

Interface normen

filter en overspanningsbeveiliging voor de I²C-bus

Andreas Nadler (Würth Elektronik)

Communicatie tussen microcontrollers en hun randapparatuur vindt vaak plaats via de I²C-bus. Hoe groter de te overbruggen afstand, des te gevoeliger de communicatie wordt voor storingen. Met een geschikte filter en beveiligingsschakeling kan de storingsimmunitie aanzienlijk worden verhoogd.

De I²C-bus (*Inter-Integrated Circuit*) is een populaire seriële communicatie-interface die vooral gebruikt wordt om microcontrollers te verbinden met perifere IC's (bijvoorbeeld sensoren of geheugen). De bus gebruikt een kloklijn (SCL) en een bidirectionele datalijn (SDA). De bus wordt echter niet alleen binnen een enkele print gebruikt, maar wordt in veel toepassingen ook uitgebreid naar andere gebieden met behulp van diverse connectoren en kabels. Dit maakt de I²C-bus potentieel gevoeliger voor externe stoorsignalen zoals ESD, bursts en RF-straling. Het doel van dit artikel is de lezer een geschikte filter- en beveiligingsschakeling voor te stellen dat de storingsimmunitie van de I²C-bus verhoogt zonder dat dit ten koste gaat van de signaalkwaliteit van de data- en kloklijnen. Voor dit doel zijn simulatiemodellen gemaakt in LTspice en is een echte toepassing doorgemeten om de simulatieresultaten te verifiëren.

Topologie van de I²C-bus

De I²C-bus werkt volgens het 'master/slave'-principe, waarbij de master altijd de datatransfer initieert. Door de geringe complexiteit wordt de bus veel gebruikt. Het protocol is echter zeer eenvoudig van opzet en de fysieke

topologie is slechts single-ended. In de praktijk betekenen deze beide factoren dat de bus erg gevoelig kan zijn voor externe stoorsignalen (bijvoorbeeld tijdens EMC-tests).

Tabel 1 geeft een overzicht van de I²C-specificaties.

Alle IC's die deelnemen aan de I²C-bus hebben open-collector uitgangen (**figuur 1 links**). Deze schakelen de pull-up weerstanden afwisselend naar referentieaarde en genereren zo de logische toestanden '1' (V_{CC}) en '0' (GND). Zoals te zien is in tabel 1, nemen de maximaal toelaatbare stijgtijden af naarmate de datarate toeneemt. De wiskundige relatie van de min/max-waarden voor de pull-up weerstanden wordt gegeven door vergelijkingen 1 en 2.

$$R_{\text{Pullup_min}} = \frac{(V_{\text{CC}} - V_L)}{I_{\text{Pullup}}} \quad (1)$$

$$R_{\text{Pullup_max}} = \frac{t_r}{(0,8473 \cdot C_{\text{Bus}})} \quad (2)$$

V_{CC} = referentiespanningsniveau van de I²C-bus (volt)

V_L = max. logische '0'-drempel

(bijvoorbeeld 0,4 V met V_{CC} > 2 V)

C_{Bus} = max. parasitaire buscapaciteit van de applicatie (farad)

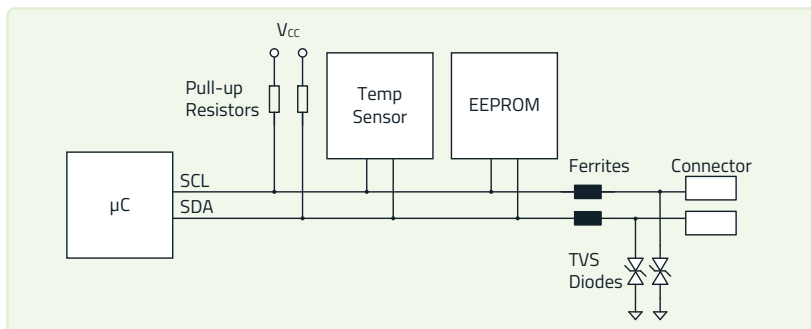
t_r = max. toegestane stijgtijd, afhankelijk van de datarate (seconde)

I_{Pull-up} = max. mogelijke stroom door de open-collector pinnen (ampère).

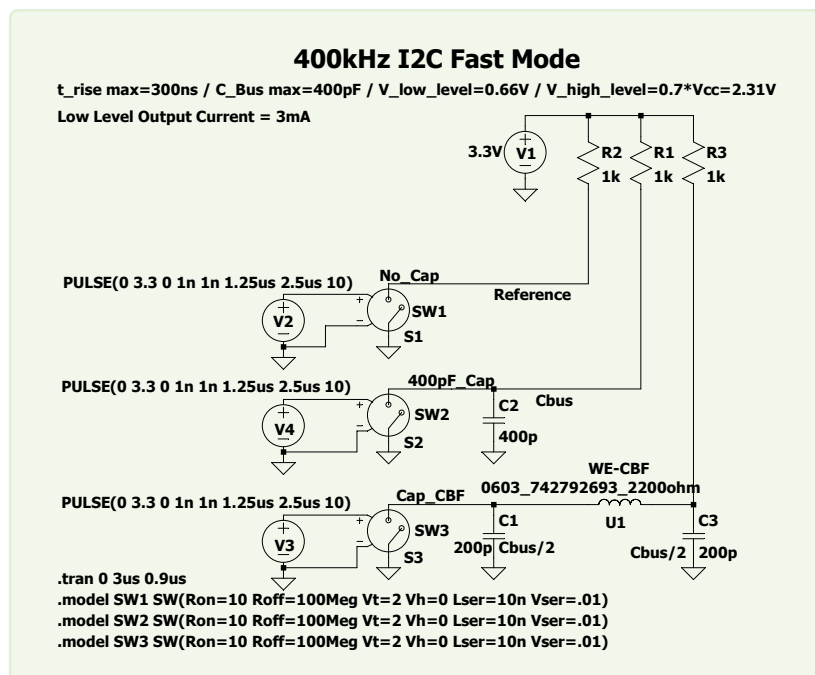
De pull-up weerstanden [1] vormen in combinatie met de parasitaire buscapaciteit een RC-schakeling. Dit leidt tot een vertraging van de stijgtijd van het blokvolgsignaal. In veel toepassingen is deze RC-schakeling vaak de beperkende factor voor de maximaal mogelijke datarate en kabellengte. Zoals te zien is in tabel 1, geeft de I²C-specificatie daarom in een maximale buscapaciteit van 400 pF bij 3 mA stroom voor de meest gebruikte datarates (100 kbit/s en 400 kbit/s). Hoe kleiner de gekozen waarden van de pull-up weerstanden, des te korter de stijgtijd wordt. Zoals te zien is in vergelijking 1, bepaalt de ondergrens de maximale logische drempelspanning, het referentiespanningsniveau en de maximaal mogelijke stroom.

Tabel 1. Specificaties van de I²C-bus

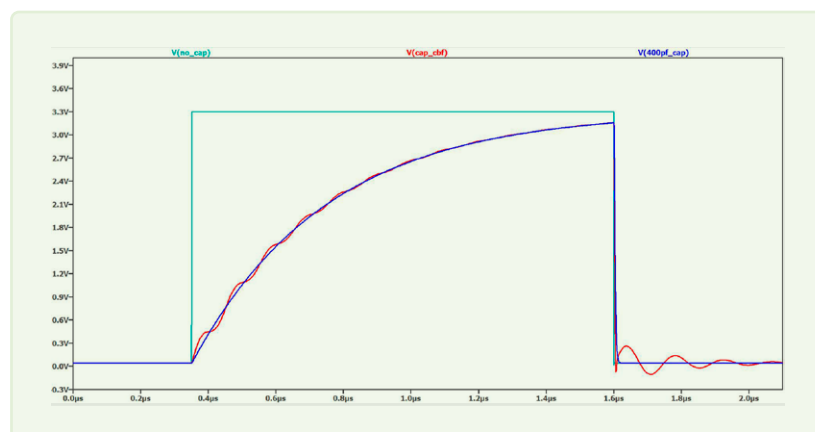
Modus	CLK	Max. datarate	Max. stijgtijd 0,3 - 0,7 V CC	Max. buscapaciteit	Max. stroom
Standard	100 kHz	100 kbit/s	1000 ns	400 pF	3 mA
Fast	400 kHz	400 kbit/s	300 ns	400 pF	3 mA
Fast Plus	1 MHz	1 Mbit/s	120 ns	550 pF	20 mA
High Speed	3,4 MHz	3,4 Mbit/s	10 ns	100 pF	3 mA



Figuur 1. Vereenvoudigd blokschema van een I²C-bus met pull-up weerstanden (links) en met ferrieten en TVS-dioden (rechts) als interfacebescherming voor verbeterde storingsimmuñiteit en verminderde interferentie-emissie.



Figuur 2- Schema van een LTspice-simulatie met 3 kanalen (0 pF, 400 pF en 400 pF + meerlaags SMD-ferriet).



Figuur 3. LTspice-simulatiereultaat in het tijddomein (0 pF (turquoise), 400 pF (blauw) en 400 pF + meerlaags SMD-ferriet (rood)).

De parasitaire buscapaciteit hangt onder andere af van:

- lengte en breedte van de printsporen (ongeveer 0,5 pF/cm);
- lengte en type van kabels en connectoren;
- laagstructuur en diëlektrische constante van het printmateriaal

Selectie van de filter- en overspanningsbeveiligingscomponenten

Om de immuñiteit voor ESD, bursts en RF-signalen te verhogen, wordt een combinatie van SMD-ferrieten plus TVS-dioden aanbevolen (**figuur 1 rechts**). Breedband SMD-ferrieten (bijvoorbeeld 742792693) vormen een impedantie boven 10 MHz en zijn daarom in staat om de bus te beschermen tegen radiofrequente storingen. Overspanningen kunnen ook effectief worden afgeleid naar de referentieaarde door de TVS-dioden.

Omdat de waarden van de pull-up weerstanden vaak in het k Ω -bereik liggen, spelen de RDC en de impedantie van SMD-ferrieten onder 10 MHz hier slechts een kleine rol. Op het eerste gezicht kan dus worden aangenomen dat de stijgtijd van het nuttige signaal nauwelijks wordt beïnvloed. Als geschikte TVS-dioden met een lage capaciteit (bijvoorbeeld 824012823 – 0,18 pF) worden gekozen, heeft hun capaciteit ook geen relevante invloed op de signaalkwaliteit. Tijdens een ESD-test kan er bijvoorbeeld kortstondig een stroom van meer dan 10 A lopen, waardoor er een spanning van ongeveer 10 V over deze diode komt te staan.

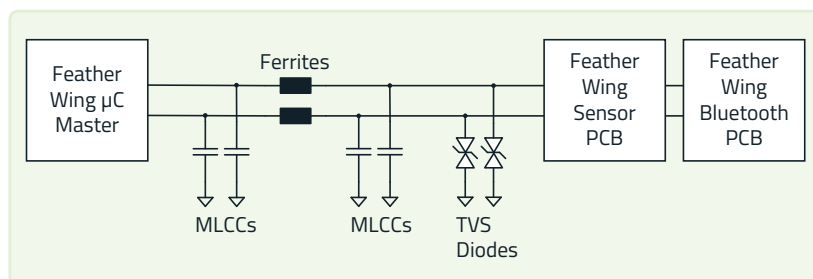
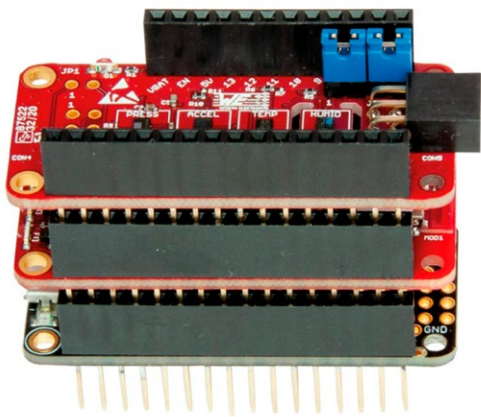
Alle andere IC's op de I²C-bus moeten dan deze spanning weerstaan. Dit werkt alleen met een aarde met lage impedantie (bijvoorbeeld een groot koperoppervlak in een binnenlaag) om een verdere spanningsval te voorkomen.

LTspice-simulatie met 400 kHz klokfrequentie

Met behulp van het gratis simulatieprogramma LTspice is het relatief eenvoudig om de invloed van de parasitaire buscapaciteit in combinatie met de gekozen pull-up weerstanden te onderzoeken. Voor een spanningsgestuurde schakelaar selecteert men de **Pulse**-functie en bepaalt de gewenste bandbreedte op basis van de gewenste I²C-specificatie. Voor de veelgebruikte 400kbps-variant wordt een periode van 2,5 μ s geselecteerd. Voor een 50 % duty cycle wordt de 'high'-tijd ingesteld op 1,25 μ s. Om te profiteren van de maximaal toegestane 400 pF parasitaire buscapaciteit, werd voor de pull-ups een waarde van 1 k Ω gekozen. Drie kanalen (kan in de praktijk SCL of SDA voorstellen) worden gesimuleerd (**figuur 2**):

- zonder parasitaire buscapaciteit;
- 400 pF parasitaire buscapaciteit;
- 400 pF + breedbandig meerlaags SMD-ferriet (742792693).

Het simulatiereultaat in **figuur 3** laat zien dat er praktisch geen invloed op de stijgtijd van het signaal verwacht kan worden van het meerlaags SMD-ferriet. Omdat elk meerlaags SMD-ferriet ook inductantie heeft, zijn er kleine oscillaties zichtbaar in combinatie met de buscapaciteit. Deze zijn echter niet kritisch omdat hun amplitude kleiner is dan 10 % van het nuttige signaal.



Figuur 4. SensorBLE FeatherWing-kit van Würth Elektronik, bestaande uit microcontroller, Bluetooth- en sensor-board.

Figuur 5. Blokschema van de testopstelling met de SensorBLE FeatherWing-kit van Würth Elektronik.

Meting van een applicatie met 400 kHz klokfrequentie

Om de relatief eenvoudige LTspice-simulatie te verifiëren, zijn aanvullende metingen uitgevoerd aan een SensorBLE FeatherWing-kit [2] van Würth Elektronik. Deze kit bestaat uit een master-board met microcontroller. De andere twee boards bevatten een WE Bluetooth-module en verschillende WE-sensoren (3-assige versnelling, temperatuur, vochtigheid, druk – **figuur 4**). Het master-board communiceert met de andere twee via de I²C-bus met een maximale datasnelheid van 400 kbit/s (**figuur 5**). De sensorgegevens kunnen vervolgens gevisualiseerd worden met een geschikte smartphone-app (bijvoorbeeld WE-SensorBLE). MLCC's worden gebruikt om een parasitaire capaciteit van 400 pF naar GND te simuleren. De meerlagige SMD-ferriet (742792693) dat in de simulatie werd gemodelleerd, werd ook geïnstalleerd, plus een TVS-diode-array (824012823). Een kabel met een lengte van 20 cm verbindt het sensor-board met de rest van de I²C-bus. Een dergelijke opstelling is in de praktijk in veel toepassingen terug te vinden.

Steeds werd de spanningscurve op de SCL-lijn gemeten. De meetresultaten [3] zijn vrijwel identiek met die van de simulatie (**figuur 6**). Zowel de stijgtijd als de signaalkwaliteit worden niet negatief beïnvloed door de meerlaags SMD-ferriet in combinatie met de TVS-diode. De stijgtijd van het hoge signaal, die kritisch is voor de timing, hangt alleen af van de buscapaciteit in combinatie met de geselecteerde pull-up weerstanden. Met behulp van de smartphone-app (WE-SensorBLE) kon de foutloze werking in alle drie de geteste scenario's worden geverifieerd.

Simulatie en meting stemmen overeen

Zowel simulatie als meting laten zien dat SMD-ferrieten in combinatie met ESD-beschermingsdioden het kloksignaal (SCL) en het datasignaal (SDA) van de I²C-bus niet beïnvloeden. De steilheid van de flanken van de signalen wordt voornamelijk beïnvloed door de pull-up

weerstanden in combinatie met de parasitaire buscapaciteit. Daar staat tegenover dat de combinatie van ESD-beschermingsdiode en breedbandig SMD-ferriet de storingsimmunitieit van de I²C-bus verhoogt. In de praktijk betekent dit vooral een hogere immunitieit voor ESD, bursts en RF-straling. ◀

230400-03



Over de auteur

Andreas Nadler studeerde af aan de Technische School van Kempten als elektrotechnisch ingenieur. Daarna werkte hij enkele jaren als hardware-ingenieur op het gebied van geschakelde voedingen en analoge circuittechnologie. Sinds 2015 is Nadler Field Application Engineer bij Würth Elektronik eiSos GmbH in de business unit voor passieve en actieve componenten. Daar is hij gespecialiseerd in het ontwerp van EMC-conforme voedingen en interfaces, evenals in de ontstoring van elektronische apparaten.



Figuur 6. Referentiemeting met 1 kΩ pull-ups, meerlaags SMD-ferriet, TVS-diode-array, 20 cm verbindingskabel en 400 pF MLCC's (= 344 ns stijgtijd).

WEBLINKS

- [1] R. Arora, "I²C Bus Pullup Resistor Calculation," Application Report SLVA689, Texas Instruments: <https://ti.com/lit/an/slva689/slva689.pdf>
- [2] SensorBLE Featherwing kit: https://www.we-online.com/de/components/products/SENSOR_BLE_FEATHERWING_KIT
- [3] A. Nadler, "Filter and surge protection for the I²C bus," Application Note ANP121: <https://www.we-online.com/ANP121>