

# I<sup>2</sup>C-VÄYLÄ: OMINAISUUDET JA MITTAUKSET

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tekniikan ala  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Opinnäytetyö  
Syksy 2009  
Mika Karhu

Lahden ammattikorkeakoulu  
Tekniikan ala

KARHU, MIKA: I<sup>2</sup>C-väylä: ominaisuudet ja mittaukset

Tietotekniikan koulutusohjelma 31 sivua

Syksy 2009

## TIIVISTELMÄ

---

Opinnäytetyön aiheena on tutkia sarjamuotoisen tiedonsiirtoväylän I<sup>2</sup>C ominaisuuksia, perehtyä sen tiedonsiirron protokollaan ja suorittaa mittauksia väylällä todentaakseen teorian tiedon käytännössä.

Työssä on esitetty I<sup>2</sup>C-väylän yleisiä ominaisuuksia ja näiden vaikutusta laitesuunnittelijoiden ja valmistajien näkökulmiin. Työ käsittelee elektroniikan komponenttien liittämistä I<sup>2</sup>C-väylälle ja väylän muiden ominaisuuksien muuttamista komponenteilla. Väylän tiedonsiirtoa käytännön tasolla on pyritty havainnollistamaan c-kielisen ohjelmointiesimerkin avulla.

Suoritetuilla mittauksilla todettiin tiedonsiirron protokollan paikkansapitävyys. Olennaista mittauksissa oli huomata mittalaitteiden tehokkuus ja käytettävyys esimerkiksi vikatiloja etsittäessä. Mittauksissa käytetty oskilloskooppi tuntee I<sup>2</sup>C-väylän ja monen muun tiedonsiirtotavan protokollat.

Opinnäytetyö on nostanut tekijän ammattitaitoa huomattavasti tiedonsiirtoon liittyen. Yhden tiedonsiirtoprotokollan opittua on helppoa sisäistää muidenkin tiedonsiirtotapojen ominaisuudet.

Avainsanat: I<sup>2</sup>C-väylä, tiedonsiirto, SDA-linja, SCL-linja

Lahti University of Applied Sciences  
Faculty of Technology

KARHU, MIKA: I<sup>2</sup>C-bus: features and measurements

Bachelor's Thesis in information Tecnology 31 pages

Fall 2009

## ABSTRACT

---

The subject of this thesis is to examine a serial data line called I<sup>2</sup>C, become familiar with its data transfer protocol and perform some measurements with the I<sup>2</sup>C-bus to apply the theory into practice.

The thesis presents some common features of I<sup>2</sup>C-bus and the way those features affect a designer's work. The thesis also discusses fastening electronic components to the I<sup>2</sup>C-bus and modifying its features by using electronic components. Some data transmission coding is demonstrated by using c programming.

Measurement results show that the data transfer protocol of the I<sup>2</sup>C-bus works well. It was essential to notice that an oscilloscope was very efficient when you need to find for example error conditions in the device. The Oscilloscope used in the measurements knows the protocol of I<sup>2</sup>C and many other data transfer protocols.

This thesis has improved the author's skills in the area of data transfer. When you learn one data transfer protocol, it is much easier to learn some other protocols.

Key words: I<sup>2</sup>C-bus, data transmission, SDA line, SCL line

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	I <sup>2</sup> C-VÄYLÄN OMINAISUUDET	2
2.1	Väylän historiaa	2
2.2	Väylän yleisiä ominaisuuksia	3
2.3	I <sup>2</sup> C laitesuunnittelijan näkökulmasta	4
2.4	I <sup>2</sup> C laitevalmistajan näkökulmasta	5
3	LAITTEIDEN ELEKTRONINEN KYTKENTÄ I <sup>2</sup> C-VÄYLÄLLE	6
3.1	Orjalaitteen kytkeytyminen	6
3.1.1	Orjalaitteen kytkentäjalat	6
3.1.2	Osoitepinnien asetus	7
3.1.3	Orjalaitteen elektroninen kytkentä	8
3.1.4	Suojavastukset	8
3.2	Ylösvetovastusten mitoitus	9
3.3	Eri logiikkatasot samalle väylälle	11
3.4	Väylän pituuden kasvattaminen	13
4	TIEDONSIIRRON PROTOKOLLA	14
4.1	Datalinjan vaatimukset	14
4.2	START- ja STOP-ehto	14
4.3	Kuittausbitti	15
4.4	Vastaanottajan osoite	16
4.5	Lähetys- ja vastaanottotavat	17
4.6	Multi-Master-toiminta	18
4.6.1	Kellon synkronointi	18
4.6.2	Sovittelu	19
4.7	Tiedonsiirron ohjelmointiesimerkki	19
5	I <sup>2</sup> C-VÄYLÄN MITTAUKSET	22
5.1	Mittauslaitteisto ja mittauskohde	22
5.2	Mittausten merkitys	23
5.3	Mittaustulokset	24
6	YHTEENVETO	29
	LÄHTEET	31

## LYHENNELUETTELO

ACK	Acknowledge. Kuittaus.
CAN	Controller Area Network. Sarjaliitäntä.
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor.
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory. Sähköisesti tyhjennettävä, uudelleen ohjelmoitava lukumuisti.
EMI	Electromagnetic interference. Sähkömagneettinen häiriö.
ESD	Electrostatic discharge. Staattinen sähköpurkaus, kipinäpurkaus.
GND	Ground. Maataso.
MSB	Most Significant Bit. Eniten merkitsevä bitti.
NACK	Not acknowledge. Ei kuitattu.
NMOS	N-type Metal Oxide Semiconductor.
RS-232	Recommended Standard. Sarjaliitäntä.
SCL	Serial clock line. Sarjamuotoinen kellosignaali- väylä.
SDA	Serial data line. Sarjamuotoinen tiedonsiirtoväylä.
SPI	Serial Peripheral interface. Tiedonsiirtoväylä.
TWCR	Two-Wire Control Register. Kontrollirekisteri.
TWDR	Two-Wire Address/Data shift register. Osoitteen/datansiirtorekisteri.
TWEN	Two-Wire Enable. Kontrollirekisterin sisältämä TWI-väylän käytön mahdollistava enable-bitti.
TWI	Two-wire serial interface. Atmel:n käyttämä nimitys I <sup>2</sup> C-väylästä.
TWINT	Two-Wire Interrupt flag. Kontrollirekisterin sisältämä keskeytyslip- pu-bitti
TWSR	Two-Wire Status Register. Tilarekisteri.
TWSTA	Two-Wire Start. Kontrollirekisterin sisältämä start-bitti.
TWSTO	Two-Wire Stop. Kontrollirekisterin sisältämä stop-bitti
USB	Universal Serial Bus. Sarjaväyläarkkitehtuuri.
V <sub>DD</sub>	Voltage drain drain. Käyttöjännite.

# 1 JOHDANTO

Tiedonsiirtoon elektroniikan komponenttien kuten, mikro-ohjainten, muistipiirien, antureiden yms., välillä käytetään joko rinnakkais- tai sarjamuotoista tiedonsiirtoa. Rinnakkaisessa tiedonsiirrossa siirretään useampi bitti rinnakkain ja samanaikaisesti komponentilta toiselle. Sarjamuotoisessa bitit siirretään jonossa. Rinnakkaisesta tiedonsiirtoa on käytetty sovelluksissa, jotka vaativat erittäin nopeaa tiedonsiirtoa, kuten piirilevyllä sijaitsevien komponenttien liittämistä toisiinsa tai esimerkiksi tietokoneen liittämistä tulostimeen, jolloin siirrettävän tiedon määrä on suuri. Tekniikan jatkuvan kehityksen ansiosta myös sarjamuotoinen tiedonsiirto on nopeutunut vuosi vuodelta. Tiedonsiirto sarjamuodossa onkin kasvattanut suosiotaan laitevalmistajien keskuudessa, eräs syy tähän on laitteiden helppo liitettävyyss tiedonsiirron ollessa sarjamuotoista.

Philipsin kehittämä I<sup>2</sup>C-väylä on sarjamuotoinen, kaksijohtiminen, synkroninen tiedonsiirtoväylä. I<sup>2</sup>C-väylä tunnetaan myös nimillä IIC-väylä (Inter-Integrated Circuit bus) tai I2C. Piirivalmistajat saattavat käyttää myös omia nimityksiä väylästä, esimerkiksi Atmel käyttää piiriensä datasiivuilla nimitystä TWI (Two-wire Serial Interface). Väylän tiedonsiirtonopeuden kehitys on ollut huomattavaa, ja mm. tämä on tehnyt sarjamuotoisesta I<sup>2</sup>C-väylästä varteenotettavan vaihtoehdon laitevalmistajien sovelluksissa.

Tässä opinnäytetyössä selvitetään I<sup>2</sup>C-väylän yleiset ominaisuudet ja selvitetään väylällä tapahtuva tiedonsiirtoprotokolla. Yleiset ominaisuudet, kuten väylän pituus ja tiedonsiirtonopeus, kertovat jo elektroniikkasuunnittelijalle, onko väylä käyttökelpoinen sovelluksen tarpeisiin. Väylän käytännönläheisyyttä tuodaan esille kytkentäesimerkkien ja ohjelmointiesimerkin avulla. Mittaustöissä pyritään toteamaan väylän tiedonsiirron toimivuus ja toteamaan käytetyn mittauslaitteen käytännöllisyys ja mahdollisuudet tiedonsiirron tutkinnassa.

## 2 I<sup>2</sup>C-VÄYLÄN OMINAISUUDET

### 2.1 Väylän historiaa

I<sup>2</sup>C-väylä kehitettiin 1980-luvun alussa Philips Semiconductorsin toimesta. Tuotekehitys tehtiin Philipsin laboratoriossa Eindhovenissa Alankomaissa. Väylän tarkoitus oli helpottaa oheislaitteiden liittämistä massatuotantolaitteisiin, kuten TV:n, videon ja audiolaitteiden kytkennöissä. Näissä laitteissa rinnakkaisuuden tiedonsiirto oheislaitteiden kytkemiseksi ei ollut hyvä vaihtoehto. Tarvittaisiin suuri määrä johdotuksia data- ja osoiteväyliä varten unohtamatta osoitekoodausta ja liitännäselektroniikkaa. Sarjamuotoisen I<sup>2</sup>C-väylän ansiosta säästettiin huomattavasti komponentteja, materiaaleja ja valmistuskustannuksia, myös kuluttajat saivat edullisemman tuotteen. Tuotteesta tuli myös sähkömagneettisten häiriöiden (EMI) ja staattisten sähköpurkausten (ESD) kannalta käyttövarmempi tuote. (NXP Semiconductors 2007c, 1 - 3; Koskinen 1999, 286; ESAcademy, 2000)

Nykypäivänä I<sup>2</sup>C-väylä on laajalti käytössä kulutuselektroniikan lisäksi auto- ja teollisuuselektroniikan sovelluksissa (Koskinen 1999, 286). Väylää käyttävät useat johtavat piirivalmistajat, kuten Intel, Texas Instruments, Xicor, Atmel, Maxim ja monet muut.

Väylän kehitys:

1982	Ensimmäinen julkaisu.
1992	Versio 1.0.
1998	Versio 2.0 I <sup>2</sup> C-väylästä on muodostunut maailmanstandardi, joka löytyy yli 1000 erilaisesta IC-piiristä ja on yli 50 piirivalmistajan lisensioima. Vuoden 1998 sovellukset vaativat korkeampia väylänopeuksia ja pienempiä jännitteitä, versio 2.0 päivitettiin vastaamaan näitä vaatimuksia.
2000	Versio 2.1
2000-2006	Julkaistu erilaisia muunnelmia.

2007

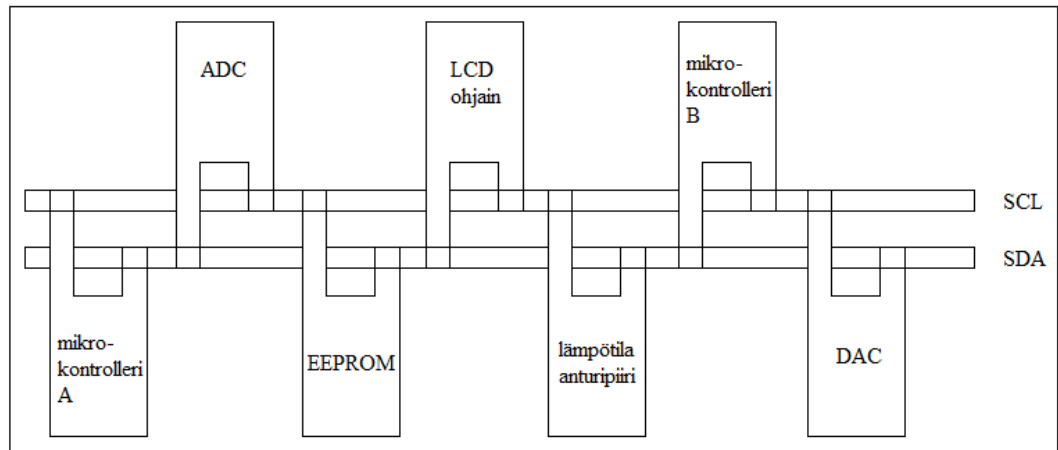
Versio 03 Väylästä valmistettiin entistä nopeampi vastaamaan sovellusten vaatimuksia. Fast-mode plus esiteltiin. (NXP Semiconductors 2007c, 2.)

## 2.2 Väylän yleisiä ominaisuuksia

I<sup>2</sup>C-väylä on 2-johtiminen, sykroninen kaksisuuntainen (bidirectional) sarjaväylä. Väylällä tapahtuvaan liikennöintiin tarvitaan maajohtimen lisäksi vain kaksi johdinta: SDA (serial data line), jonka kautta varsinaiset tietobitit siirretään, ja SCL (serial clock line) -kellopulsulinja, jonka tahdistamana tietobitit siirretään. Väylällä kommunikoivat laitteet on jaettu isäntä- (master) ja orjalaitteiksi (slave). Isäntälaitteet voivat aloittaa tiedonsiirron, tähän eivät orjalaitteet pysty. Sen sijaan niin isäntä kuin orjakin pystyvät lähettämään ja vastaanottamaan tietoa. Jokaisella orjalaitteella on osoite, jota isäntä kutsuu aloittaakseen tiedonsiirron ko. laitteen kanssa. Väylän tiedonsiirtoa käsitellään tarkemmin I<sup>2</sup>C-tiedonsiirtoprotokollan esittelyssä. (NXP Semiconductors 2007c, 1 - 3; Koskinen 1999, 286 - 287.)

Väylä on multi-master-tyyppinen, eli väylää voi isännöidä useampi kuin yksi laite. Multi-master-toiminta tuo tullessaan virhemahdollisuuden, jos useampi isäntä yrittää lähettää tietoa samaan aikaan. Tätä varten väylälle on kehitetty törmäyksestä tunnistus (collision detection), jonka ansiosta väylä osaa toipua törmäystilanteesta säilyttäen lähetettävän tiedon alkuperäisenä. (NXP Semiconductors 2007c, 3.) Kuviossa 1 on esitetty periaate laitteiden liittymisestä I<sup>2</sup>C-väylään.





KUVIO 1. Esimerkki kahden mikrokontrollerin isännöimästä I<sup>2</sup>C-väylästä

Väylälle kytkettävien laitteiden määrää rajoittaa vain väylän korkein kuormituskapasitanssi, joka on 400 pF sisältäen linjan johtimen ja kytkennät (Koskinen 1999, 287). Tämä kapasitanssi rajoittaaakin väylän pituuden muutamiin metreihin. Kapasitanssia voidaan kuitenkin nostaa I<sup>2</sup>C-väylän pidenninpiirillä P82B715. Pidenninpiiri nostaa kuormituskapasitanssin 3000 pF:iin.

I<sup>2</sup>C-väylän tiedonsiirtonopeus on normaalissa toimintatilassa (normal mode) 100 Kb/s ja nopeassa toimintatilassa (fast-mode) 400 Kb/s. Sovellusten vaatiessa yhä vain nopeampaa tiedonsiirtoa kehitettiin väylää vielä nopeammaksi: Fast-mode Plus (Fm+) siirtää tietoa 1 Mb/s ja nopein High-speed mode siirtää tietoa jo 3,4 Mb/s vauhtia. (NXP Semiconductors 2007c, 3.)

### 2.3 I<sup>2</sup>C laitesuunnittelijan näkökulmasta

Väylä antaa tiettyjä etuisuuksia ja helpotuksia laitesuunnittelijalle. Suunnittelussa lohkoakaaviosta siirtyminen varsinaiseen piirikaavioon on helppoa koska piirien toisiinsa kytkeminen ei tarvitse monijohtimisia väyliä eikä liitänätäelektroniikkaa. Laitteen mikrotietokoneeseen ei myöskään tarvitse suunnitella osoitekoodausta. Integroitu osoite- ja datalähetysprotokolla sallii sovellusten olla täysin ohjelmallisesti määriteltyjä. (NXP Semiconductors 2007c, 6.)

Ehkä suurimman edun antaa I<sup>2</sup>C-väylällä varustettujen piirien vapaa lisääminen ja poistaminen laitekokonaisuudesta tämän vaikuttamatta laitteen muuhun toimintaan. Eri tekniikan omaavia piirejä, esim. CMOS, NMOS, bipolaari yms., voidaan myös vapaasti käyttää samassa kokonaisuudessa. (Koskinen 1999, 287.)

Väylän hyöty on myös kiistaton piirilevysuunnittelussa monijohtimisten osoite- ja dataväylien jäädessä pois.

#### 2.4 I<sup>2</sup>C laitevalmistajan näkökulmasta

Väylän 2-johtiminen tekniikka vähentää IC-piirien kytkejäjalkojen (pin) määrää huomattavasti, 2-johtiminen tekniikka myös pienentää IC-piirien fyysistä kokoa huomattavasti, myös aikaisemmin mainittu piirilevyjohtimien vähäisyys vaikuttaa suotuisasti laitevalmistajan kustannuksiin ja resursseihin. Osoitekooderit ja liimalogiikka (glue logic), jolla eri ohjaussignaalioperaatioilla toimivat piirit yhdistetään toisiinsa, ovat myös tarpeettomia I<sup>2</sup>C-väylän tekniikassa. Laitteen vianhaku on yksinkertaista sillä jokainen kytkentä väylällä voidaan tutkia ohjelmallisesti. (NXP Semiconductors 2007c, 5.)

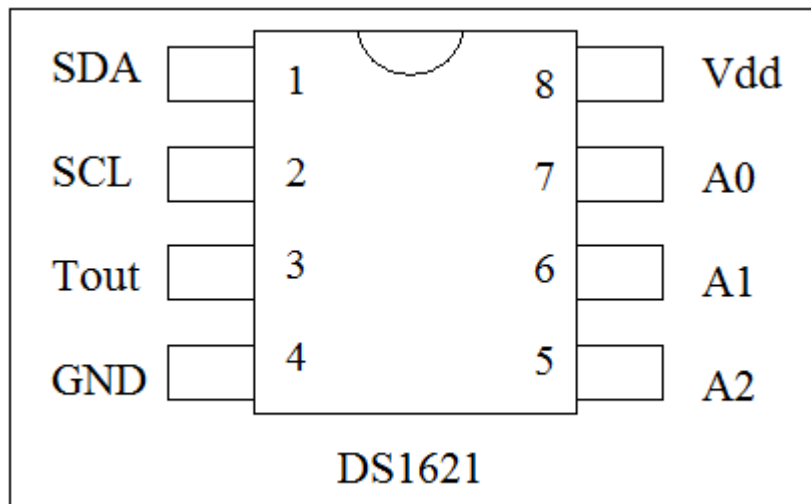
### 3 LAITTEIDEN ELEKTRONINEN KYTKENTÄ I<sup>2</sup>C-VÄYLÄLLE

#### 3.1 Orjalaitteen kytkeytyminen

Orjalaitteen kytkemiseksi I<sup>2</sup>C-väylälle kannattaa hankkia komponentin datasivut, jotka varmimmin löytyvät komponenttivalmistajan tai jälleenmyyjän WWW-sivuilta. Datasivuilta löytyvät kaikki tärkeät ja tarpeelliset tiedot, kuten komponentin kytkentäjalkajärjestys, laitteen osoitteen muodostus isäntälaitteelle ja komponentin kapasitanssi.

##### 3.1.1 Orjalaitteen kytkentäjalat

Tarkastellaan seuraavassa esimerkkitapauksessa Maximin valmistamaa lämpötila-anturipiiriä DS1621. Kuviossa 2 on kuvattu komponentin jalkajärjestys.



KUVIO 2. Lämpötila-anturi DS1621:n jalkajärjestys

Kytkeäjäalkojen selitys:

SDA        Serial Data Input/Output

SCL        Serial Clock Line

Tout        Thermostat Output Signal, anturia voidaan käyttää termostaattina, tämä pinni termostaattitoiminnon ulostulo

GND	Ground, maa
A2, A1, A0	Chip Address Input, osoite pinnit
Vdd	Power Supply Voltage, piirin käyttöjännite (Dallas Semiconductor).

### 3.1.2 Osoitepinnien asetus

Orjalaitteiden osoite muodostuu seitsemästä bitistä, joista neljä ensimmäistä eniten merkitsevää (MSB) on kiinteitä komponenttivalmistajan antamia. Kolme seuraavaa on käyttäjän itse aseteltavissa osoitepinnien avulla kytkemällä pinni joko maahan tai käyttöjännitteeseen. Tavun viimeinen bitti on tiedonsuuntabitti joka kertoo, luetaanko vai kirjoitetaanko orjalaitteelle. 7-bittinen osoite mahdollistaa 128:n orjalaitteen kytkemisen väylälle. Väylä on laajennettavissa 10-bittiseksi, jolloin osoitemahdollisuuksia on 1024. (Koskinen 1999, 287 - 289.)

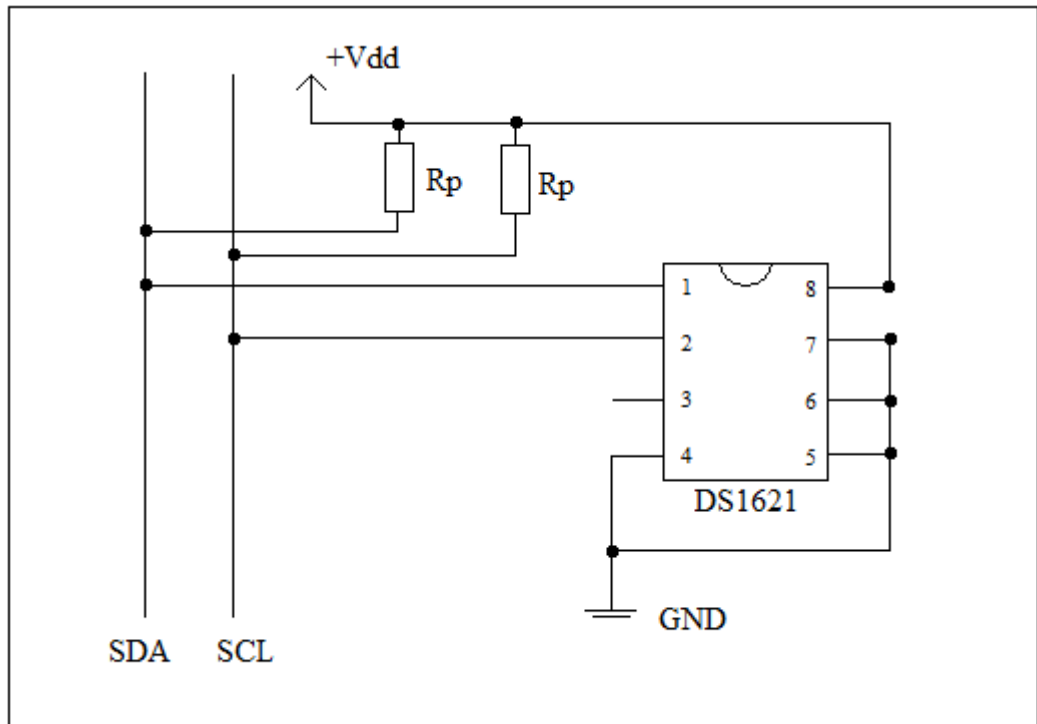
Anturipiiri DS1621:lle valmistaja on antanut kiinteiksi osoitebiteiksi 1001. Seuraavat bitit käyttäjä voi asettaa itse (Dallas Semiconductor). Jokainen osoitepinni on syytä kuitenkin kytkeä joko maahan tai käyttöjännitteeseen, muuten osoitepinnin arvo voi olla mitä tahansa näiden potentiaalien väliltä ja sekoittaa osoitteen. Taulukosta 1 nähdään, että samalle I<sup>2</sup>C-väylälle voidaan vaivattomasti kytkeä kahdeksan DS1621-anturipiiriä, osoitemahdollisuuksia on kahdeksan.

TAULUKKO 1. Osoitteen asetus osoitepinnien arvoilla

osoite des.	osoite hex	osoite bin	A2	A1	A0
72	48	1001000	GND	GND	GND
73	49	1001001	GND	GND	Vdd
74	4A	1001010	GND	Vdd	GND
75	4B	1001011	GND	Vdd	Vdd
76	4C	1001100	Vdd	GND	GND
77	4D	1001101	Vdd	GND	Vdd
78	4E	1001110	Vdd	Vdd	GND
79	4F	1001111	Vdd	Vdd	Vdd

### 3.1.3 Orjalaitteen elektroninen kytkentä

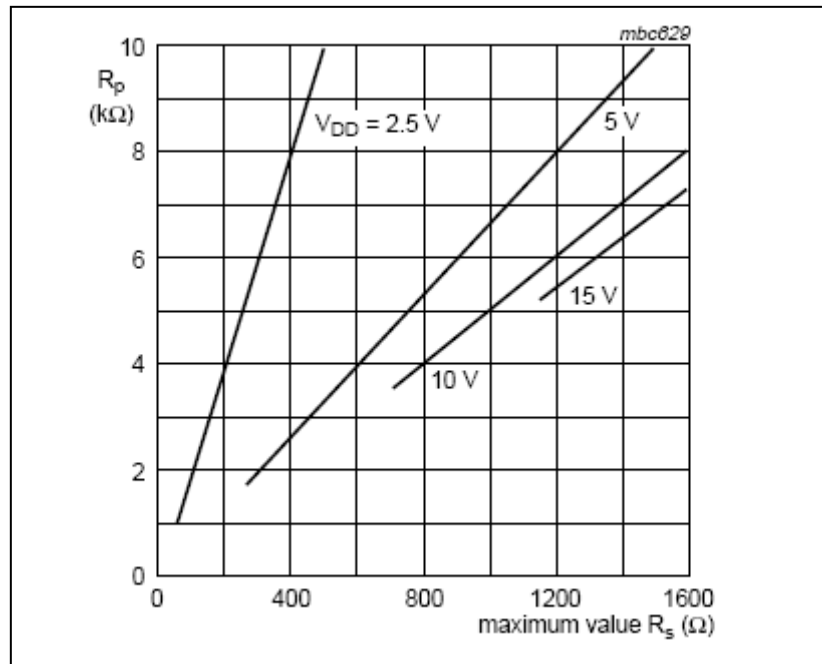
$I^2C$ -väylän molemmat linjat, SDA ja SCL, tulee kytkeä positiiviseen käyttöjännitteeseen ylösvetovastuksilla ( $R_p$ ). Vastusten mitoitus käsitellään myöhemmin omissa luvussaan. Kuviossa 3 on esitetty DS1621:n kytkentä  $I^2C$ -väylälle.



KUVIO 3. Anturipiiri DS1621:n kytkentä  $I^2C$ -väylälle

### 3.1.4 Suojavastukset

Kytettävä piiri voidaan halutessa suojata väylän mahdollisilta jännitepiikeiltä vastuksilla, jotka kytketään piirin ja molempien linjojen väliin. Suojavastusten mitoitus riippuu käytettävistä ylösvetovastuksista ja käyttöjännitteestä. (NXP semiconductors 2007c, 46.)



KUVIO 3. Suojavastusten ( $R_s$ ) maksimi-arvo ylösvetovastusten ( $R_p$ ) funktiona (NXP Semiconductors UM 2007c, 46)

### 3.2 Ylösvetovastusten mitoitus

I<sup>2</sup>C-väylän komponenttien lähdöt ovat avokollektorityyppisiä (open drain), eli ne eivät pysty syöttämään virtaa, ainoastaan 'imemään'. Tämän takia molemmat linjat, SDA ja SCL, on kytketty positiiviseen käyttöjännitteeseen ylösvetovastuksilla.

Ylösvetovastuksien maksimi-arvoon vaikuttaa linjan kapasitanssi ( $C_b$ ) ja linjanopeudesta riippuva signaalin nousuaika ( $t_r$ ) eli aika, joka kuluu 'loogisen 0':n vaihtumisesta 'loogiseksi 1':ksi. Nousuaika normaali toimintatilassa (normal mode) on 1000 ns, nopeassa toimintatilassa (fast mode) 300 ns ja fast mode plus:ssa 120 ns. (NXP Semiconductors 2007c, 37, 42.)

I<sup>2</sup>C-väylän jänniterajat, jotka ymmärretään '1':ksi ja '0':ksi, ovat seuraavat:

$$\text{'0':n jänniteraja } V_{IL} = 0.3 * V_{DD}$$

$$\text{'1':n jänniteraja } V_{IH} = 0.7 * V_{DD}$$

Ylösvetovastusten mitoitus johdetaan RC-piirin kaavasta:

$$V(t_1) = 0.3 * V_{DD} = V_{DD} \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{RC}} \right)$$

josta saadaan  $t_1 = 0.3566749 * RC$

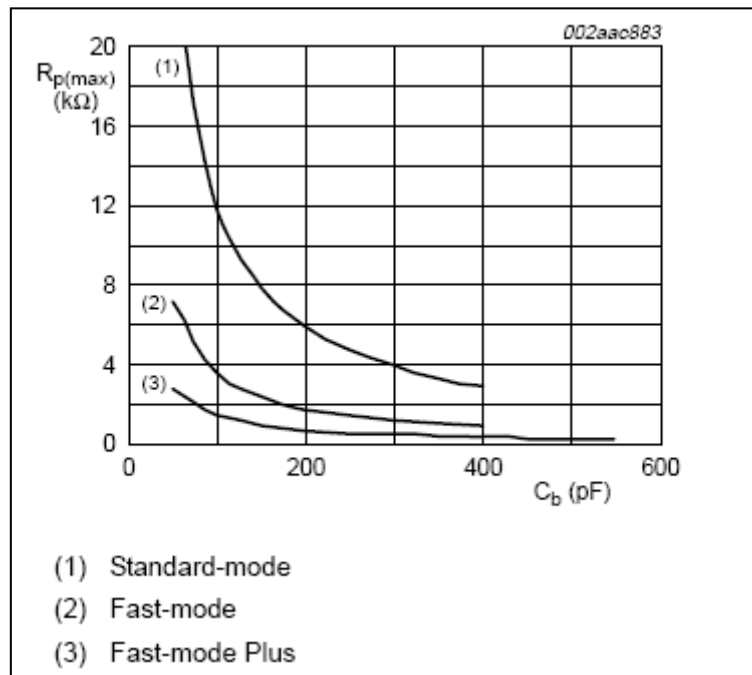
$$V(t_2) = 0.7 * V_{DD} = V_{DD} \left( 1 - e^{-\frac{t_2}{RC}} \right)$$

josta saadaan  $t_2 = 1.2039729 * RC$

Signaalin nousuaika:  $T = t_2 - t_1 = 0.8473 * RC$

Ylösvetovastuksen maksimikoko voidaan nyt laskea kaavasta:

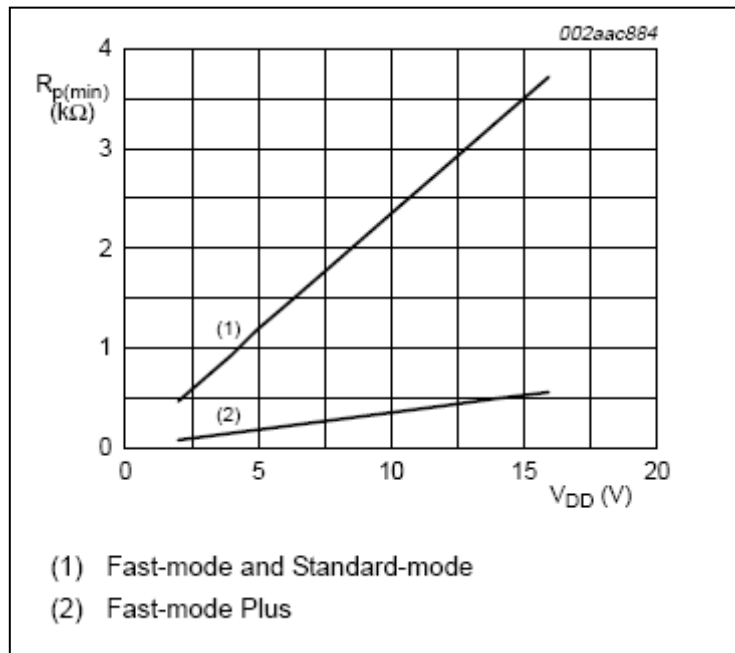
$$R_{p(\max)} = \frac{t_r}{0.8473 * C_b}$$



KUVIO 4. Ylösvetovastuksen maksimiarvo väylän kapasitanssin funktiona (NXP Semiconductors 2007c, 43)

Ylösvetovastusten minimiarvo määräytyy käyttöjännitteen ( $V_{DD}$ ), 'nollan' maksimi ulostulojännitteen ( $V_{OL}$ ) ja ulostulovirran ( $I_{OL}$ ) arvon mukaan. 'Nollan' maksimi ulostulojännite on 0,4 voltia käyttöjännitteen ollessa yli 2 voltia ja 0.2-kertainen käyttöjännitteen suhteen sen ollessa alle 2 voltia. Minimiulostulovirrat ( $I_{OL}$ ) ovat 3 mA standard- ja fast-mode-nopeuksilla ja 20 mA fast-mode-nopeudella. (NXP semiconductors 2007c, 43.) Vastuksen minimiarvo voidaan laskea kaavasta:

$$R_{p(\min)} = \frac{V_{DD} - V_{OL(\max)}}{I_{OL}}$$



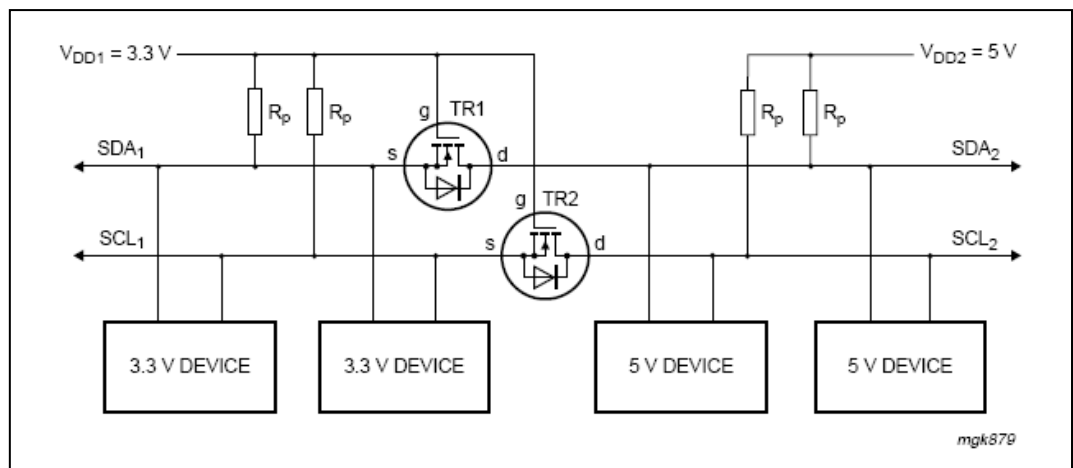
KUVIO 5. Ylösvetovastuksen minimiarvo käyttöjännitteen funktiona (NXP Semiconductors 2007c, 43)

### 3.3 Eri logiikkatasot samalle väylälle

Kytettäessä eri käyttöjännitteet ja erilaiset logiikkatasot omaavia piirejä samalle väylälle (esim 3.3 V ja 5 V) tarvitaan tasovaihdinta (level shifter). Ehkä yksinkertaisin level shifter -kytkentä saadaan aikaiseksi MOSFET-transistorien avulla, joilla erotetaan kaksi erilaiset jännitteet omaavaa lohkoa.



Kytkenässä käytetään N-avaustyyppin MOSFET:a, jonka hila (gate) on kytketty alempaan käyttöjännitteeseen (3.3 v), lähde (source) on kytketty alemman jännitelohkon linjoihin ja nielu (drain) on kytketty ylemmän jännitelohkon linjoihin. (NXP Semiconductors 2007a, 3 - 4.)



KUVIO 6. I<sup>2</sup>C-väylän Shift level kytkentä (NXP Semiconductors 2007a, 4)

Shift level -kytkennän toiminta voidaan jakaa kolmeen tilaan:

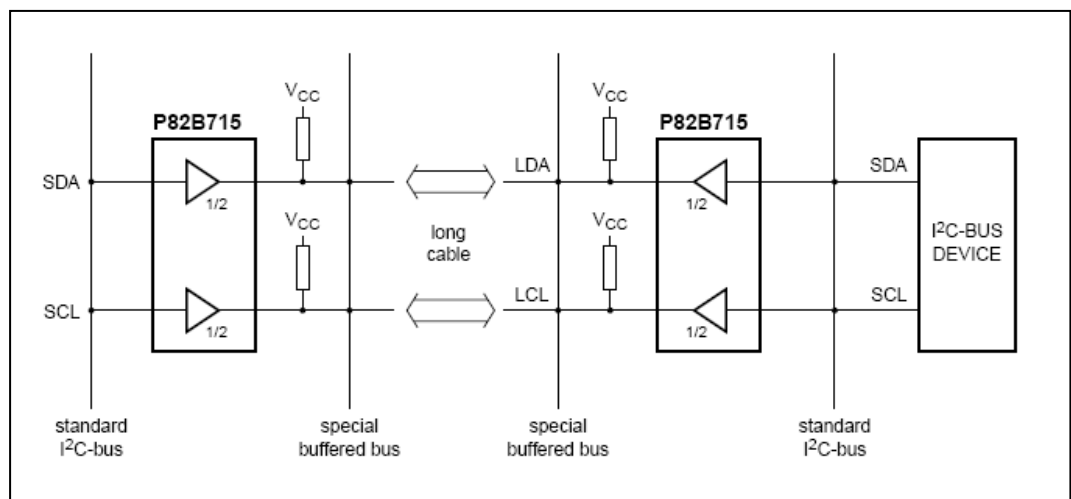
1. Väylän ollessa vapaa, eli mikään laite ei vedä väylän signaalia alas on transistorien hila ja lähde -jännitteet 3.3 voltia jolloin, transistorit eivät johda. Tämän ansiosta myös ylemmän jännitelohkon linjat ovat ylätilassa, molemmat lohkot omilla jännitteillään. (NXP Semiconductors 2007a, 4.)
2. Jos alemman jännitelohkon linja vedetään alas, myös transistorin lähde on alatilassa, jolloin hila-lähde -jännite ( $V_{GS}$ ) kasvaa yli transistorin pitojännitteen (tyypillisesti 0.8 V) ja transistori alkaa johtaa, jolloin myös ylemmän jännitelohkon linja menee alas (NXP Semiconductors 2007a, 4.)

3. Jos ylemmän jännitelohkon linja vedetään alas, on transistorin nielu-substraattidiodi vedetty myös alas ja transistori alkaa johtaa ja näin myös alemman jännitelohkon linja on alatilassa (NXP Semiconductors 2007a, 4).

### 3.4 Väylän pituuden kasvattaminen

Eräs esittelyn arvoinen asia käsiteltäessä I<sup>2</sup>C-väylää on väylän pituuden kasvattaminen. Väylän omalla kapasitanssilla päästään muutaman metrin siirtoetäisyyksiin. Väylän kapasitanssi on 400 pF ja esimerkiksi IBM tyyppi 3:n parikaapelin kapasitanssi on 49 pF/m. Tähän kun lisätään vielä piirien omat kapasitanssit, saattaa tiedonsiirtoetäisyydet jäädä liian lyhyiksi, esimerkiksi teollisuuden käyttämissä laitteissa. Väylän pituuden saa kasvatettua 3000 pF:iin käyttämällä esim. P82B715-piiriä. Piirissä on kymmenkertainen virtavahvistus, joka mahdollistaa väylän 400 pF:n kapasitanssin nousemisen 4 nF:iin. (NXP Semiconductors 2007b, 1.)

Kuviossa 7 on esitetty kahdella P82B715-piirillä muodostettu 'sub-system', jossa puskuroitu I<sup>2</sup>C-väylä muutetaan takaisin standardiksi I<sup>2</sup>C-väyläksi.

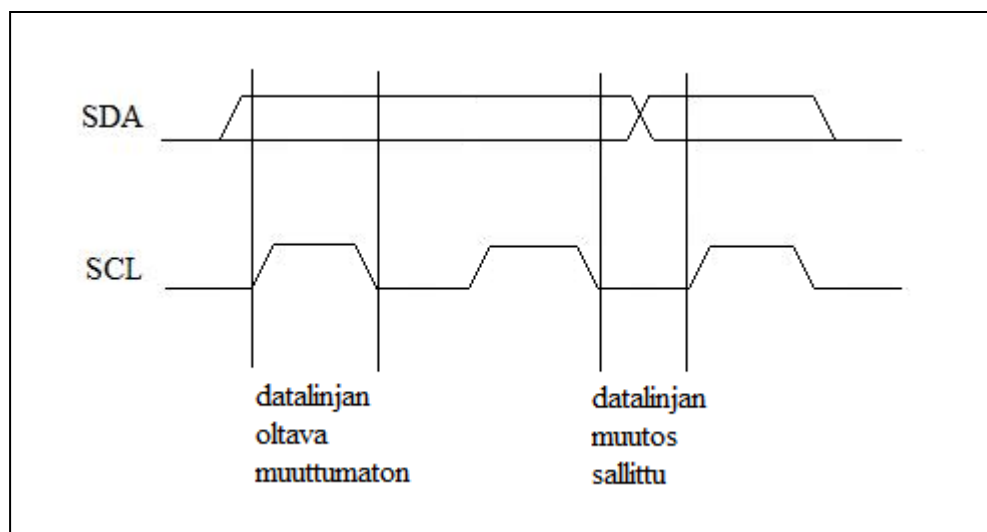


KUVIO 7. P82B715-piireillä muodostettu 'sub-system' (NXP Semiconductors 2007b, 5)

## 4 TIEDONSIIRRON PROTOKOLLA

### 4.1 Datalinjan vaatimukset

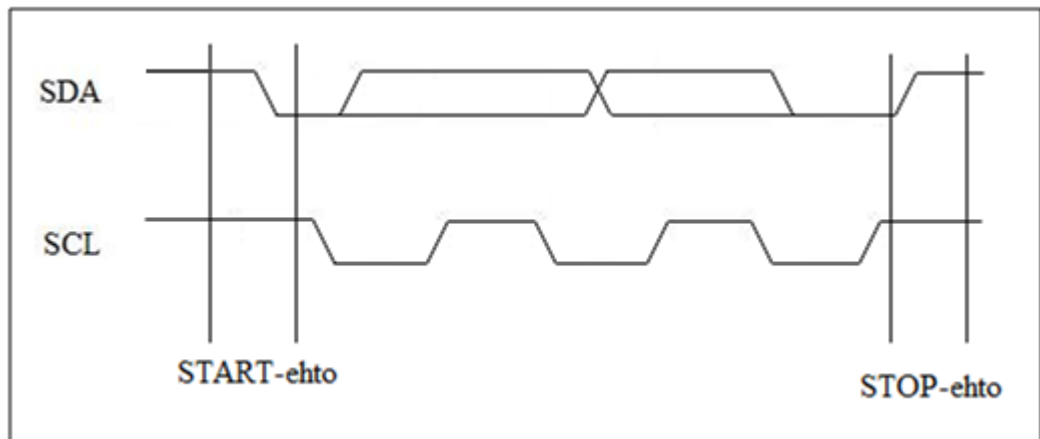
SDA-linjan datan täytyy olla muuttumaton kellosignaalin ollessa ylätilassa. Kellosignaalin laskiessa alas on datan muutos SDA-linjalla sallittu. Yksi kellopulssi siirtää yhden bitin väylällä (NXP semiconductors 2007c, 9).



KUVIO 8. Bittien siirto I<sup>2</sup>C-väylällä

### 4.2 START- ja STOP-ehto

Tiedonsiirron väylällä tekee mahdolliseksi isännän asettaman START-ehdon täyttyminen. START-ehdon jälkeen väylä on varattu ja vapautuu vasta isännän asettaessa STOP-ehdon väylälle, joka lopettaa tiedonsiirron. Ennen STOP-ehtoa voi START-ehtoja olla useampia, jos isäntä esimerkiksi vaihtaa vastaanottajan osoitetta. Tiedonsiirto aloitetaan kellosignaalin ollessa ylätilassa ja isännän vetäessä SDA-linjan alatilaa. Vastaavasti siirto lopetaan kellosignaalin ollessa ylätilassa ja isännän päästäessä SDA-linjan ylätilaan. (NXP Semiconductors 2007c, 9.)



KUVIO 9. Tiedonsiirron aloitus- ja lopetusehdot

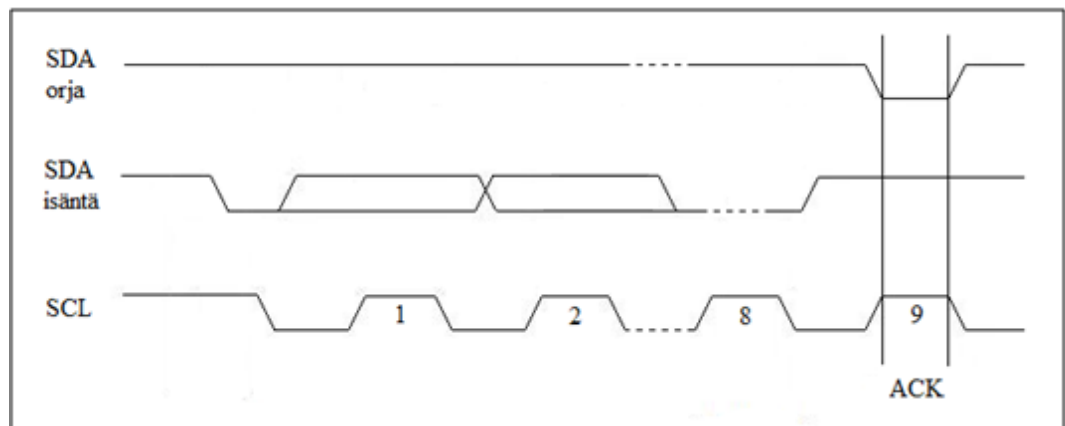
### 4.3 Kuittausbitti

Tiedonsiirto suoritetaan tavun (8 bitin) palasina. START-ehdon jälkeen ei siirrettävien tavujen määrää ole rajoitettu ollenkaan. Tieto siirretään aina merkitsevin bitti (MSB) ensin. Jos vastaanottaja ei pysty käsittelemään lähetettyä tietoa esimerkiksi sen käsitellessä jotakin omaa sisäistä funktiota, se voi vetää kellosignaalin alas, mikä pakottaa lähettäjän odotustilaan (wait state). Vastaanottajan vapauttaessa kellosignaalin voi tiedonsiirto taas jatkua. (NXP Semiconductors 2007c, 10.)

Kuittausbitti (acknowledge, ACK) vaaditaan jokaisen siirretyn tavun jälkeen eli joka yhdeksäs kellopulsssi. Kuittausbitti kertoo lähettäjälle, että tieto on vastaanotettu ja seuraava tavu voidaan vastaanottaa. Kuittauksen kellopulsseista huolehtii aina isäntä. Kuittaus tapahtuu seuraavalla tavalla: lähettäjä vapauttaa SDA-linjan, jotta vastaanottaja voi vetää linjan alas ja pitää sen vakaana koko kellopulssin ajan. Jos vastaanottaja ei kuittaa tavua, lopettaa isäntä tiedonsiirron STOP-ehdolla tai se voi aloittaa uuden siirron START-ehdolla. Tähän ei-kuittaukseen (not acknowledge, NACK) saattaa olla syynä seuraavia tiloja:

- Kutsuttuun osoitteeseen ei ole vastaajaa väylällä, jos esimerkiksi vastaanottajan osoite on annettu väärin.

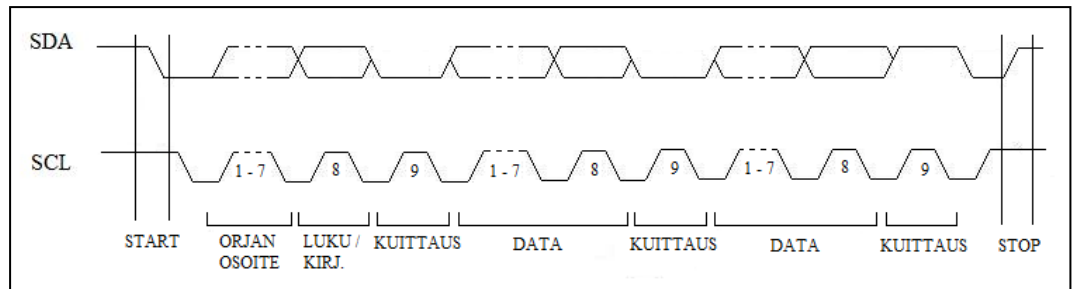
- Vastaanottaja ei kykene vastaamaan, jos sillä on esimerkiksi jokin itsenäinen funktio kesken.
- Vastaanottaja saa dataa tai käskyjä, joita se ei pysty käsittelemään.
- Vastaanottaja ei pysty lähettämään enää tavuja.
- Isäntä-vastaanottaja lähettää STOP-ehdon orja-lähetäjälle. (NXP Semiconductors 2007c, 43.)



KUVIO 10. Vastaanotetun tavun kuittaus I<sup>2</sup>C-väylällä

#### 4.4 Vastaanottajan osoite

START-ehdon jälkeen isännän on lähetettävä väylälle vastaanottajan osoite, joka koostuu seitsemästä osoitebitistä. Tavun viimeinen bitti on tiedonsuuntabitti. Tiedonsuuntabitin ollessa '0' kirjoitetaan orja-laitteelle ja bitin ollessa '1' orja-laitteelta luetaan tietoa. Kuviossa 11 on esitetty I<sup>2</sup>C-väylän tiedonsiirto kokonaisuudessaan. Esimerkissä tiedonsiirto loppuu isännän STOP-käskyyn, koska se ei saa kuittausta orjalta. (NXP Semiconductors 2007c, 13.)

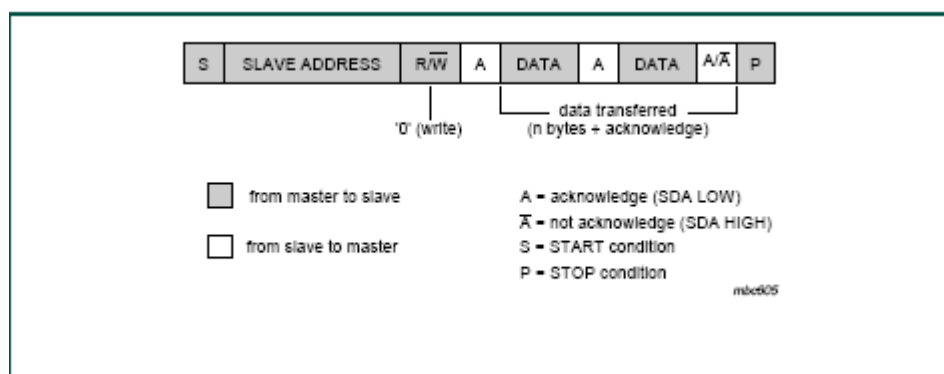


KUVIO 11. I<sup>2</sup>C-väylän tiedonsiirto

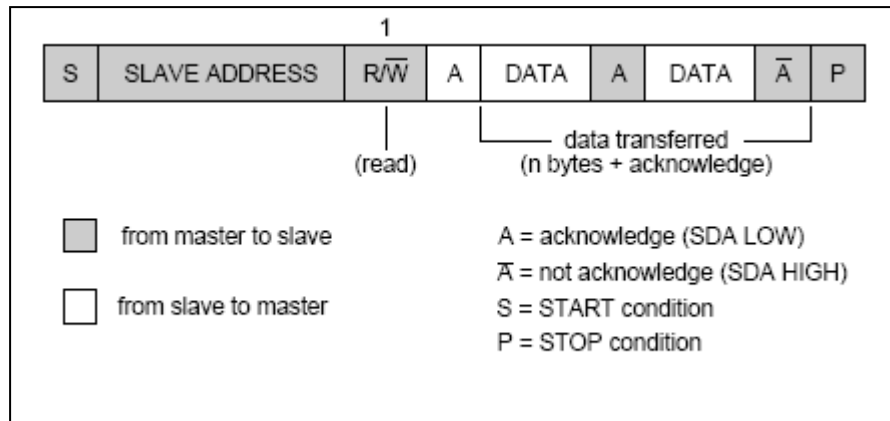
#### 4.5 Lähetys- ja vastaanottotavat

I<sup>2</sup>C-väylällä lähettäjänä ja vastaanottajana voivat olla sekä isäntä- että orjalaite:

- Isäntä-lähettäjä, vastaanottajana orja, orja suorittaa jokaisen kuittauksen.
- Orja-lähettäjä, vastaanottajana isäntä, ensimmäisen tavun jälkeen eli osoitteen ja tiedonsuuntabitin jälkeen voi orja toimia lähettäjänä, jolloin kuittaukset suorittaa isäntä. Tiedonsiirron lopettaa isäntä jättämällä kuittaamatta (NACK).
- Samassa tiedonsiirtotapahtumassa voi lähettäjä ja vastaanottaja vaihdella, jos isäntä suorittaa toistetun START-käskyn (repeated START condition, Sr), jonka jälkeen se voi vaihtaa osoitteen ja/tai tiedonsuuntabitin. (NXP Semiconductors 2007c, 14.)



KUVIO 12. Tiedon kirjoitus orjaan (NXP Semiconductors 2007c, 15).



KUVIO 13. Tiedon luku orjasta (NXP Semiconductors 2007c,15)

#### 4.6 Multi-Master-toiminta

Kaksi tai useampia isäntiä voi aloittaa tiedonsiirron vapaalla I<sup>2</sup>C-väylällä. Tätä tilannetta varten on oltava järjestelmä, joka päättää, kuka isännistä ottaa kontrollin väylällä ja vie oman tiedonsiirtonsa päätökseen. Tätä varten väylällä on kellon-synkronointi- ja sovitteluominaisuudet. (NXP Semiconductors 2007c, 11.)

##### 4.6.1 Kellon synkronointi

Kellon synkronointi on tehty ns. langoitettun JA-toiminnan (wired-AND) avulla. Kun SCL-linja siirtyy ylätilasta alas, on isäntien aloitettava omien kellojensa alati-la-jaksot. Tila ei vaihdu ennen kuin kaikkien isäntien alati-la-jaksot ovat lopussa. Tällöin isäntien kellot ja SCL-linja nousevat ylätilaan, kaikki samaan aikaan. Se isäntä, joka pääsee ensimmäiseksi ylätila-jaksonsa loppuun, vetää SCL-linjan taas alas. (NXP Semiconductors 2007c, 11.) Näin ollen synkronoitua SCL-linjaa generoi alatilassa isäntä, jolla on pisin alati-la-jakso ja ylätilassa SCL-linjaa generoi lyhyimmän ylätila-jakson omaava isäntä (NXP semiconductors 2007c, 11).

#### 4.6.2 Sovittelu

Toistetun START-ehdon pitoaika ( $t_{HD;STA}$ ) on 4.0  $\mu$ s. Tämän ajan sisään saattaa ehtiä toinenkin isäntä lähettämään START-ehdon, jonka jälkeen tarvitaan sovittelutoimintaa (arbitration) ratkaisemaan, kumpi isäntä vie tiedonsiirtonsa loppuun (NXP Semiconductors 2007c, 11).

Sovittelu tapahtuu isäntien verratessa lähettämäänsä dataa SDA-linjan dataan. Vertailu tapahtuu SCL-linjan ylätilassa eli SDA-linjan datan ollessa vakaana. Jos isäntä huomaa datan olevan muun arvoista kuin sen lähettämä, tietää se hävittäneensä sovittelun ja keskeyttää datan lähetyksen. Voittanut isäntä vie oman lähetyksensä loppuun. (NXP Semiconductors 2007c, 11 - 12.)

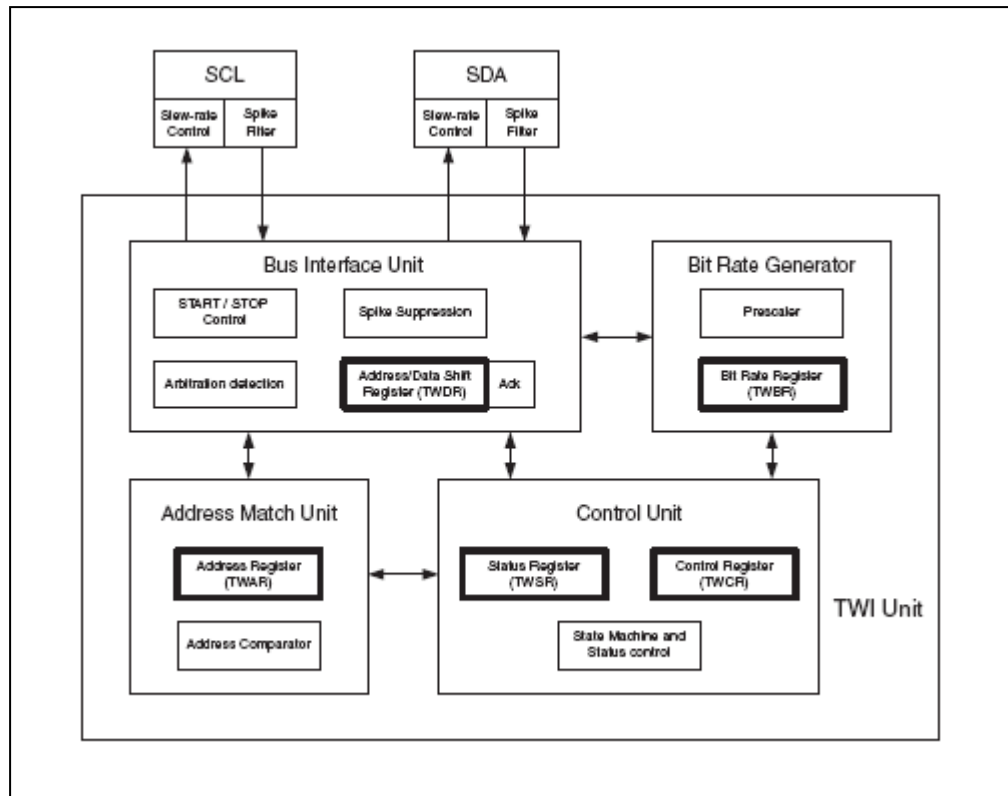
Sovittelun hävinnyt isäntä ei menetä jo lähettämäänsä dataa vaan voi aloittaa lähetyksen alusta SDA-linjan ollessa vapaa (NXP Semiconductors 2007c, 12).

#### 4.7 Tiedonsiirron ohjelmointiesimerkki

Seuraavassa esitetään I<sup>2</sup>C-väylän ohjelmointia c-kielellä toteutettuna. Kohdepiirinä on ATMEL ATmega32. Ohjelmointiesimerkin tarkoitus on selventää, mitä rekistereitä tarvitaan ja mitä niissä tapahtuu ohjelmoitaessa väylää tiedonsiirtoon.

Atmel käyttää I<sup>2</sup>C-väylästä nimitystä TWI (Two-wire Serial Interface).





KUVIO 14. Lohkokaavio ATmega 32:n TWI-moduulista (Atmel Corporation 2009, 175)

Ohjelmaesimerkissä isäntälaitte on lähettäjä.

```
TWCR = (1<<TWINT) | (1<<TWSTA) | (1<<TWEN);
```

```
/* Lähetetään START-komento: Control-rekisterissä asetetaan TWEN (mahdollistaa TWI-väylän käytön), TWSTA (TWI-start) ja TWINT (keskeytyslippu) ykköseksi. TWINT:n asettaminen ykköseksi tyhjentää keskeytyslipun.*/
```

```
while ( !(TWCR & (1<<TWINT)));
```

```
/* Odotetaan keskeytyslippua, tämä osoittaa että START-komento on lähetetty */
```

```
if ((TWSR & 0xF8) != 0x08)
```

```
ERROR;
```

```
/* Nollataan Status-rekisterin 3 viimeistä bittiä käyttäen JA-ehtoa 0xF8:n kanssa, ja verrataan tämän jälkeen arvoon, joka pitäisi olla Status-rekisterissä START:n jälkeen. Jos eri arvo -> error */
```

```

TWDR = 0xa0;
TWCR = (1<<TWINT) | (1<<TWEN);
/* Ladataan osoite ja tiedonsuuntabitti (tässä 0xa0 = 1010 000 0) data-rekisteriin.
TWCR:n arvojen asetus mahdollistaa latauksen.*/

while ( ! (TWCR & (1<<TWINT)));
/* Odotetaan keskeytyslippua, tämä osoittaa että osoitetieto on lähetetty ja
ACK/NACK vastaanotettu. */

if ((TWSR & 0xF8) != 0x18)
ERROR ();
/* Tarkastetaan Status-rekisterin arvo, jos eri kuin arvo osoitteen kuittauksen jäl-
keen pitäisi olla -> error */

TWDR = DATA;
TWCR = (1<<TWINT) | (1<<TWEN);
/* Ladataan DATA-muuttujan sisältämä arvo Data-rekisteriin. TWCR:n arvojen
asetus mahdollistaa latauksen.*/

while ( ! (TWCR & (1<<TWINT)));
/* Odotetaan keskeytyslippua, tämä osoittaa että data on lähetetty ja ACK/NACK
vastaanotettu. */

if ((TWSR & 0xF8) != 0x28)
ERROR ();
/* Tarkastetaan Status-rekisterin arvo, jos eri kuin arvo datan kuittauksen jälkeen
pitäisi olla -> error */

TWCR = (1<<TWINT) | (1<<TWEN) | (1<<TWSTO);
/* Lähetetään STOP-komento eli TWSTO asetetaan ykköseksi Control-
rekisterissä */

```

## 5 I<sup>2</sup>C-VÄYLÄN MITTAUKSET

### 5.1 Mittauslaitteisto ja mittauskohde

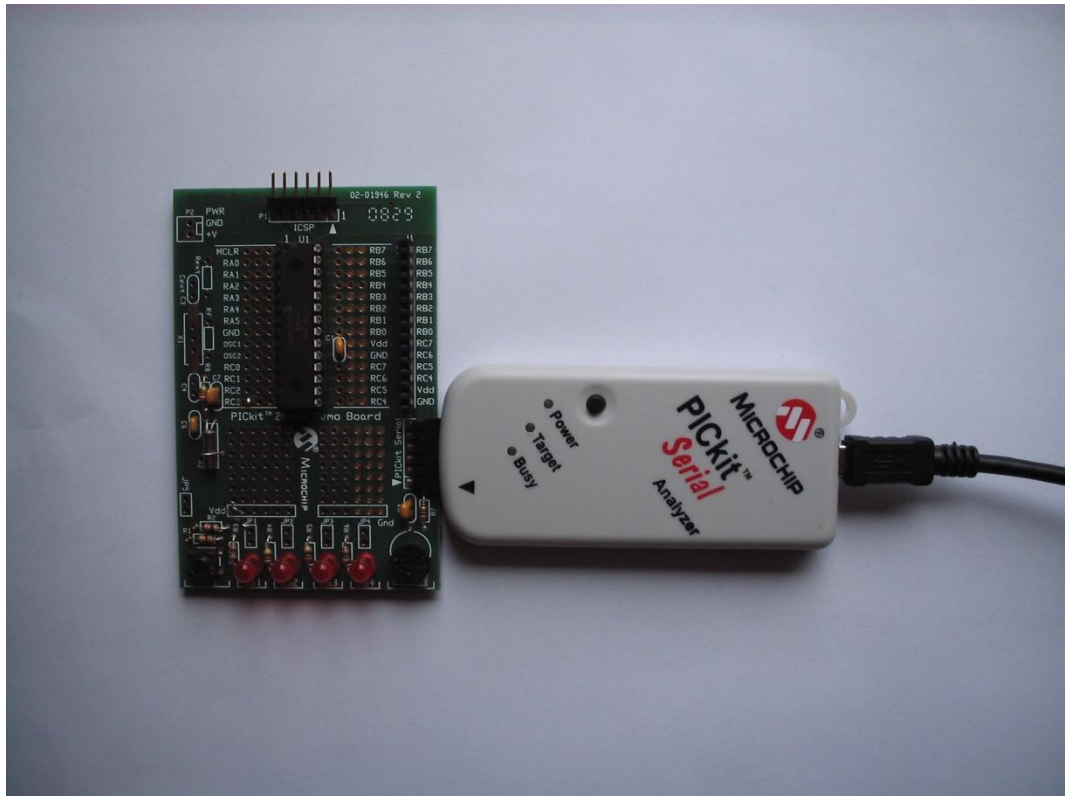
Mittalaitteistona käytettiin Agilent MSO6032A -oskilloskooppia. Skoopin kais-  
tanleveys on 300 Mhz, näyteotosten nopeus (sample rate) on 2 Gsa/s. Analogisia  
mittauskanavia laitteessa on kaksi ja digitaalikanavia 16 kpl. Skooppi tuntee ylei-  
set sarjamoitiset tiedonsiirtoprotokollat, mm. I<sup>2</sup>C, SPI, CAN, UART. (Agilent  
Technologies, Inc. 2009, 21 - 22.)



KUVIO 15. Agilent MSO6032A -oskilloskooppi

Mittauskohteena oli PC:n ja Microchipin valmistaman 28-pin Demo Board -kitin  
välinen tiedonsiirto I<sup>2</sup>C-väylää pitkin. 28-pin Demo Board:n liittämiseksi tietoko-  
neeseen tarvittiin Microchipin valmistama PICKit Serial Analyzer -liitäntälaite.  
Käyttöliittymänä toimi PICKit Serial Analyzer -ohjelmisto.

Microchipin Demo Board sisältää PIC16F886-mikrokontrollerin. Käyttäjä pystyy  
ohjelmalla tiedonsiirtoon PC:n ja mikrokontrollerin välillä, mm. kirjoittamaan ja  
lukemaan mikrokontrollerin EEPROM:a. Demo Boardilla itsellään ei ole I<sup>2</sup>C-  
väylän tarvitsemia ylös- ja alaspäin suuntaavasti. Ylös- ja alaspäin suuntaavat  
liittimet sijaitsevat PICKit Serial Analyzer -laitteessa. Ne ovat ohjelmallisesti aktivoitavissa ja poistettavissa käy-  
töstä. (Microchip Technology inc. 2007; Microchip Technology inc. 2006.)



KUVIO 16. Microchip PICkit Serial Analyzer ja 28-pin Demo Board

## 5.2 Mittausten merkitys

Oskilloskoopilla, joka tuntee mitattavan tiedonsiirtoprotokollan, on tehokasta tutkia ja todentaa tiedonsiirtoa, laitteen vika- ja häiriötilojen etsiminen on helpompaa. Käytetyssä oskilloskoopissa on mahdollisuudet liipaista seuraaviin I<sup>2</sup>C-väylän toimintoihin:

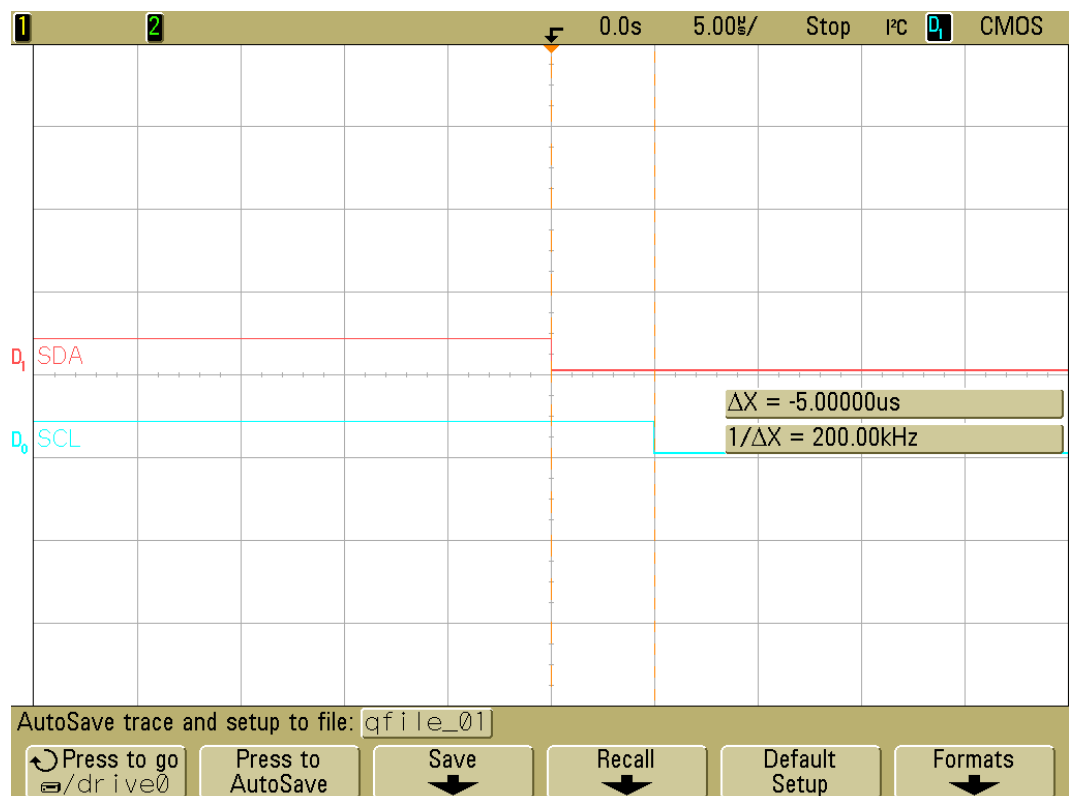
- START-, RESTART- ja STOP-ehtoihin
- puuttuvaan kuittaukseen (NACK)
- osoitteeseen jota ei kuitata
- EEPROM:lta luettuun dataan, jonka pitää vastata dataa jonka käyttäjä antaa oskilloskoopille
- erilaisiin tiedonsiirto osioihin alkaen START:sta ja päättyen dataan, liipaistukohta on tällöin 17. tai 26. kellopulssi

- 10-bitin kirjoitusjaksoon, liipaisukohta on 26. kellopulssi. (Agilent Technologies, Inc. 2009, 122.)

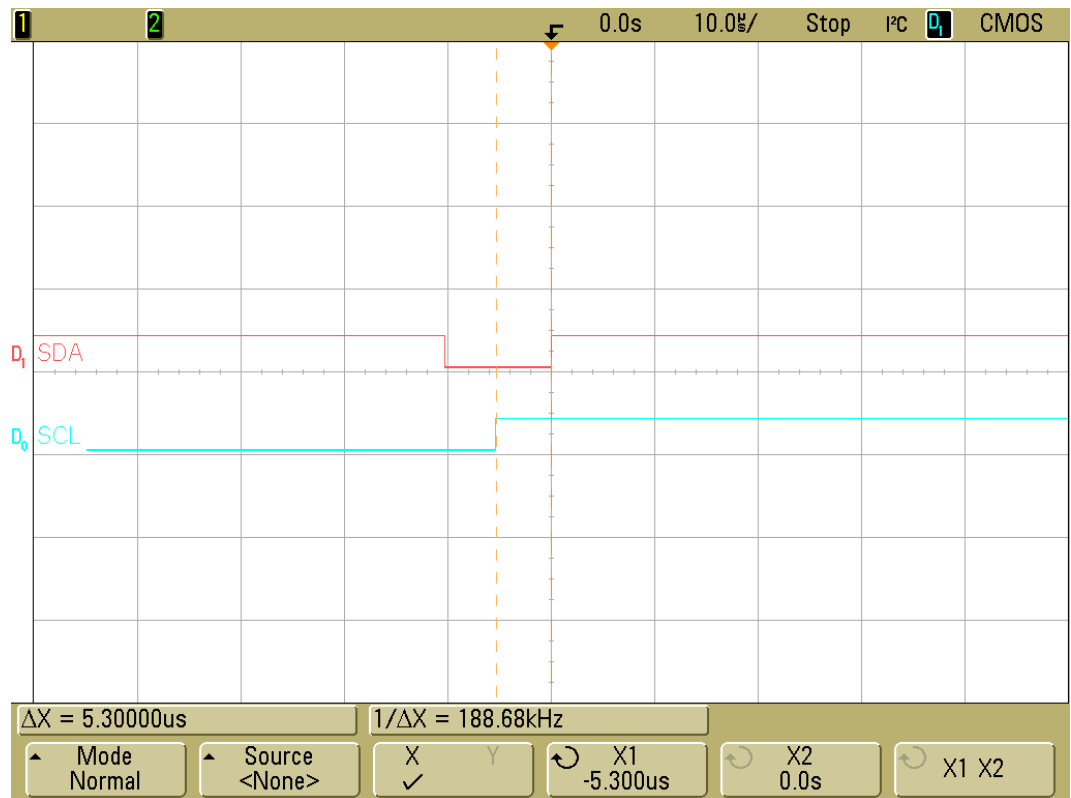
Esimerkiksi jos laitteen vianetsinnässä oskilloskooppi löytää osoitteen, jota ei kuitata, mutta osoitteen omaava laite on kuitenkin väylällä, saadaan heti todennäköinen vianaiheuttaja poimittua esim. 20 orjalaitteen joukosta. Oskilloskooppi paljastaa myös, jos väylällä on käytetty liian suuria ylösvetovastuksia, tästä esitetty mittaustulos jäljempänä.

### 5.3 Mittaustulokset

Kuvioissa 17 - 21 on esitetty oskilloskoopin mitaamat signaalit I<sup>2</sup>C-väylältä. Mittauksilla todennettiin SDA- ja SCL-linjojen käyttäytyminen I<sup>2</sup>C-protokollan mukaan.

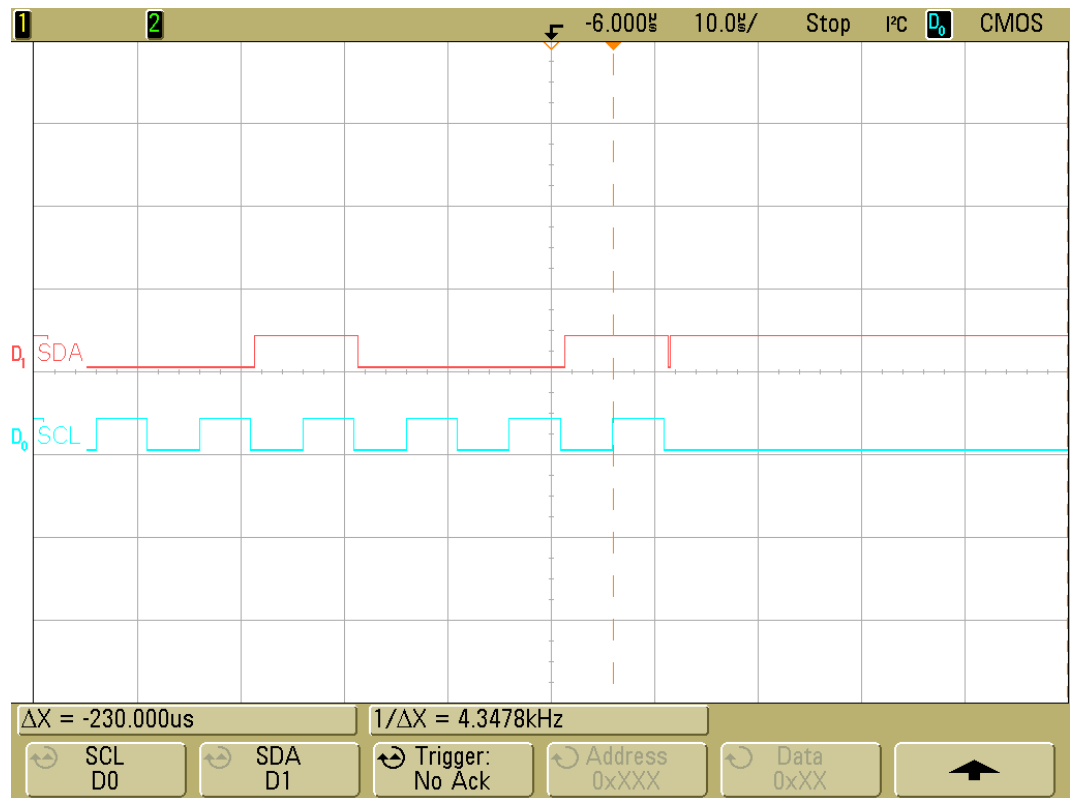


KUVIO 17. I<sup>2</sup>C-väylän START-ehto



KUVIO 18. I<sup>2</sup>C-väylän STOP-ehto

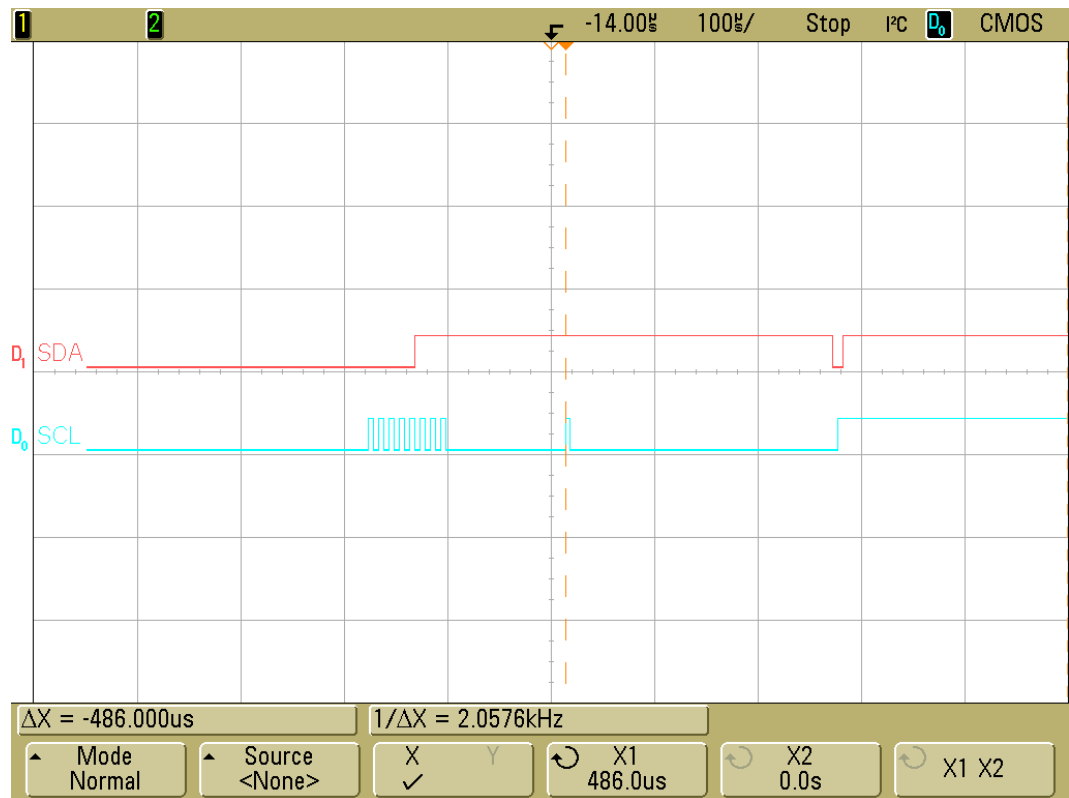
Kuviossa 19 liipaistiin oskilloskoopilla NACK eli ei kuittausta-tilaan. NACK aiheutettiin antamalla isäntänä toimivalta PC:ltä orja-osoite, jota väylällä ei ollut.



KUVIO 19. I<sup>2</sup>C-väylän Not acknowledge

Oskilloskoopin EEPROM Data Read -liipaisussa oskilloskooppi etsii osoitettavaa, joka on arvoltaan '1010xxx'. 1010 on EEPROM:ssa käytetty osoitteen kiinteä osa. Tämän jälkeen seuraava ehto on lukubitti ja tätä seuraava kuittausbitti. Tämän jälkeen verrataan luettavaa dataa käyttäjän oskilloskoopille antamaan dataan. Näiden täsmätessä liipaistaan kuittausbitin kellopulssin nousevaan reunaan. Mittaus-työssä kirjoitettiin ensin EEPROM:lle hexdesimaaliarvo 0x07, joka binäärinenä on '0111'. Sitten tätä alettiin lukea EEPROM:lta.

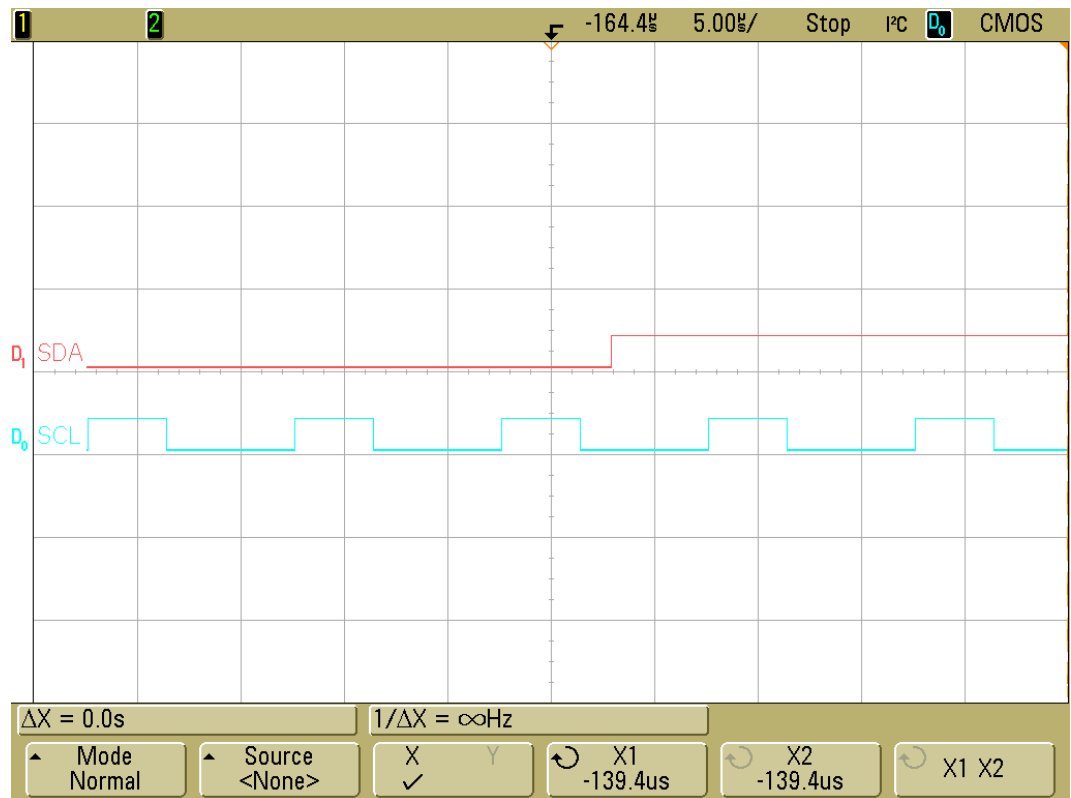
Kuvio 20:sta voi nähdä datajakson 8 kellopulssia, joista kolmessa viimeisessä SDA-linja '1' eli etsitty data löytyi linjalta.



KUVIO 20. EEPROM:lta luettu, oskilloskoopin käyttäjän etsimä data

Väylälle asetetut ylösvetovastukset eivät saa ylittää väylän ominaisuuksista johtuvia maksimiarvoja. Kuviossa 21 on mittaustulos, jossa PICKit Serial Analyzerin 2.2 k $\Omega$ :n ylösvetovastukset poistettiin käytöstä ja 28-Demo Boardille juotettiin 8 k $\Omega$ :n ylösvetovastukset. I<sup>2</sup>C-väylän datasivuilta saadaan kello-signaalille minimiarvot ala- ja yläjaksoille. Alajakson minimiarvo on 4.7  $\mu s$  ja yläjakson vastaava 4.0  $\mu s$  (NXP Semiconductors 2007c, 37). Oskilloskoopilta mitatut ajat olivat seuraavat: alajakso 6.2  $\mu s$  ja yläjakso 3.8  $\mu s$ , joten 8 k $\Omega$ :n ylösvetovastukset olivat liian suuret kyseiselle väylälle.





KUVIO 21. Mittaustulos, kun  $2.2\text{ k}\Omega$ :n ylösvetovastukset korvattiin  $8\text{ k}\Omega$ :n vastuksilla

## 6 YHTEENVETO

I<sup>2</sup>C-väylä osoittautui vartenotettavaksi vaihtoehdoksi tiedonsiirron väylävaihtoehtoja mietittäessä. Väylään on vaivatonta liittää ja poistaa laitteita kokonaisuuden siitä häiriintymättä. Käyttökohteena kyseiselle ominaisuudelle tulee ensimmäisenä mieleen esimerkiksi kulunvalvontajärjestelmä, johon lisätään tai poistetaan ovi- ja porttilukijoita tilan vaatiman tarpeen mukaan. Laitteiden osoitteen määrittely on tehty myös erittäin selkeäksi. Kaksijohdin-järjestelmä tuo myös helpotuksia ja omia etuja laitteistoihin, jo kustannusten kannalta. Väylän julkaisusta 1982-luvulta aina tähän päivään saakka on kulunut jo vuosikymmeniä, tekniikan pitkäikäisyys puhuu väylän toimivuuden puolesta.

Erilaisten tekniikoiden (mm. CMOS, bipolaari) sopivuus samalle väylälle on tärkeä ominaisuus I<sup>2</sup>C-väylässä. Yhteensopivuutta arvostetaan ja nykyään pyritäänkin luomaan pysyviä standardeja juuri yhteensopivuuden takia. Tästä esimerkkinä tietokoneissa ja siihen liitettävissä oheislaitteissa käytettävä USB-liitäntä.

I<sup>2</sup>C-väylän tiedonsiirron protokolla on selkeä ja toimiva. Jokaisen lähetetyn tavun jälkeen vaadittava kuittaus pitää virhetilanteet kurissa, eikä suuria virheruuhkia pääse syntymään. Yhdestä näkökulmasta katsottuna jokaisen lähetetyn tavun jälkeinen kuittausbitti saattaisi olla tuhlausta ja tämänkin bitin voisi käyttää tietoa sisältävänä bittinä ja kuittaus tapahtuisi esimerkiksi 10 tavun välein. Mielestäni kuittaus jokaisen tavun jälkeen tekee kuitenkin tiedonsiirrosta tehokkainta: väylä vapautuu nopeasti, eikä sitä rasiteta 'turhalla' tiedonsiirrolla. Selkeät START- ja STOP-ehdot tuovat toimintavarmuutta väylälle.

Työssä suoritettavat mittaukset oskilloskoopilla todensivat tiedonsiirtoon kuuluvien ehtojen täyttymisen. Oskilloskooppi osoittautui tehokkaaksi työvälineeksi tutkittaessa tiedonsiirtoa. Vikojen etsiminen on vaivatonta oskilloskoopilla, joka tuntee tutkittavan tiedonsiirtomuodon.

Opinnäytetyö I<sup>2</sup>C-väylästä oli mielenkiintoinen ja kehitti omaa ammattitaitoani runsaasti. Yhden tiedonsiirtoprotokollan osaaminen auttaa ymmärtämään muitakin tiedonsiirtotapoja tehokkaammin, yhteneväisyyksiäkin varmasti löytyy.

Ohjelmointiesimerkin tuominen työhön osoittautui oman ammattitaidon kannalta positiiviseksi, koska mikro-ohjainten rekisterien tutkiminen on eräs keskeinen asia esimerkiksi sulautettujen järjestelmien ohjelmoinnissa. Mittaustyöt toivat kokemusta oskilloskoopin käytöstä ja ominaisuuksista.

Oman mielenkiintonsa opinnäytetyön kirjoittamiseen toi lähdetietojen englanninkielisyys. Asian koin positiivisena, sillä alalla julkaistavat manuaalit ovat ja tulevat olemaan englanninkielisiä. Tekniikan edistyessä kovaa vauhtia ei manuaaleja kannatakaan suomentaa tiedon jäädessä kovin nopeasti vanhaksi.

Tällä hetkellä I<sup>2</sup>C-väylän yleinen käyttökohde on esimerkiksi laitteiden sisäisessä tiedonsiirrossa, jolloin väylän pituus on joitakin kymmeniä senttimetrejä. Jatkotutkimuskohde voisi mielestäni olla I<sup>2</sup>C-väylän käyttökelpoisuus sovelluksissa, joissa väylää jouduttaisiin pidentämään kymmeneen metriin, jopa sataan metriin. Olisiko väylän käyttö vielä toimintavarmaa vai kannattaisiko tiedonsiirto suorittaa tällaisilla etäisyyksillä muilla tavoin?

## LÄHTEET

Agilent Technologies, Inc. 2009.

Agilent InfiniiVision 5000/6000/7000 Series Oscilloscopes User's Guide

[viitattu 2.11.2009]. Saatavissa: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/54695-97015.pdf>

Atmel Corporation 2009. doc2503 [viitattu 7.11.2009]. Saatavissa:

[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2503.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2503.pdf)

Dallas Semiconductor. DS1621 [viitattu 15.10.2009]. Saatavissa:

<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS1621.pdf>

ESAcademy, 2000. [viitattu 14.10.2009]. Saatavissa:

<http://www.esacademy.com/faq/i2c/>

Koskinen, J. 1999. Mikrotietokonetekniikka. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy

Microchip Technology inc. 2006. 28-pin demo board user's guide [viitattu 2.11.2009]. Saatavissa:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41301A.pdf>

Microchip Technology inc. 2007. PICkit Serial Analyzer user's guide [viitattu 2.11.2009]. Saatavissa:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/51647C.pdf>

NXP Semiconductors. 2007a. AN10441 [viitattu 18.10.2009]. Saatavissa:

[http://www.nxp.com/acrobat\\_download/applicationnotes/AN10441\\_1.pdf](http://www.nxp.com/acrobat_download/applicationnotes/AN10441_1.pdf)

NXP Semiconductors. 2007b. P82B715 User manual [viitattu 20.10.2009]. Saatavissa: [http://www.nxp.com/acrobat\\_download/datasheets/P82B715\\_7.pdf](http://www.nxp.com/acrobat_download/datasheets/P82B715_7.pdf)

NXP Semiconductors. 2007c. UM10204 [viitattu 14.10.2009]. Saatavissa:

[http://www.nxp.com/acrobat\\_download/usermanuals/UM10204\\_3.pdf](http://www.nxp.com/acrobat_download/usermanuals/UM10204_3.pdf)