sensorin pinnalla oleva potentiaali oli säädetty mittauksia varten noin 100 millivolttiin, sillä tämä oli ihanteellinen potentiaali PrinLabissä valmistetuille biosensoreille sekä vastasi Palmsense-mittauslaitteen asetuksia. Referenssimittauksissa käytettiin samoja biosensoreja kuin Sara-prototyypillä tehdyissä mittauksissa, sillä PrinLabissä valmistettujen samanlaisten sensoreiden välillä on eroja.

## **5.4 Palmsense-mittauslaite**

Palmsense on tarkka sensorien mittaukseen suunniteltu laite. Sen voi suoraan kytkeä tietokoneeseen, jolloin data saadaan helposti talteen. Mittauslaitteella on sisäinen potentiostaatti, joka on säädettävissä. Potentiostaatin jännitettä pystyy säätämään –2 voltista 2 volttiin. Virta-arvoja potentiostaatti pystyy lukemaan 100 nanoampeerista 1 milliampeeriin. Yritys ei kerro Palmsense-mittauslaitteen tarkkoja tietoja siinä käytetyistä komponenteista. (36, s. 86.) Kuvassa 10 on Palmsense-mittauslaite ilman siihen liitetyjä johtoja sekä biosensoreita.





*KUVA 10. Palmsense-mittauslaite*

### **5.5 Häiriötekijät**

Mittauksen aikana voi tulla häiriöitä monista eri lähteistä. Mitattavan nesteen asettaminen aiheuttaa häiriöitä, sillä neste värisee sensorilla pinnalla, kun sitä laitetaan sensorille pipetin avulla. Kovat äänet ja ilmavirtaukset aiheuttavat myös häiriöitä mittauksen aikana ja tämän vuoksi mittausympäristön tulisi olla mahdollisimman rauhallinen. Mittauslaitteen tärisyttäminen tai sitä tukevan pöydän kolauttaminen aiheuttaa myös häiriöitä.

Sara-prototyypin kytkennät saattavat aiheuttaa häiriöitä, sillä monet johdoista ovat huonosti eristettyjä. Häiriöitä on mahdollista poistaa keskiarvoistuksella ja paremmin suojatuilla johtimilla.

## 6 TULOKSET

Sara-prototyypillä tehtiin useita mittauksia erivahvaisilla konsentraatioilla. Mittauksia verrattiin Palmsense-mittauslaitteella saatuihin tuloksiin. Kaikkien amperogrammien tulokset ovat käännettyjä, sillä muuten virta-arvot näyttäisivät negatiivisilta sekä amperogrammikäyrät näyttäisivät nousevilta. Kun amperogrammi-kuvaajien virta-arvot esitetään positiivisina se havainnollistaa paremmin voimakasta virtapiikkiä mittauksen alussa sekä steady state -tilassa virran tasoittumista ja heikkenemistä.

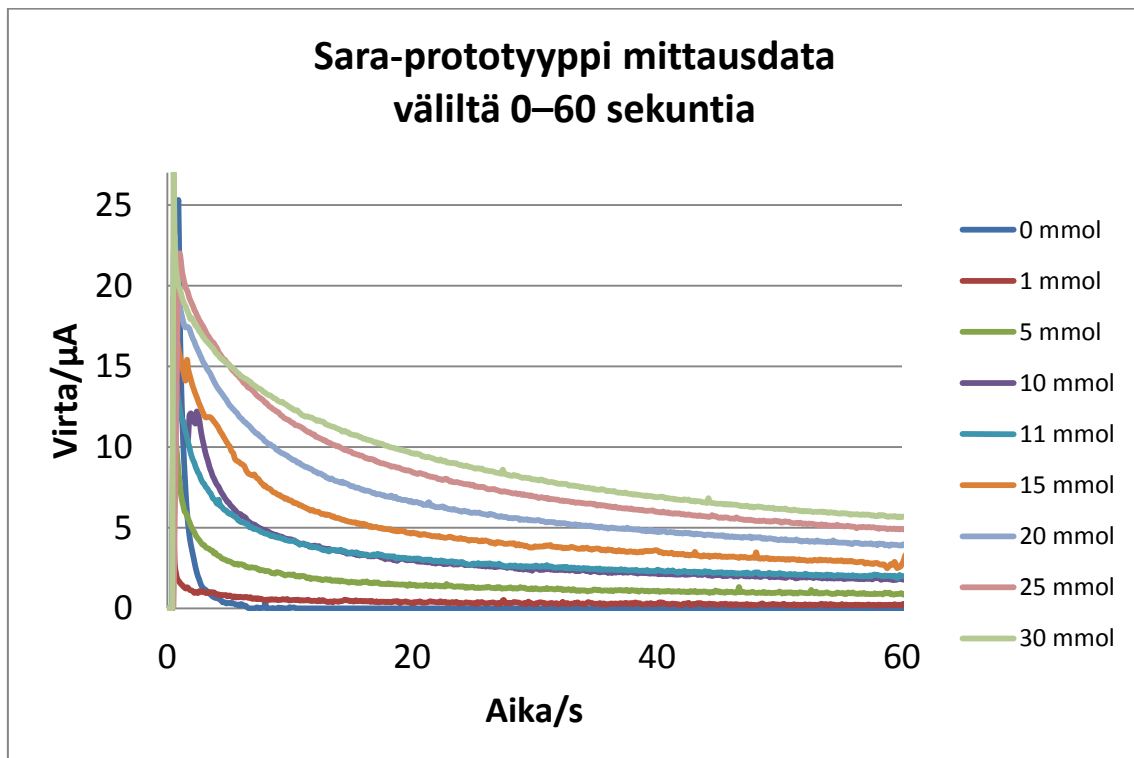
Mittaustulokset käsiteltiin Excel-ohjelman avulla, koska prototyypiltä saatu data oli raakadataa, jota ei pystynyt tulkitsemaan ilman muunnoslaskuja. Excelillä laskettaessa ensin piti kääntää nollataso vastaamaan nollaa, sillä prototyypiltä saatu nollatason lukuarvo on 65 536. Seuraavaksi laskettiin jännitearvo, joka saadaan laskemalla kun tiedetään A/D-muuntimelta tuleva maksimijännite. Jännitteestä laskettiin käännetty nollataso 65 536 jaettuna A/D-muuntimelta ulostulevalla maksimijännitteellä, joka oli Sara-prototyypissä 1,25 voltia. Jännitteen laskemisen jälkeen saatiin virta, kun jännite jaettiin transimpedanssivahvistuksen ohmimäärällä. Lopuksi virta muunnettiin mikroampeereiksi. Kaavassa 2 näkyy mittausdatan muunnoskaava.

$$\mu A = [(r1 - r2) * (-1)] * (v1/r2) / Tia * 10^6 \quad \text{KAAVA 2}$$

$\mu A$  tarkoittaa virtaa mikroampeereina,  $r1$  on raakadata,  $r2$  on A/D-muuntimen lukuarvo 65 536,  $v1$  on A/D-muuntimelta tuleva jännite voltteina ja  $Tia$  on potentiostaatin transimpedanssivahvistus ohmeina.

## 6.1 Sara-prototyypimittauksien analysointi

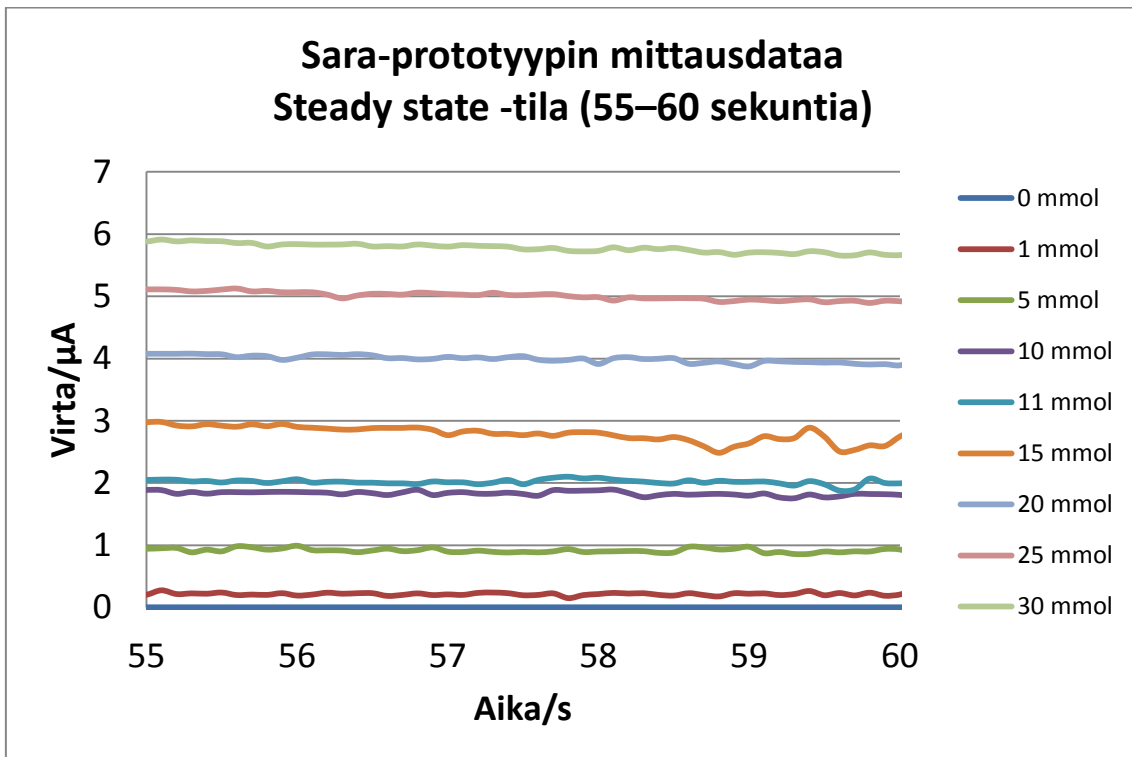
Kuvassa 11 on Sara-prototyypistä saatua mittausdataa. Amperogrammikuvaajassa näkyy koko mittaus, ja siitä voidaan nähdä virtapiikki mittauksen alussa sekä sen tasoittuminen noin minuutin jälkeen steady state -tilaan. Kuvalla 11 pyritään havainnollistamaan miten amperometrinen mittaus toimii ja kuinka nopeaa virta-arvon laskeutuminen on. Käytettyjen mitattavien nesteiden konsentraatiot ovat millimoolina 0, 1, 5, 10, 11, 15, 20, 25 ja 30.



KUVA 11. Sara-prototyypin mittauksen amperogrammikuvaaja

Kuvassa 12 käytettiin saman mittauksen dataa kuin kuvassa 11, mutta niitä tarkasteltiin 55–60 sekunnin aikavälillä. Kyseisellä aikavälillä mittaus oli tasoittunut steady state -tilaan, joten virta-arvojen vertailu keskenään oli mahdollista. Kuvasta 12 voidaan huomata eri konsentraatioiden välillä oleva lineaarisuus, sillä karkeasti arvioituna yhden µA:n muutos virrassa vastaa 5 mmol:n muutosta mitattavan nesteen konsentraatiossa. Sara-prototyypin mittaustarkkuus ilmenee 10 mmol:n ja 11 mmol:n selvällä erolla. Tarkempi vertailutulos eri konsentraati-

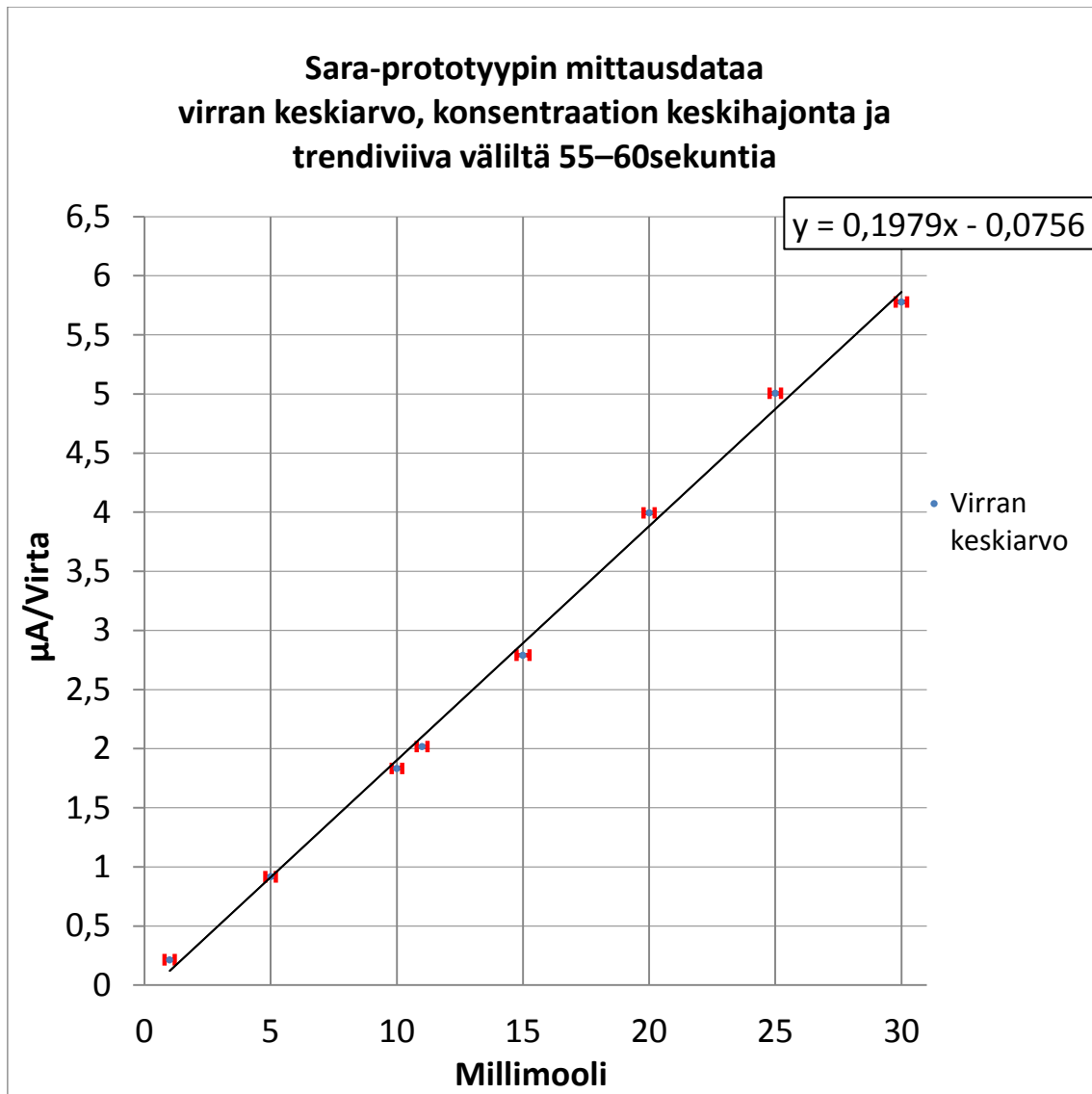
oiden välillä saadaan, kun 55–60 sekunnin ajalta lasketaan virran keskiarvo, jolloin häiriöiden aiheuttamat hetkelliset virtapiikit saadaan suodatettua.



KUVA 12. Sara-prototyyppi mittauksen amperogrammikuvaaja steady state -tilasta

Kuvassa 13 laskettiin kuvan 12 mittausdatasta virran keskiarvo väliltä 55–60 sekuntia. Mittausdatan avulla piirrettiin trendiviiva ja siitä saadun yhtälön  $y = 0,1979 x - 0,0756$  avulla voitiin määrittellä konsentraation keskihajonta, kun tiedettiin virran keskihajonta. Trendiviivasta nähdään, että Sara-prototyypin eri konsentraatiot nousevat lineaarisesti virta-arvoina ylöspäin, kun mitattavien nesteiden konsentraatiot vahvistuvat.

Kuvassa 13 punaiset palkit ovat konsentraatioiden keskihajontoja, jotka vaihtelivat välillä 0,4037–0,508 mmol. Konsentraation keskihajonta on pieni Sara-prototyypin hyvän lineaarisuuden ansiosta.



KUVA 13. Virran keskiarvo, trendiviiva sekä konsentraation keskihajonta

Virran keskihajonta laskettiin jokaisesta mitatusta konsentraatiosta erikseen. Keskihajonta lasketaan kaavalla 3, jossa  $n$  on otoksen suuruus ja  $x$  on otoksen keskiarvo.

$$\sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)}}$$

KAAVA 3

Konsentraation keskihajonnan voi määrittää kun tiedetään virran keskihajonta ja trendiviivan yhtälö. Konsentraation keskihajonta lasketaan kaavalla 4.

$$\Delta K = \frac{\Delta I - b}{a}$$

KAAVA 4

Kaavassa 4  $\Delta K$  tarkoittaa konsentraation keskihajontaa,  $\Delta I$  on virran keskihajonta.  $b$  on  $-0,0756$  ja  $a$  on  $0,1979$ . Kaavan  $b$  ja  $a$  ovat trendiviivan yhtälöstä  $y = 0,1979x - 0,0756$ .

Taulukossa 1 eritellään kuvan 13 numeeriset lukuarvot millimoolille, virroille ja keskihajonnoille. Keskihajonta esitetään taulukossa virralle ja konsentraatioille erikseen.

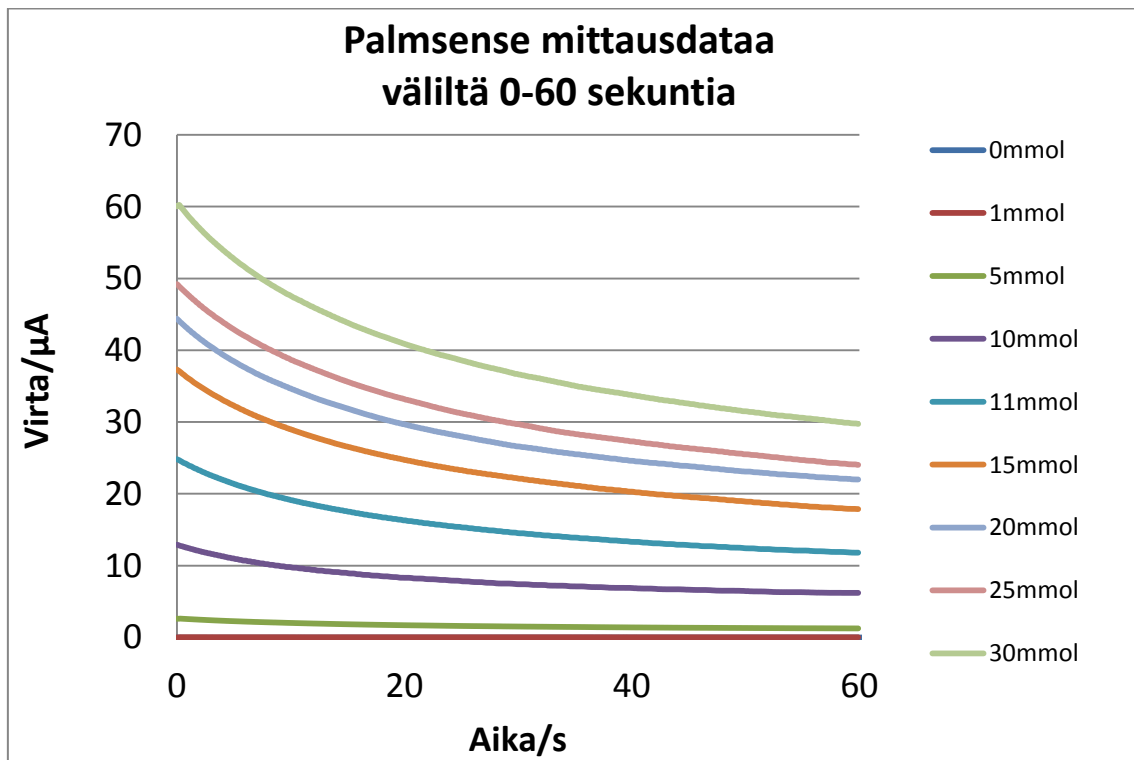
TAULUKKO 1. Millimoolit, virta-arvot ja keskihajonnat kuvasta 13

Millimooli	1	5	10	11	15	20	25	30
Virta-arvo $\mu A$	0,21446	0,9171	1,8334	2,0179	2,7911	3,9941	5,0062	5,7782
Keskihajonta $\mu A$	0,02165	0,0327	0,0333	0,0403	0,1254	0,0569	0,0646	0,0708
Konsentraation keskihajonta mmol	0,4037	0,4148	0,4153	0,4223	0,508	0,4389	0,4466	0,4528

Kuvan 13 ja taulukon 1 tietojen avulla voidaan määrittellä Sara-prototyypin mitaustarkkuudeksi noin  $\pm 0,25$  mmol, sillä konsentraatioiden keskihajonta oli välillä  $0,4037$ – $0,508$  mmol. Mittauksia ei ole toistettu tarpeeksi monta kertaa, jotta pystyttäisiin laskemaan virherajat jokaisen konsentraation mittaukselle erikseen. Prototyypillä pitää tehdä enemmän mittauksia jos halutaan saada mitaustarkkuus ja luotettavuus todennettua.

## 6.2 Referenssimittauksien analysointi

Palmsense-mittauslaitteella tehtiin vertailumittauksia PrinLab-tilassa. Mittauksissa käytettiin samoja nesteitä ja sensoreita kuin Sara-prototyypillä tehdyissä mittauksissa. Kuvassa 14 on Palmsense-mittauslaitteella saatua dataa, joka on mitattu samoilla konsentraatioilla kuin Sara-prototyypillä tehdyt mittaukset. Aikaväli on myös sama 0–60 sekuntia. Palmsensellä saatujen tuloksien virta-arvot ovat huomattavasti suurempia kuin Sara-prototyypillä, mutta virran ja konsentraatioiden lineaarisuus ei ole yhtä hyvä. Palmsensen epälineaarisuus johtuu luultavasti siitä, että sitä ei ole suunniteltu mittaamaan kymmenien millimoolien eroja, sillä laboratorioissa pyritään mittaamaan hyvin pieniä eroja konsentraatioiden välillä.

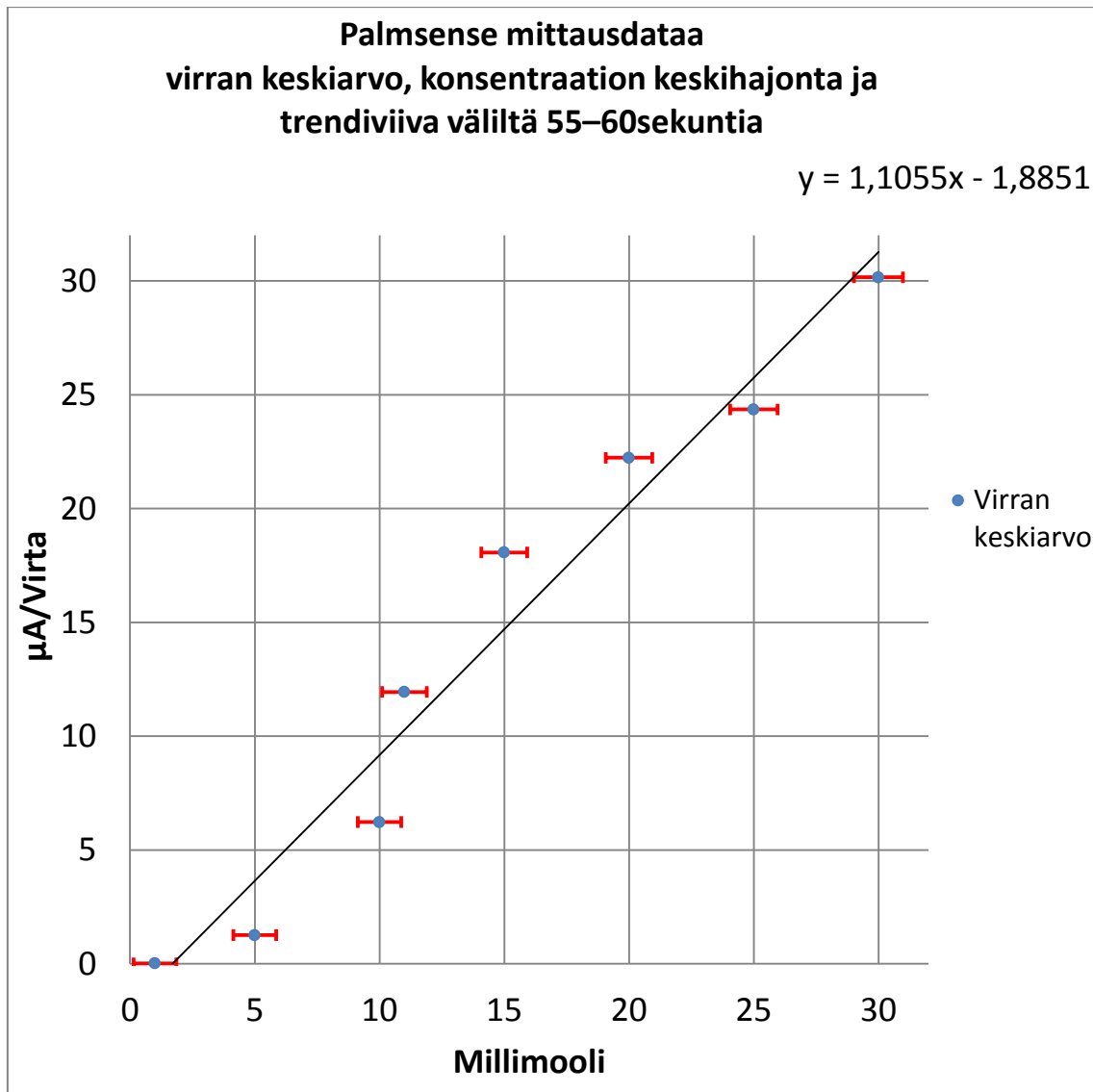


KUVA 14. Palmsense-mittauslaitteen dataa

Kuvassa 15 tehtiin samanlainen kuvaaja kuin luvun 6.1 kuvassa 13. Mittausdatana käytettiin kuvan 14 dataa aikaväliltä 55–60 sekuntia. Virran keskihajonta laskettiin kaavaa 3 käyttäen. Konsentraation keskihajonnan laskennassa käytettiin kaavaa 4, mutta kaavan b ja a parametrit ovat kuvan 15 trendiviivan yhtälöstä  $y = 1,1055x - 1,8851$ . Kuvasta 15 näkee selvän eron konsentraatioiden kes-

kihajontojen suuruudessa ja virtakeskiarvojen lineaarisuudessa verrattuna Sara-prototyypin mittausdataan.

Konsentraation keskihajonta vaihtelee 1,70532–1,9635 mmol:n välillä kuvan 15 punaisessa palkissa. Suuri vaihtelu johtuu Palmsense-mittauslaitteen epälineaarisuudesta, kun verrataan trendiviivaa ja virta-arvoja.



KUVA 15. Virran keskiarvo, trendiviiva sekä konsentraation keskihajonta

Taulukossa 2 on kuvan 15 numeeriset lukuarvot millimooleille, virroille ja keskihajonnoille. Keskihajonta esitetään taulukossa virralle ja konsentraatioille erikseen.

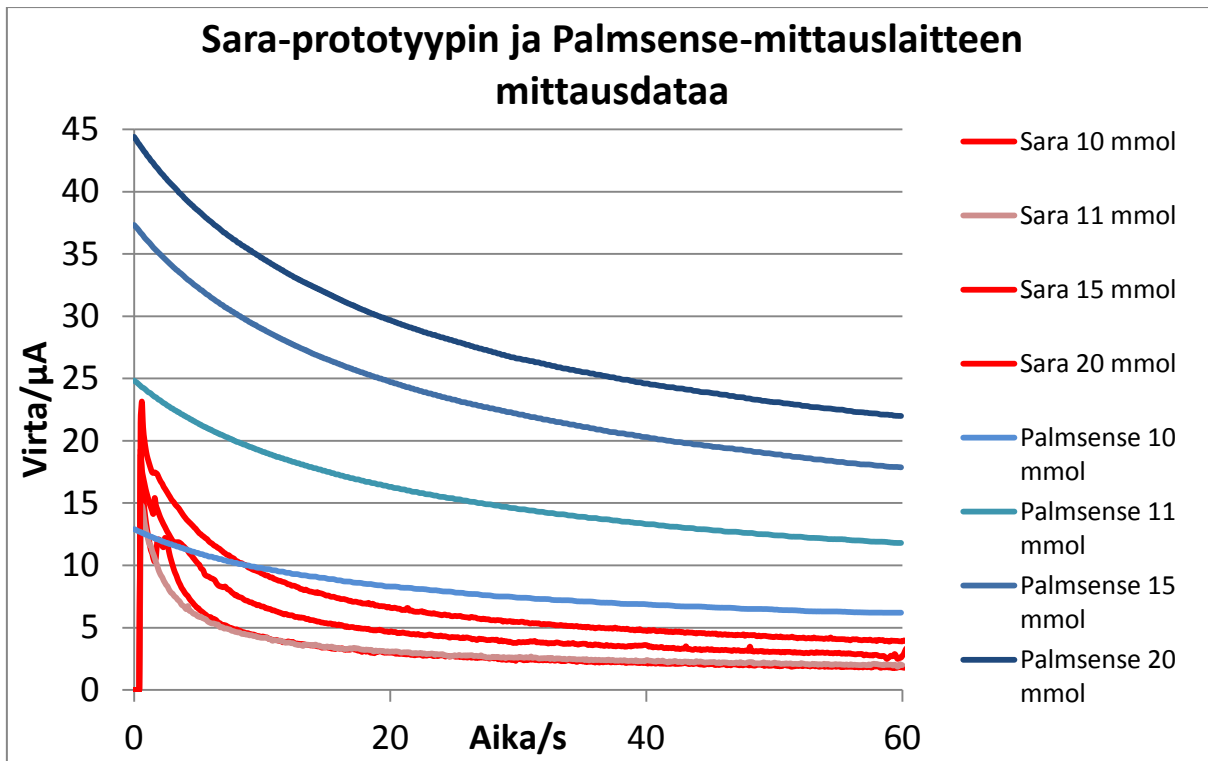


TAULUKKO 2. Millimoolit, virta-arvot ja keskihajonnat kuvasta 15

Millimooli	1	5	10	11	15	20	25	30
Virta-arvo $\mu\text{A}$	0,01705	1,2599	6,2246	11,941	18,073	22,23	24,354	30,160
Keskihajonta $\mu\text{A}$	0,00012	0,0075	0,0294	0,0932	0,1346	0,1553	0,2008	0,2583
Konsentraation keskihajonta mmol	1,70532	1,7127	1,7346	1,7984	1,8398	1,8605	1,906	1,9635

Kuvassa 16 on Sara-prototyypin sekä Palmsense-mittauslaitteen mittausdataa samassa kuvaajassa. Mitattavina nesteinä käytettiin 10, 11, 15 ja 20 millimoolin konsentraatioita. Amperogrammikuvaajasta erottuvat isot virta-erot mittauslaitteiden välillä, sekä Palmsense-mittauslaitteen epälineaarisuus näkyy selvästi. Luultavasti Palmsense-mittauslaitetta ei ole tarkoitettu mittaamaan suuria millimoolieroja, jonka vuoksi se ei toimi niin lineaarisesti kuin haluttiin. Sara-prototyyppi puolestaan toimii hyvin lineaarisesti, kuten luvussa 6.1 todettiin.

Sara-prototyypin ja Palmsense-mittauslaitteen amperogrammikuvaajista nähdään merkittävä ero alkupiikissä, sillä Palmsense-mittauslaite suodattaa alkupiikin eikä sitä näy kuvaajassa. Mittauslaitteet eivät ole täysin vertailukelpoisia niiden mittaustekniikan ja -laitteiston eroavaisuuksien vuoksi.



KUVA 16. Sara-prototyypin ja Palmsense-mittauslaitteen mittausdataa

## 7 POHDINTA

Sara-prototyypillä pystyy mittamaan lineaarisesti eri mitattavien nesteiden konsentraatiot. Mittauslaite soveltui hyvin isojen konsentraatioiden selvittämiseen sekä mittaamaan tarkasti noin  $\pm 0,25$  millimoolin eroja mitattavissa nesteissä. Palmsense-mittauslaite ei ollut vertailukelpoinen Sara-prototyypin kanssa, sillä sen mittaustekniikka ja muut ominaisuudet erosivat huomattavasti Sara-prototyypistä.

Virran keskiarvo ja keskihajonta mitattiin raakadatasta 55–60 sekunnin väliltä. Keskihajontaa pystyisi parantamaan, jos käytettyä raakadataa suodattaisi keskiarvoistuksella ennen keskihajonnan laskemista. Keskiarvoistusominaisuutta ei ole vielä integroitu Sara-prototyyppiin. Pienemmällä keskihajonnalla saadaan todistettua myös tarkempi mittaustarkkuus.

Tulevaisuuden jatkokehityksen kannalta olisi hyvä tehdä useita tarkkoja mittauksia eri konsentraatioilla, jolloin saadaan tarkempaa tietoa Sara-prototyypin mittaustarkkuudesta. Todellisen mittaustarkkuuden selvittämiseksi tulee tehdä mittauksia pienillä konsentraatioeroilla, jolloin nähdään kuvaajien menevän päällekkäin. Sara-prototyypin huonosti suojattujen johtimien korvaaminen paremmilla sekä A/D-muuntimen ja potentiostaatin asentaminen paremmin häiriösuojattuihin piirilevyihin mahdollistaa vähemmän häiriöiset mittaukset. Arduinon korvaaminen muulla mikrokontrollerilla tai tietokoneella voisi olla myös hyvä prototyypin tulevaisuuden kannalta.

Sara-prototyypillä käytettiin pelkästään PrinLabin biosensoreita, mutta sillä on mahdollista käyttää markkinoilla olevia sensoreita, jotka toimivat samalla periaattella. Samanlaisilla sensoreilla on myös keskenään eroavaisuuksia, joten käytimme kummallakin mittauslaitteella samaa sensoria mittauksien tekemiseen. PrinLabissä valmistettujen sensoreiden eroavaisuuksia tulisi tutkia enemmän, jotta saataisiin laskettua niiden keskihajonta. Keskihajonnan avulla pystyy varmemmin määrittämään, kuinka paljon samanlaiset sensorit eroavat keskenään. Kaupallisissa sensoreissa yleensä ilmoitetaan raja-arvot, kuinka paljon sensori näyttää mittaustarkkuutta maksimissaan.

## 8 YHTEENVETO

Biosensoreilla mittaminen on aikaa vievää ja haastellista työtä. Mittauksissa tulee ottaa huomioon virhelähteet sekä muut mittaukseen vaikuttavat tekijät. Sara-prototyyppi osoitti, että biosensorimittauslaitteen rakentaminen opiskelija-voimin ja edullisilla komponenteilla on mahdollista. Referenssimittauslaitteena ollut Palmsense-mittauslaite on huomattavasti kalliimpi, mutta silti Sara-prototyyppi soveltui paremmin isojen konsentraatioerojen mittaamiseen.

Sara-prototyyppi on ainutlaatuinen, sillä sen toteuttamiseen käytettiin painettavaa teknologiaa, avointa Arduino-alustaa ja opiskelijaprojektia. Sara-prototyypin kehitystyö on kiinnostanut alan yrityksiä. Sara-prototyypin jatkon kannalta on tärkeää keskittyä sovelluksiin, sillä pelkkä mittauslaitteen kehittäminen ei luo uusia innovaatioita. Prototyypin pohjalta on helppo alkaa kehittämään laitetta sovelluksia varten, sillä prototyyppi toimii luotettavasti.

Sara-prototyyppiä voidaan käyttää projekteissa sekä biosensorien kehitystyössä. Opinnäytetyöni tarkoituksena oli selvittää Sara-prototyypin mittaustarkkuus sekä verrata tuloksia referenssimittauslaitteen kanssa. Opinnäytetyössä käydään tarkasti läpi amperometrinen mittaustekniikka sekä Sara-prototyypin tekniset ominaisuudet. Mittaustarkkuuden määrittelemiseen käytettiin prototyypiltä saatua dataa sekä keskiarvo- ja keskihajontalaskuja. Laskennalliseksi mittaustarkkuudeksi saatiin noin  $\pm 0,25$  mmol:n erottelukyky.

Opinnäytetyössäni teoria ja tulokset käsiteltiin tieteellisellä tarkkuudella. Työssäni mielenkiintoista oli ongelmanratkaisu sekä painettavien biosensorien käyttöönotto ja testaaminen. Opinnäytetyöni on lisäksi ohjekirja Sara-prototyypille ja sen tulevaisuuden kehitystyötä varten.

## LÄHTEET

1. Kilpeläinen, Pekka. 2012. Biosensoreiden nykyisiä ja tulevia sovellutuksia. CEMIS-Oulu. Saatavissa: <http://www.oamk.fi/hankkeet/prinlab/docs/materials/kilpelainen.pdf>. Hakupäivä 29.1.2014.
2. He, Baoshan – Zhou, Aiyu – Yue, Weiwei – Jiang, Liying– Liu, Chunxiu – Cail. 2006. Research on Optic Biosensor for Rapid Detection of Hemoglobin. Graduate School of Chinese Academy of Science. Peking, Kiina. Luettavissa IEEE Xplore Digital Librarystä, vaatii käyttöoikeudet.
3. Applications of Biosensor. Gateway. Saatavissa: [http://www-gateway.vpr.drexel.edu/files/Hidden/sensr/ch1/1\\_3f.htm](http://www-gateway.vpr.drexel.edu/files/Hidden/sensr/ch1/1_3f.htm). Hakupäivä 23.10.2013.
4. Liu, His-Chien – Tsai, Chung-Che – Chang, Kang J – Wang, Gou-Jen. 2013. A Highly Sensitive Biosensor Based on a 3D Gold Nanostructure Modified Screen-Printed Electrode for Glucose Detection. National Chung-Hsing University. Taichung, Taiwan. Luettavissa IEEE Xplore Digital Librarystä, vaatii käyttöoikeudet.
5. Pakapongpan, Saithip – Sritongkham, Pornpimol. 2011. Cholesterol Biosensor based on Direct Electron Transfer of Cholesterol Oxidase on Multi-wall Carbon Nanotubes. Mahidol University. Nakornpathom, Thaimaa. Luettavissa IEEE Xplore Digital Librarystä, vaatii käyttöoikeudet.
6. Biosensor Applications. News-medical. Saatavissa: <http://www.news-medical.net/health/Biosensor-Applications.aspx>. Hakupäivä 23.10.2013.
7. Koyun, Ahmet – Ahlatcioğlu, Esmâ – İpek, Yeliz Koca. 2012. Biosensors and Their Principles, A Roadmap of Biomedical Engineers and Milestones.

- Saatavissa: [http://cdn.intechopen.com/pdfs/37345/InTech-Biosensors\\_and\\_their\\_principles.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/37345/InTech-Biosensors_and_their_principles.pdf). Hakupäivä 23.11.2013.
8. Bioprocessing renewable natural materials. 2012. VTT. Saatavissa: [http://www.vtt.fi/research/technology/Bioprocessing\\_renewable\\_natural\\_materials.jsp?lang=en](http://www.vtt.fi/research/technology/Bioprocessing_renewable_natural_materials.jsp?lang=en). Hakupäivä 11.10.2013.
  9. Bio-, lääke- ja elintarviketeollisuus. 2012. VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/service/bio/>. Hakupäivä 11.10.2013.
  10. Measurement of food healthiness. VTT. Saatavissa: [http://www.vtt.fi/files/services/bio/Measurement\\_of\\_food\\_healthiness.pdf](http://www.vtt.fi/files/services/bio/Measurement_of_food_healthiness.pdf). Hakupäivä 11.10.2013.
  11. Detecting drugs & explosives. Biosensor. Saatavissa: <http://biosensor.se/areas-of-use/>. Hakupäivä 23.10.2013.
  12. Autoklaavi. 2014. Wikipedia. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Autoklaavi>. Hakupäivä 20.1.2014
  13. Amperometria. Laboratorioanalyysit, Opetushallitus. Saatavissa: [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/laboratorio/analyysimenetelmat\\_6-4\\_amperometria\\_jne.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/laboratorio/analyysimenetelmat_6-4_amperometria_jne.html). Hakupäivä 23.10.2013.
  14. Elektrodipotentiaali. 2013. Wikipedia. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Elektrodipotentiaali>. Hakupäivä 23.11.2013.
  15. Devengenz, Michael. Standard electrodes. Chemwiki. Saatavissa: [http://chemwiki.ucdavis.edu/Analytical\\_Chemistry/Electrochemistry/Electrodes/Standard\\_Hydrogen\\_Electrode#Examples\\_of\\_Electrodes](http://chemwiki.ucdavis.edu/Analytical_Chemistry/Electrochemistry/Electrodes/Standard_Hydrogen_Electrode#Examples_of_Electrodes). Hakupäivä 22.11.2013.

16. Nernstin yhtälö. Aalto yliopiston luentomateriaali korroosiosta Saatavissa: [https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-113.2110/luennot/S-113\\_2110\\_I9.2110\\_luento\\_9\\_-\\_korroosio\\_ii.pdf](https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-113.2110/luennot/S-113_2110_I9.2110_luento_9_-_korroosio_ii.pdf). Hakupäivä 20.11.2013.
17. Nissinen, Marja. 2013. Erikoistutkija. PrinLab. Haastattelu. 23.9.2013.
18. Redox reactions defined. 2013. Suite101. Saatavissa: <http://suite101.com/a/redox-reactions-defined-a149754>. Hakupäivä 9.12.2013.
19. Electron transfer. Prince George's Community college. Saatavissa: <http://academic.pgcc.edu/~kroberts/Lecture/Chapter%205/redox.html>. Hakupäivä 15.1.2014.
20. Arduino atmega 2560. Arduino. Saatavissa: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>. Hakupäivä 23.11.2013.
21. Honkanen, H. Piirien väliset ohjaus- ja tiedonsiirtoväylät. Kajaanin ammatti-  
korkeakoulu. Saatavissa: [http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/ELE\\_Piirien\\_v%C3%A4liset\\_ohjausv%C3%A4yl%C3%A4t.pdf](http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/ELE_Piirien_v%C3%A4liset_ohjausv%C3%A4yl%C3%A4t.pdf). Hakupäivä 27.11.2013.
22. Pulssinleveysmodulaatio. 2011. Wiki metropolia. Saatavissa: <https://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/Pulssinleveysmodulaatio>. Hakupäivä 23.11.2013.
23. Arduino. 2013. Wikipedia. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Arduino>. Hakupäivä 23.11.2013.
24. Atmel atmega 2560. Atmel. Saatavissa: <http://www.atmel.com/devices/atmega2560.aspx>. Hakupäivä 23.11.2013.
25. SRAM-muisti. ARM. Saatavissa: <http://www.arm.com/products/physical-ip/embedded-memory-ip/sram.php>. Hakupäivä 24.11.2013.

26. EEPROM-muisti. Arduino. Saatavissa:  
<http://arduino.cc/en/Reference/EEPROM>. Hakupäivä 23.11.2013.
27. Flash-muisti. Computer world. Saatavissa:  
[http://www.computerworld.com/s/article/349425/Flash\\_Memory](http://www.computerworld.com/s/article/349425/Flash_Memory). Hakupäivä 23.11.2013.
28. Digitaalitekniikan perusteet, A/D- muunnos. 2003. Aalto yliopisto. Saatavissa:  
<http://signal.hut.fi/digis/luento1/adkaavio.html>. Hakupäivä 29.11.2013.
29. LTC2471 datasheet. 2010. Linear Technology. Saatavissa:  
<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/24713fa.pdf>. Hakupäivä 25.11.2013.
30. ADC and DAC Glossary. 2002. Maximintegrated. Saatavissa:  
<http://www.maximintegrated.com/app-notes/index.mvp/id/641>. Hakupäivä 27.11.13.
31. Current-to-voltage converter. 2013. Wikipedia. Saatavissa:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Current-to-voltage\\_converter](http://en.wikipedia.org/wiki/Current-to-voltage_converter). Hakupäivä 29.11.2013.
32. LMP91000 datasheet. 2011. Texas Instruments. Saatavissa:  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp91000.pdf>. Hakupäivä 26.11.2013.
33. Nissinen, Marja. 2013. Erikoistutkija. PrinLab. Re: Prinlabin biosensoriliuskojen tietoja. Sähköpostiviesti Antti Portaankorva 11.10.2013.
34. Kits and biosensors. 2013. Demutox-sensor. Saatavissa:  
<http://www.demutox-sensor.fr/en/kits-et-biocapteurs/>. Hakupäivä 23.10.2013.



35. Nissinen, Marja. 2013. Erikoistutkija. PrinLab. Re: PrinLabissä käytetyt mitanesteet. Sähköpostiviesti t0poan00@students.oamk.fi 4.12.2013.
  
36. PSTrace manual. 2012. Palmsense.

## LIITTEET

Liite 1. Arduino-koodi lukitus

Liite 2. Arduino-koodi TIA Control

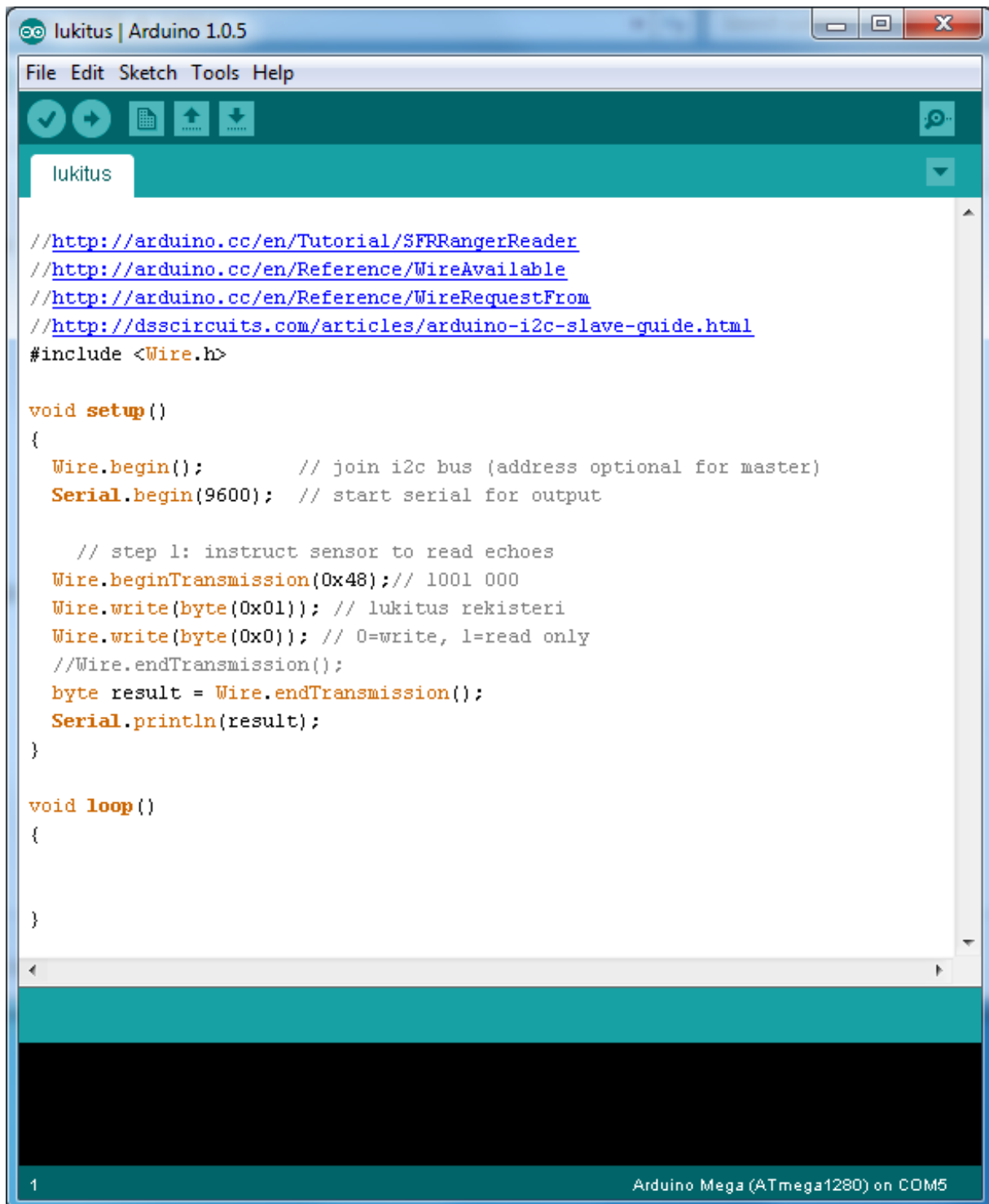
Liite 3. Arduino-koodi Reference Control

Liite 4. Arduino-koodi Mode Control

Liite 5. Arduino-koodi A/D-muuntimen lukija

Liite 6. LTC2471 datalehti

Liite 7. LMP91000 datalehti



The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The window title is "lukitus | Arduino 1.0.5". The menu bar includes "File", "Edit", "Sketch", "Tools", and "Help". The toolbar contains icons for saving, undo, redo, and other editing functions. The sketch editor displays the following code:

```
//http://arduino.cc/en/Tutorial/SFRRangerReader
//http://arduino.cc/en/Reference/WireAvailable
//http://arduino.cc/en/Reference/WireRequestFrom
//http://dsscircuits.com/articles/arduino-i2c-slave-guide.html
#include <Wire.h>

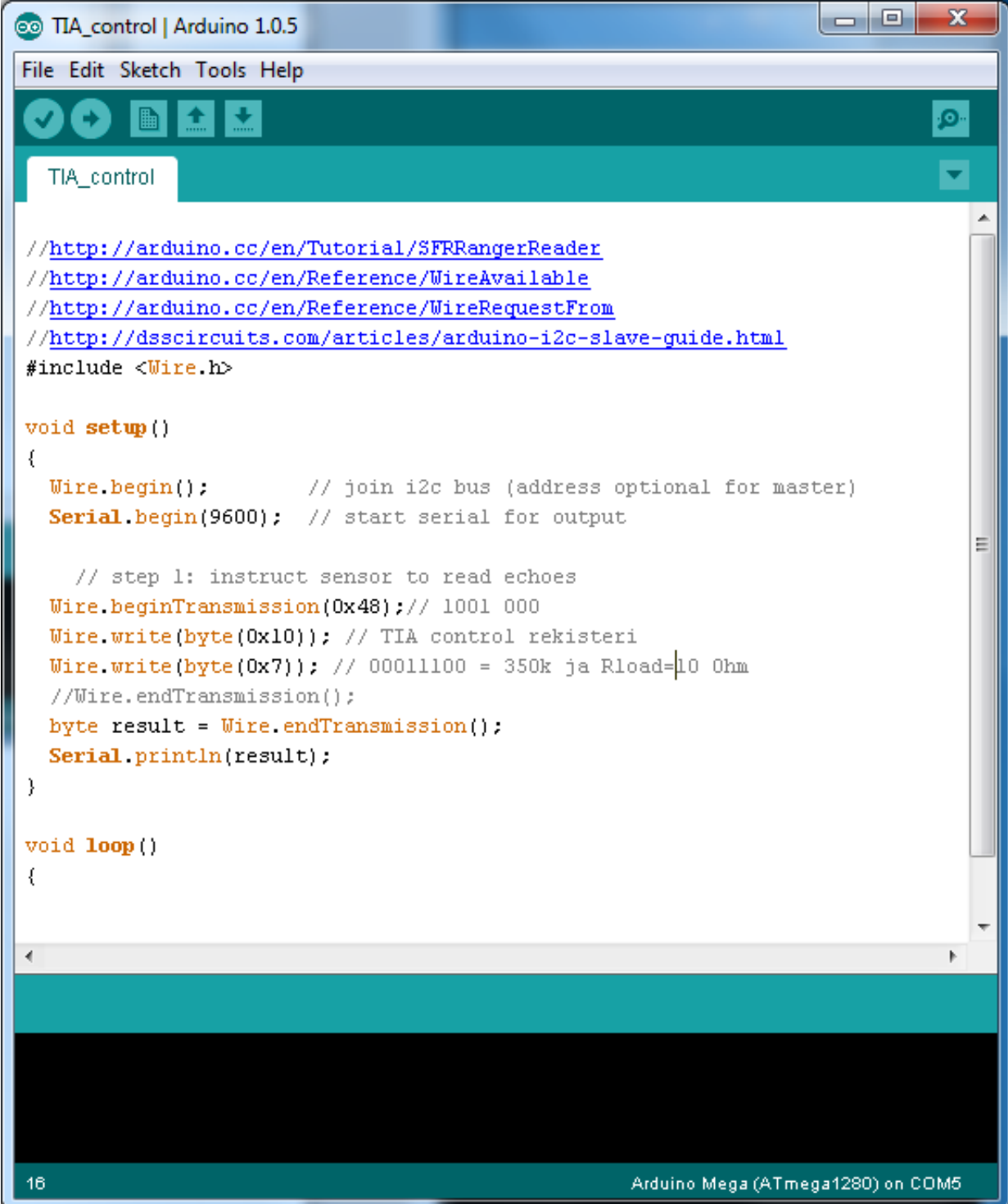
void setup()
{
  Wire.begin();          // join i2c bus (address optional for master)
  Serial.begin(9600);    // start serial for output

  // step 1: instruct sensor to read echoes
  Wire.beginTransmission(0x48); // 1001 000
  Wire.write(byte(0x01)); // lukitus rekisteri
  Wire.write(byte(0x0)); // 0=write, 1=read only
  //Wire.endTransmission();
  byte result = Wire.endTransmission();
  Serial.println(result);
}

void loop()
{
}


```

The status bar at the bottom indicates "1" on the left and "Arduino Mega (ATmega1280) on COM5" on the right.



```
File Edit Sketch Tools Help
TIA_control

//http://arduino.cc/en/Tutorial/SFRRangerReader
//http://arduino.cc/en/Reference/WireAvailable
//http://arduino.cc/en/Reference/WireRequestFrom
//http://dsscircuits.com/articles/arduino-i2c-slave-guide.html
#include <Wire.h>

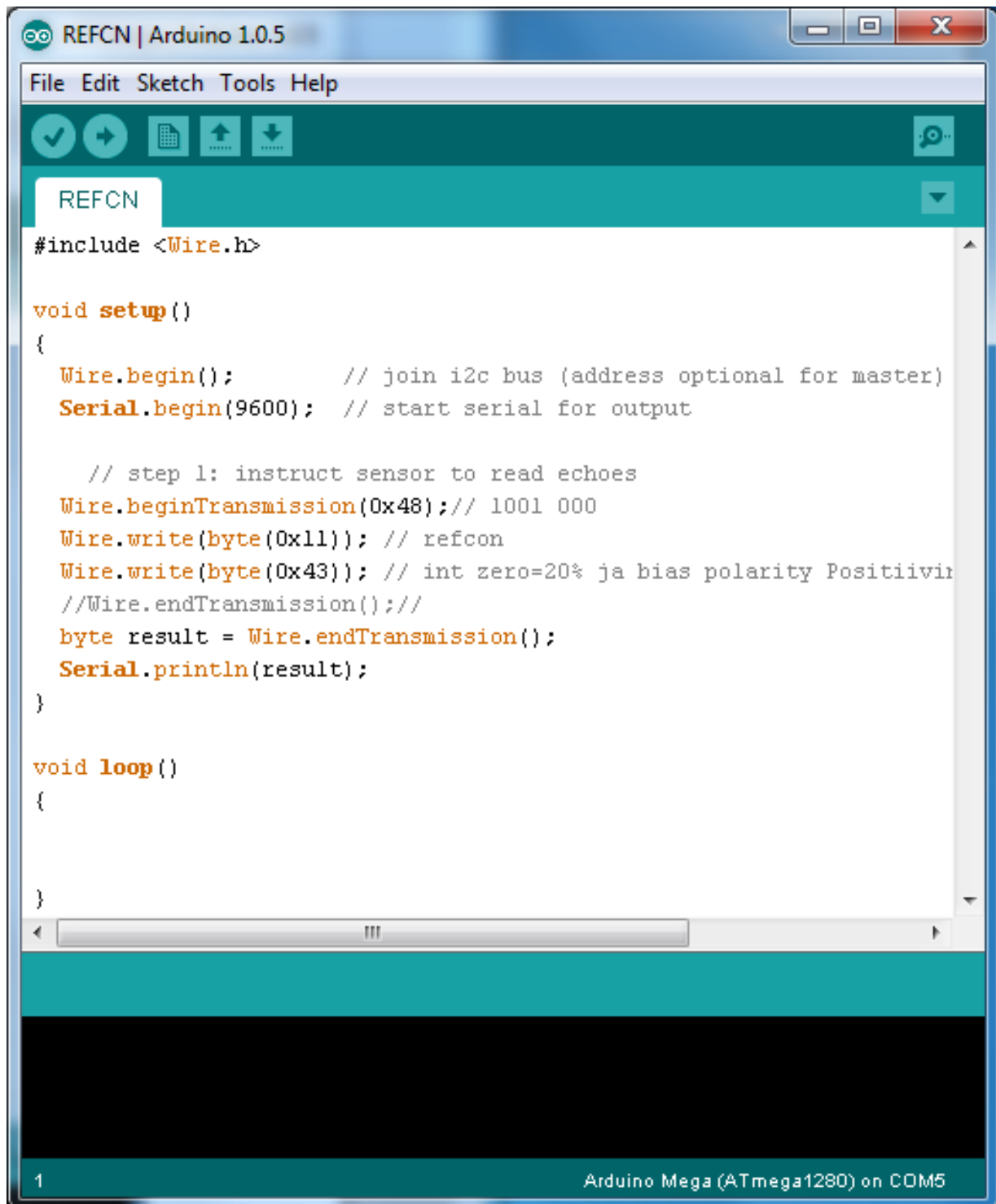
void setup()
{
  Wire.begin();          // join i2c bus (address optional for master)
  Serial.begin(9600);    // start serial for output

  // step 1: instruct sensor to read echoes
  Wire.beginTransmission(0x48); // 1001 000
  Wire.write(byte(0x10)); // TIA control rekisteri
  Wire.write(byte(0x7)); // 00011100 = 350k ja Rload=10 Ohm
  //Wire.endTransmission();
  byte result = Wire.endTransmission();
  Serial.println(result);
}

void loop()
{

```

16 Arduino Mega (ATmega1280) on COM5



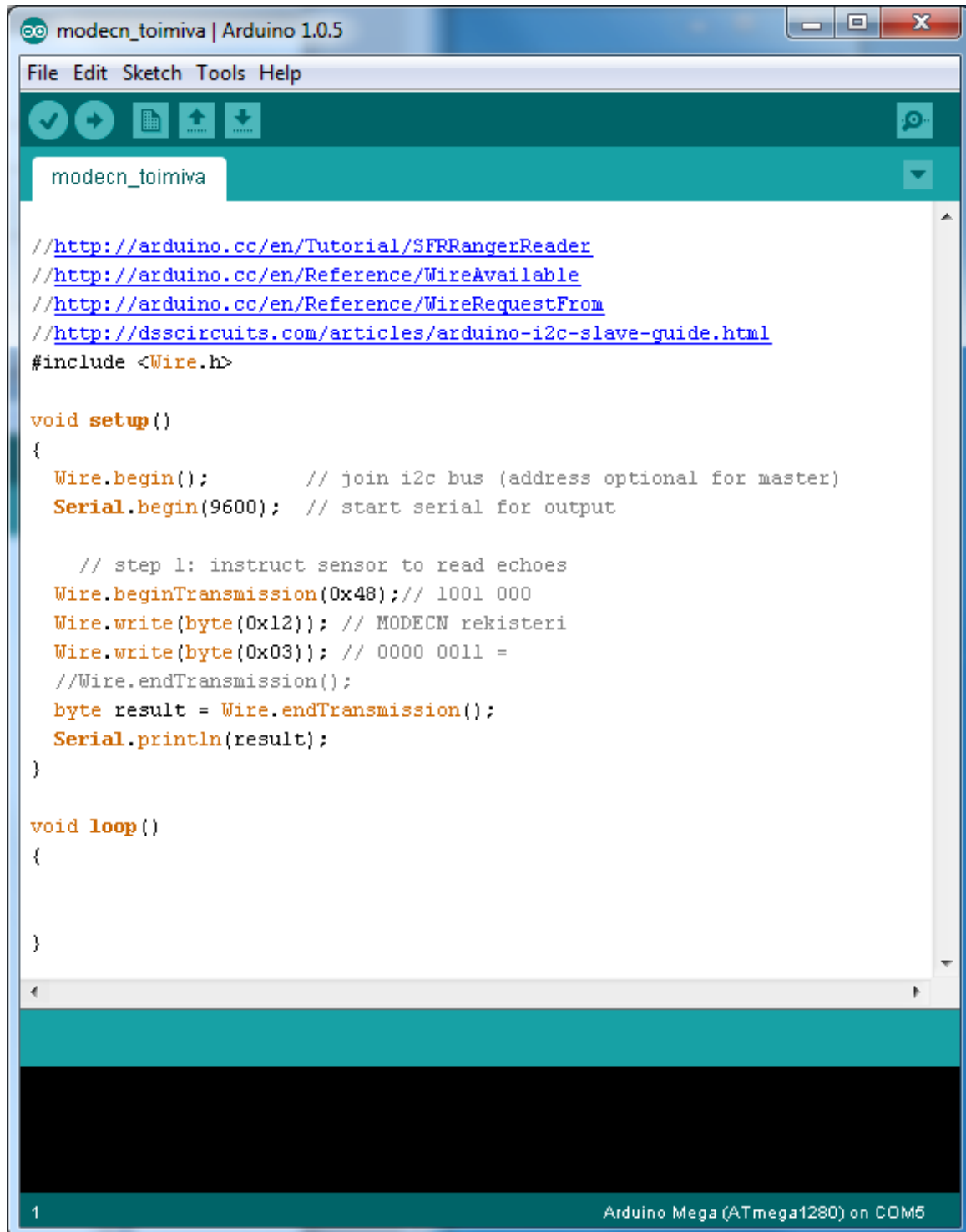
```
REFCN | Arduino 1.0.5
File Edit Sketch Tools Help
REFCN
#include <Wire.h>

void setup()
{
  Wire.begin();          // join i2c bus (address optional for master)
  Serial.begin(9600);    // start serial for output

  // step 1: instruct sensor to read echoes
  Wire.beginTransmission(0x48); // 1001 000
  Wire.write(byte(0x11)); // refcon
  Wire.write(byte(0x43)); // int zero=20% ja bias polarity Positiivinen
  //Wire.endTransmission();//
  byte result = Wire.endTransmission();
  Serial.println(result);
}

void loop()
{
}

1 Arduino Mega (ATmega1280) on COM5
```



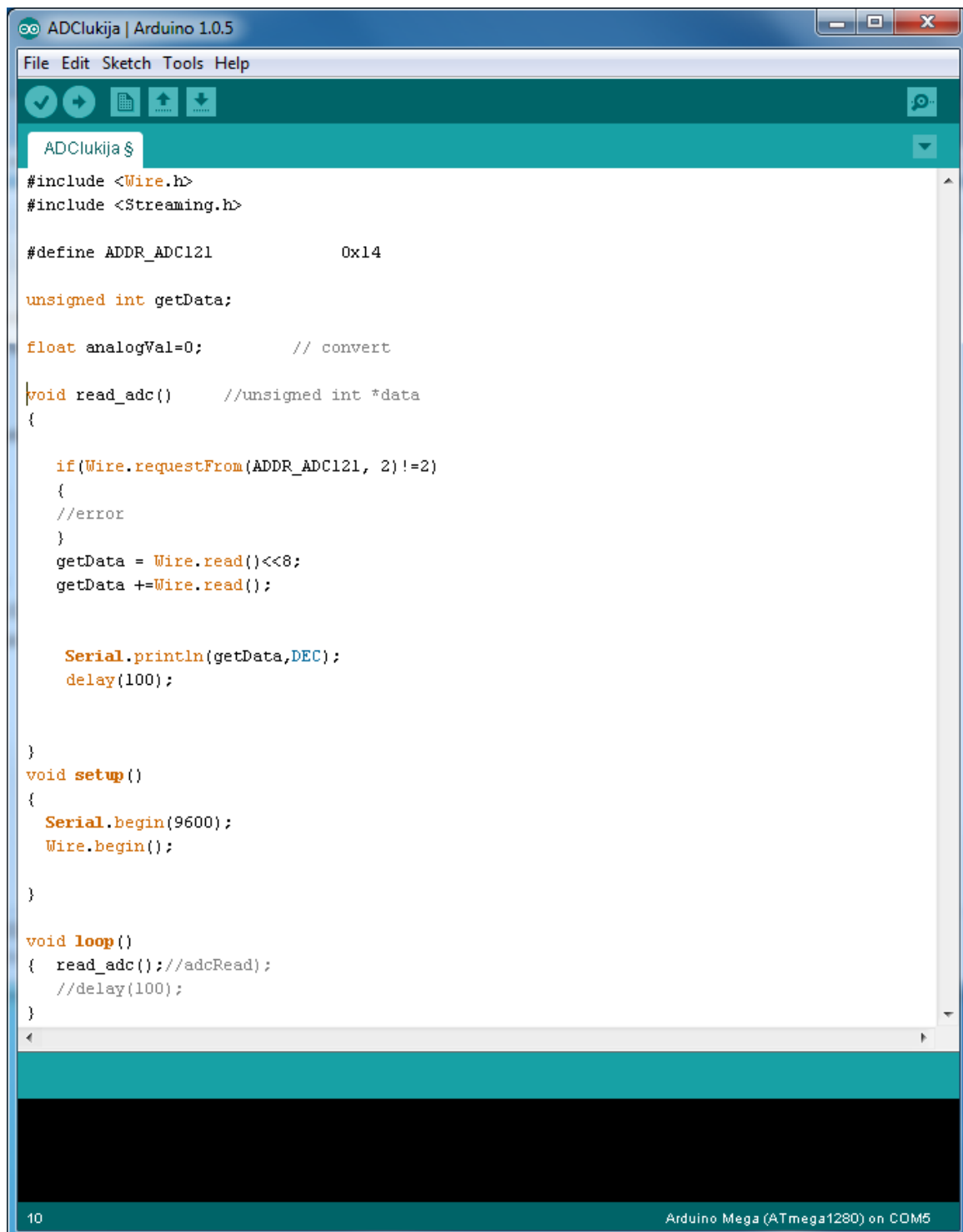
```
modecn_toimiva | Arduino 1.0.5
File Edit Sketch Tools Help
modecn_toimiva
//http://arduino.cc/en/Tutorial/SFRRangerReader
//http://arduino.cc/en/Reference/WireAvailable
//http://arduino.cc/en/Reference/WireRequestFrom
//http://dsscircuits.com/articles/arduino-i2c-slave-guide.html
#include <Wire.h>

void setup()
{
  Wire.begin();          // join i2c bus (address optional for master)
  Serial.begin(9600);    // start serial for output

  // step 1: instruct sensor to read echoes
  Wire.beginTransmission(0x48); // 1001 000
  Wire.write(byte(0x12)); // MODECN rekisteri
  Wire.write(byte(0x03)); // 0000 0011 =
  //Wire.endTransmission();
  byte result = Wire.endTransmission();
  Serial.println(result);
}

void loop()
{
}

1 Arduino Mega (ATmega1280) on COM5
```



```
ADClukija | Arduino 1.0.5
File Edit Sketch Tools Help
ADClukija §
#include <Wire.h>
#include <Streaming.h>

#define ADDR_ADC121      0x14

unsigned int  getData;

float analogVal=0;      // convert

void read_adc()      //unsigned int *data
{
    if(Wire.requestFrom(ADDR_ADC121, 2)!=2)
    {
        //error
    }
    getData = Wire.read()<<8;
    getData +=Wire.read();

    Serial.println(getData,DEC);
    delay(100);
}

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    Wire.begin();
}

void loop()
{
    read_adc();//adcRead);
    //delay(100);
}

10 Arduino Mega (ATmega1280) on COM5
```



## LTC2471/LTC2473

Selectable 250sps/1kps,  
16-Bit  $\Delta\Sigma$  ADCs with 10ppm/ $^{\circ}\text{C}$   
Max Precision Reference

## FEATURES

- 16-Bit Resolution, No Missing Codes
- Internal, High Accuracy Reference—10ppm/ $^{\circ}\text{C}$  (Max)
- Single-Ended (LTC2471) or Differential (LTC2473)
- Selectable 250sps/1kps Output Rate
- 1mV Offset Error
- 0.01% Gain Error
- Single Conversion Settling Time Simplifies Multiplexed Applications
- Single-Cycle Operation with Auto Shutdown
- 3.5mA (Typ) Supply Current
- 2 $\mu\text{A}$  (Max) Sleep Current
- Internal Oscillator—No External Components Required
- $\text{I}^2\text{C}$  Interface
- Small 12-Lead, 3mm  $\times$  3mm DFN and MSOP Packages

## APPLICATIONS

- System Monitoring
- Environmental Monitoring
- Direct Temperature Measurements
- Instrumentation
- Industrial Process Control
- Data Acquisition
- Embedded ADC Upgrades

LTC, LT, LTC, LTM, Linear Technology and the Linear logo are registered trademarks of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners. Protected by U.S. Patents, including 6208279, 6411242, 7088290, 7164378.

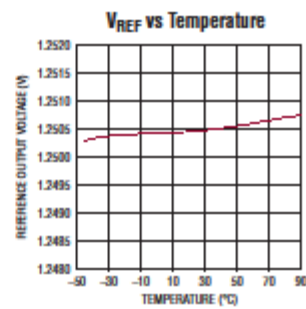
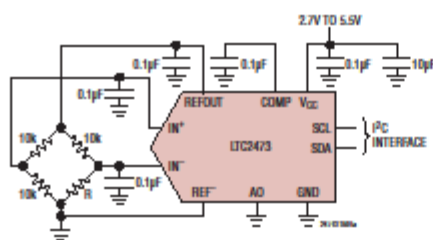
## DESCRIPTION

The LTC<sup>®</sup>2471/LTC2473 are small, 16-bit analog-to-digital converters with an integrated precision reference and a selectable 250sps or 1kps output rate. They use a single 2.7V to 5.5V supply and communicate through an  $\text{I}^2\text{C}$  interface. The LTC2471 is single-ended with a 0V to  $V_{\text{REF}}$  input range and the LTC2473 is differential with a  $\pm V_{\text{REF}}$  input range. Both ADC's include a 1.25V integrated reference with 2ppm/ $^{\circ}\text{C}$  drift performance and 0.1% initial accuracy. The converters are available in a 12-pin DFN 3mm  $\times$  3mm package or an MSOP-12 package. They include an integrated oscillator and perform conversions with no latency for multiplexed applications. The LTC2471/LTC2473 include a proprietary input sampling scheme that reduces the average input current several orders of magnitude when compared to conventional delta sigma converters.

Following a single conversion, the LTC2471/LTC2473 automatically power down the converter and can also be configured to power down the reference. When both the ADC and reference are powered down, the supply current is reduced to 200nA.

The LTC2471/LTC2473 include a user selectable 250sps or 1kps output rate and due to a large oversampling ratio (8,192 at 250sps and 2,048 at 1kps) have relaxed anti-aliasing requirements.

## TYPICAL APPLICATION







LMP91000

www.ti.com

SNAS506H – JANUARY 2011 – REVISED MARCH 2013

## LMP91000 Sensor AFE System: Configurable AFE Potentiostat for Low-Power Chemical Sensing Applications

Check for Samples: [LMP91000](#)

### FEATURES

- Typical Values,  $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Supply Voltage 2.7 V to 5.25 V
- Supply Current (Average Over Time)  $<10 \mu\text{A}$
- Cell Conditioning Current up to 10 mA
- Reference Electrode Bias Current ( $85^\circ\text{C}$ )  $900\text{pA}$  (max)
- Output Drive Current  $750\mu\text{A}$
- Complete Potentiostat Circuit to Interface to Most Chemical Cells
- Programmable Cell Bias Voltage
- Low Bias Voltage Drift
- Programmable TIA gain  $2.75\text{k}\Omega$  to  $350\text{k}\Omega$
- Sink and Source Capability
- I<sup>2</sup>C Compatible Digital Interface
- Ambient Operating Temperature  $-40^\circ\text{C}$  to  $85^\circ\text{C}$
- Package 14 pin WSON
- Supported by WEBENCH® Sensor AFE Designer

### APPLICATIONS

- Chemical Species Identification
- Amperometric Applications
- Electrochemical Blood Glucose Meter

### DESCRIPTION

The LMP91000 is a programmable Analog Front End (AFE) for use in micro-power electrochemical sensing applications. It provides a complete signal path solution between a sensor and a microcontroller that generates an output voltage proportional to the cell current. The LMP91000's programmability enables it to support multiple electrochemical sensors such as 3-lead toxic gas sensors and 2-lead galvanic cell sensors with a single design as opposed to the multiple discrete solutions. The LMP91000 supports gas sensitivities over a range of  $0.5 \text{ nA/ppm}$  to  $9500 \text{ nA/ppm}$ . It also allows for an easy conversion of current ranges from  $5\mu\text{A}$  to  $750\mu\text{A}$  full scale.

The LMP91000's adjustable cell bias and transimpedance amplifier (TIA) gain are programmable through the I<sup>2</sup>C interface. The I<sup>2</sup>C interface can also be used for sensor diagnostics. An integrated temperature sensor can be read by the user through the VOUT pin and used to provide additional signal correction in the  $\mu\text{C}$  or monitored to verify temperature conditions at the sensor.

The LMP91000 is optimized for micro-power applications and operates over a voltage range of 2.7V to 5.25V. The total current consumption can be less than  $10\mu\text{A}$ . Further power savings are possible by switching off the TIA amplifier and shorting the reference electrode to the working electrode with an internal switch.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

WEBENCH is a registered trademark of Texas Instruments.  
All other trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA Information is current as of publication date.  
Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 2011–2013, Texas Instruments Incorporated