

APPLICATION NOTE

ANP121 | Filter und Überspannungsschutz für I²C-Bus



Andreas Nadler

01. EINLEITUNG

Der I²C (Inter-Integrated Circuit)-Bus ist eine populäre serielle Kommunikationsschnittstelle auf vielen Leiterkarten. Er wird hauptsächlich genutzt, um Mikrocontroller mit Peripherie-ICs (z. B. Sensoren oder Speicher) zu verbinden. Der Bus verwendet jeweils eine bidirektionale Datenleitung (SDA) und eine Taktleitung (SCL). Der I²C-Bus findet jedoch nicht nur innerhalb von Leiterkarten Verwendung. In vielen Applikationen wird der I²C-Bus mithilfe von diversen Steckverbindern als auch Kabeln in andere Bereiche erweitert. Dadurch wird der I²C-Bus potentiell anfälliger für Störungen von außen wie z. B. ESD, Burst und eingestrahlte HF. Ziel dieser Appnote ist es, dem Leser eine geeignete Filter- und Schutzschaltung aufzuzeigen, welche die Störfestigkeit des I²C-Bus erhöht, ohne dass die Signalqualität der Taktleitung leidet. Dazu wurden Simulationsmodelle in LTspice erstellt und eine reale Applikation vermessen, um die Simulationsergebnisse zu verifizieren.

02. ÜBERSICHT I²C-BUS

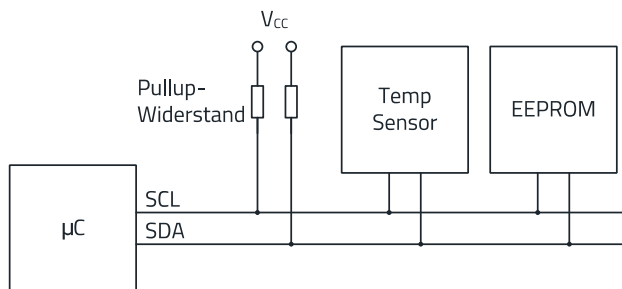


Abbildung 1: Vereinfachtes Blockschaltbild I²C-Bus

Der I²C arbeitet nach dem Prinzip „Master-Slave“, wobei der Master immer den Datentransfer initiiert. Aufgrund seiner geringen Komplexität, hat der Bus eine große Verbreitung erreicht. Allerdings ist das Protokoll sehr einfach konzipiert und die physikalische Topologie nur single-ended. Beides führt in der Praxis dazu, dass der Bus sehr anfällig auf externe Störungen (z. B. bei EMV-Tests) reagieren kann.

03. ÜBERSICHT I²C-SPEZIFIKATIONEN

Modus	CLK	Max. Datenrate	Max. Anstiegszeit 0,3 - 0,7 V _{CC}	Max. Buskapazität	Max. Strom
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 +	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

Tabelle 1: Übersicht I²C-Bus-Spezifikationen

04. PULLUP-WIDERSTÄNDE, BUSKAPAZITÄT UND FLANKENANSTIEGSZEIT

Alle ICs, die am I²C-Bus teilnehmen, besitzen Open-Kollektor-Ausgänge. Diese schalten die Pullup-Widerstände abwechselnd auf Referenzmasse und generieren somit die logischen Zustände „1“ (V_{CC}) und „0“ (GND). Wie in Tabelle 1 ersichtlich ist, verringern sich die max. zulässigen Flankenanstiegszeiten mit Zunahme der Datenrate. Der mathematische Zusammenhang der Min./Max.-Werte für die Pullup-Widerstände ist folgender:

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

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

- V_{CC} = Referenz-Spannungspegel des I²C-Bus (Volt)
- V_L = Max. Logik „0“ Schwellwert (z.B. 0,4 V bei V_{CC} > 2 V)
- C_{BUS} = Max. parasitäre Buskapazität der Applikation (Farad)
- t_r = Max. zulässige Anstiegszeit, abhängig von der Datenrate, (Sekunden)
- I_{Pullup} = Max. möglicher Strom durch die Open-Kollektor-Pins, (Ampere)

Die Pullup-Widerstände in Kombination mit der parasitären Buskapazität bilden ein RC-Glied. Das führt zu einer Verzögerung der Flankenanstiegszeit des Rechtecksignals. In vielen Applikationen ist dieses RC-Glied oftmals der limitierende Faktor in Bezug auf die max. mögliche Datenrate

APPLICATION NOTE

ANP121 | Filter und Überspannungsschutz für I²C-Bus

und Kabellänge. Wie in Tabelle 1 ersichtlich ist, ergibt sich daher nach der I²C-Spezifikation bei den meist verwendeten Datenraten (100 kBit/s und 400 kBit/s) eine maximale Buskapazität von 400 pF bei 3 mA Strom. Je kleiner die Pullup-Werte gewählt werden, desto kürzer kann die Flankenanstiegszeit werden. Das untere Limit bestimmt, wie in der Formel (1) ersichtlich ist, den max. Logik-Low-Schwellwert, den Referenzspannungspegel und den max. möglichen Strom.

Die parasitäre Buskapazität hängt u. a. ab von:

- Bauteilkapazitäten
- Länge & Breite der Leiterbahnen (ca. 0,5 pF/cm)
- Länge & Art der Kabel & Stecker
- Lagenaufbau & Dielektrizitätskonstante der Leiterkarten

05. AUSWAHL DER FILTER- & ÜBERSpannungsschutzBAUTEILE

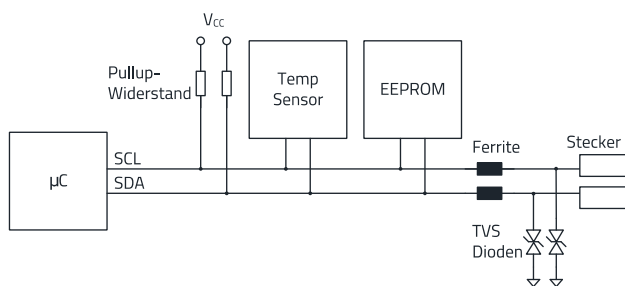


Abbildung 2: I²C-Bus inkl. Schnittstellenschutz für verbesserte Störfestigkeit und verringerte Störaussendung

Um die Störfestigkeit gegenüber ESD, Burst als auch eingestrahelter HF zu erhöhen, bietet sich eine Kombination aus SMT-Ferriten plus TVS-Dioden an. Breitbandig wirkende SMT-Ferrite (z. B. [742792693](#)) bauen oberhalb von 10 MHz kontinuierlich Impedanz auf und sind daher in der Lage, den Bus gegenüber den hochfrequenten Störungen zu schützen. Überspannungen können zudem durch die TVS-Dioden wirksam auf Referenzmasse abgeleitet werden.

Da sich die Werte der Pullup-Widerstände oftmals im Bereich von kΩ bewegen, spielen der R_{DC} als auch die Impedanz von SMT-Ferriten unterhalb von 10 MHz hier nur eine untergeordnete Rolle. Somit ist in einer ersten Überlegung davon auszugehen, dass die Flankenanstiegszeit des Nutzsignals praktisch kaum beeinflusst wird. Werden passende TVS-Dioden mit geringer Kapazität (z. B. [824012823](#) - 0.18 pF) ausgewählt, so hat deren Bauteilkapazität ebenfalls keinen relevanten Einfluss auf die Signalqualität. Bei einem ESD-Test kann beispielsweise kurzzeitig ein Strom von über 10 A fließen, wodurch dann an dieser Diode eine Spannung von ca. 10 V stehen bleibt. Alle

weiteren ICs am I²C-Bus müssen diese Spannung dann aushalten. Dies funktioniert nur, wenn man eine niederimpedante Masse (z. B. große Kupferfläche in einer Innenlage) zur Verfügung stellt, um einen weiteren Spannungsabfall zu vermeiden.

06. LTSPICE-SIMULATION MIT 400 KHZ TAKTRATE

Mithilfe des kostenlosen Simulationsprogramms LTspice kann man relativ leicht untersuchen, welchen Einfluss die parasitäre Buskapazität in Kombination mit den gewählten Pullup-Widerständen hat. Um die gewünschten Nutzsignale zu erzeugen, bietet es sich an, einen spannungsgesteuerten Schalter zu verwenden. Mithilfe der Spannungsquelle kann praktisch jedes beliebige, periodische Signal erzeugt werden. Dazu wählt man die Funktion „Puls“ und legt anhand der gewünschten I²C-Spezifikation die gewünschte Bandbreite fest. Für die weit verbreitete 400 kBit/s-Variante, wird eine Periodendauer von 2,5 µs gewählt. Bei einem Tastverhältnis von 50% wird hierbei die „high“ Zeit auf 1,25 µs gesetzt. Um die Flankensteilheit des Signals zu bestimmen, kann man sich beispielsweise an den Anstiegszeiten der verwendeten Busteilnehmer-ICs orientieren. Um die maximal zulässigen 400 pF parasitäre Buskapazität ausnutzen zu können, wurden die Pullups auf 1 kΩ festgelegt. Es werden drei Kanäle (kann in der Praxis SCL oder SDA darstellen) simuliert:

- Ohne parasitäre Buskapazität
- 400 pF parasitäre Buskapazität
- 400 pF + Breitbandiger Multilayer-SMT-Ferrit ([742792693](#))

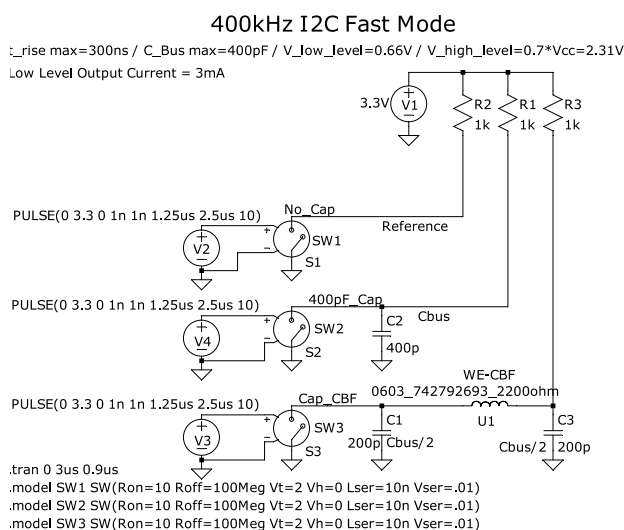


Abbildung 3: Schaltplan der LTspice-Simulation mit 3 Kanälen → 0 pF, 400 pF & 400 pF + Multilayer-SMT-Ferrit

APPLICATION NOTE

ANP121 | Filter und Überspannungsschutz für I²C-Bus

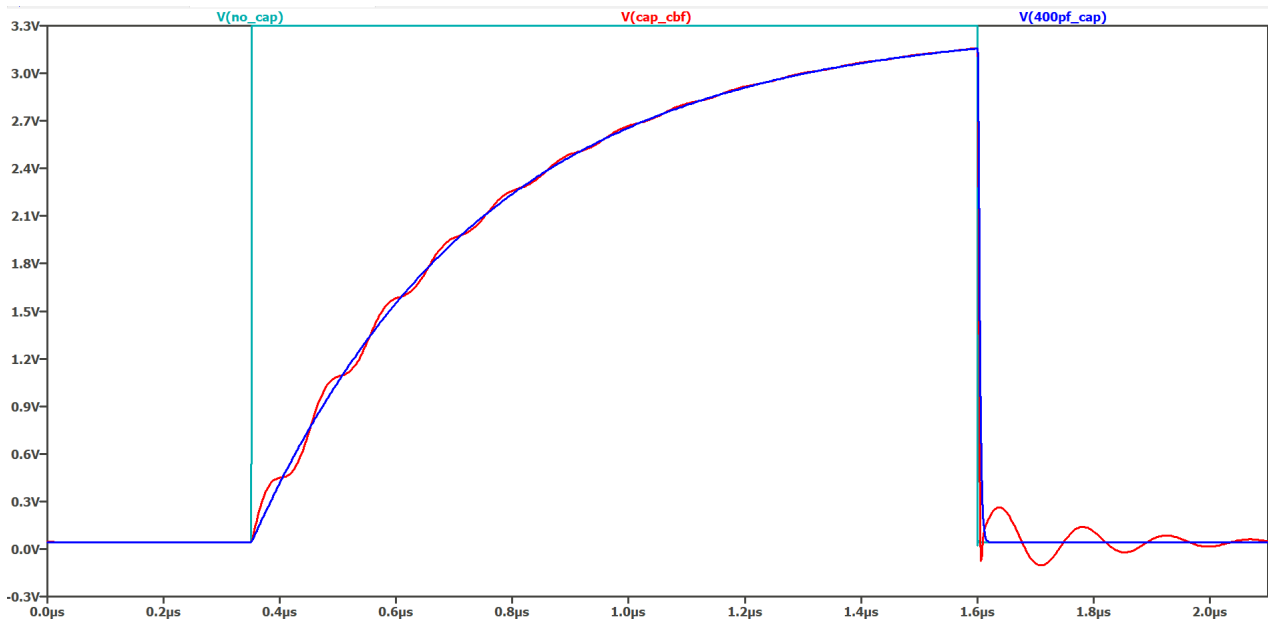


Abbildung 4: LTspice-Simulationsergebnis Time Domain 0 pF (Türkis), 400 pF (Blau) & 400 pF+ Multilayer-SMT-Ferrit (Rot)

Das Simulationsergebnis zeigt, dass von dem Multilayer-SMT-Ferrit praktisch kein Einfluss auf die Anstiegszeit des Signals zu erwarten ist. Dadurch, dass jeder Multilayer-SMT-Ferrit auch einen Induktivitätsanteil hat, sind in Kombination mit der Buskapazität geringfügige Oszillationen sichtbar. Diese sind allerdings unkritisch, da deren Amplituden kleiner als 10% des eigentlichen Nutzsignals sind. In der realen Messung fallen diese Oszillationen sogar noch deutlich geringer aus.

07. MESSUNG EINER REALEN APPLIKATION MIT 400 KHZ TAKTRATE

Um die relativ simple LTspice-Simulation zu verifizieren, wurden zusätzlich Messungen an einem Würth Elektronik [SensorBLE FeatherWing Kit](#) durchgeführt.

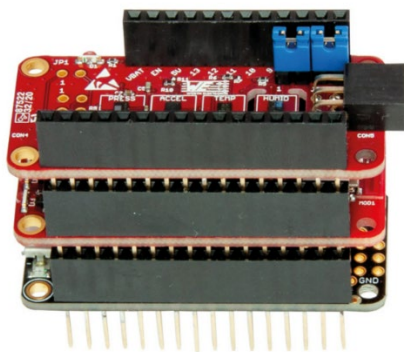


Abbildung 5: Würth Elektronik SensorBLE FeatherWing Kit

Dieses Kit besteht aus einer Masterplatine, welche den Mikrokontroller enthält. Die anderen beiden enthalten ein WE Bluetooth Modul sowie verschiedene WE Sensoren (3-Achsen Beschleunigung, Temperatur, Feuchtigkeit, Druck). Die Masterplatine kommuniziert mit den anderen beiden via I²C-Bus bei einer max. Datenrate von 400 kBit/s. Mit einer passenden Smartphone-App (WE-SensorBLE) können die Sensordaten dann visualisiert werden. Mithilfe von MLCCs wurde eine parasitäre Kapazität von 400 pF gegenüber GND nachgestellt. Es wurde zudem derselbe Multilayer-SMT-Ferrit (742792693) wie in der Simulation verbaut, plus ein TVS-Diodenarray (824012823). Außerdem wurden 20 cm Kabellitzen verwendet, um die Sensorplatine mit dem restlichen I²C zu verbinden. Eine solche Anordnung lässt sich in vielen Applikationen in der Praxis beobachten.

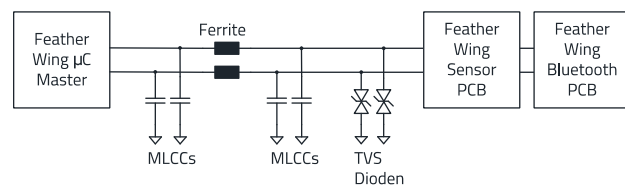


Abbildung 6: Blockschaltbild Testaufbau mit Würth Elektronik SensorBLE FeatherWing Kit

Gemessen wurde immer der Spannungsverlauf an der SCL Leitung.

APPLICATION NOTE

ANP121 | Filter und Überspannungsschutz für I²C-Bus

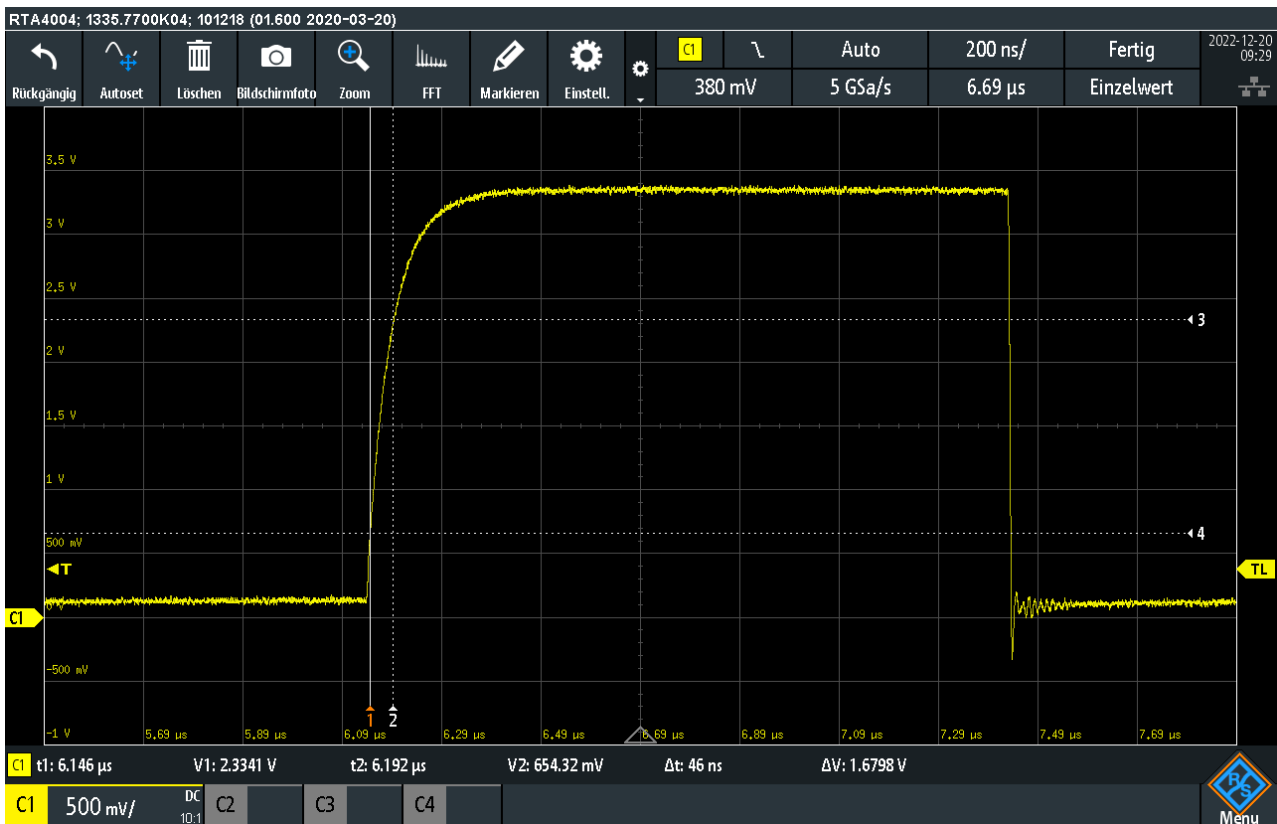


Abbildung 7: Referenzmessung mit 1 kΩ Pullups ohne weitere Änderungen der verwendeten FeatherWing Hardware (= 46 ns Anstiegszeit)

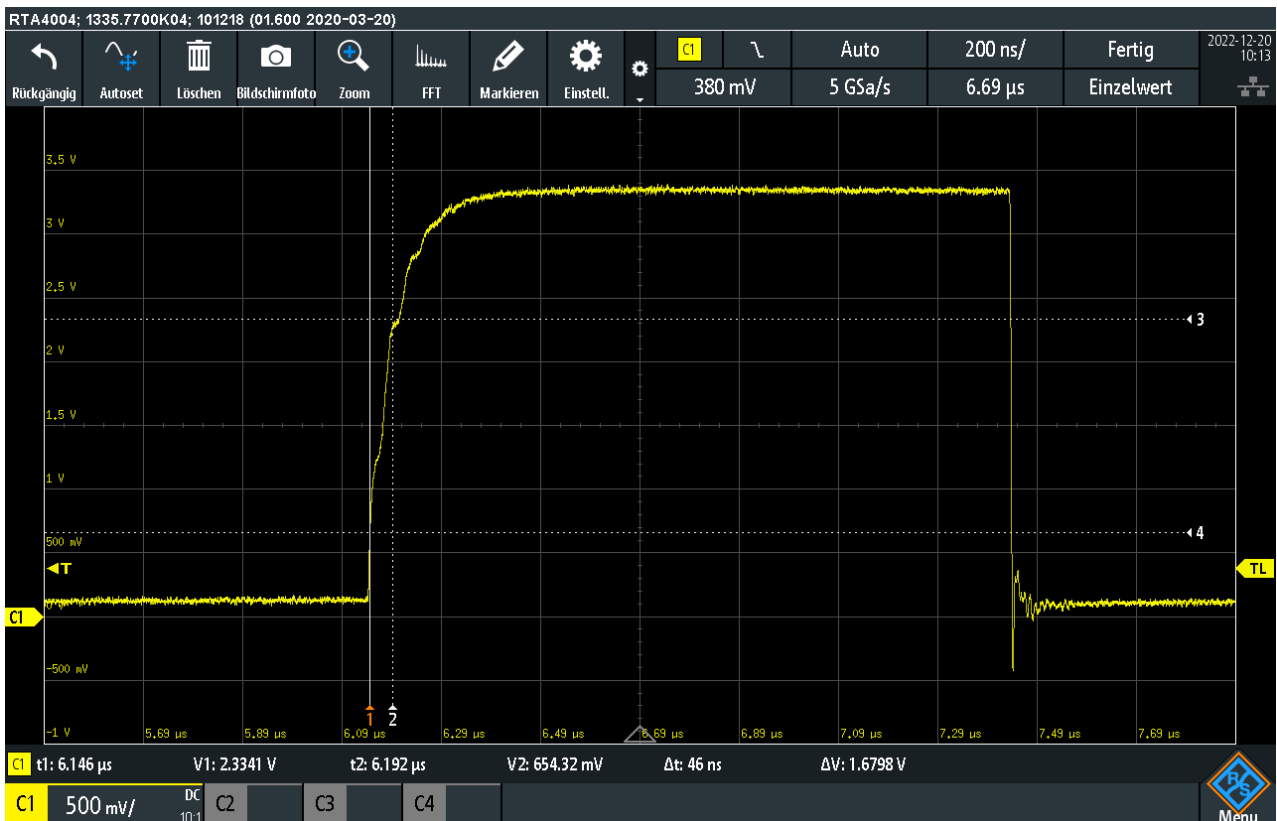


Abbildung 8: Referenzmessung mit 1 kΩ Pullups + Multilayer-SMT-Ferrit + TVS-Diodenarray + 20 cm Kabellitzen (= 46 ns Anstiegszeit)

APPLICATION NOTE

ANP121 | Filter und Überspannungsschutz für I²C-Bus

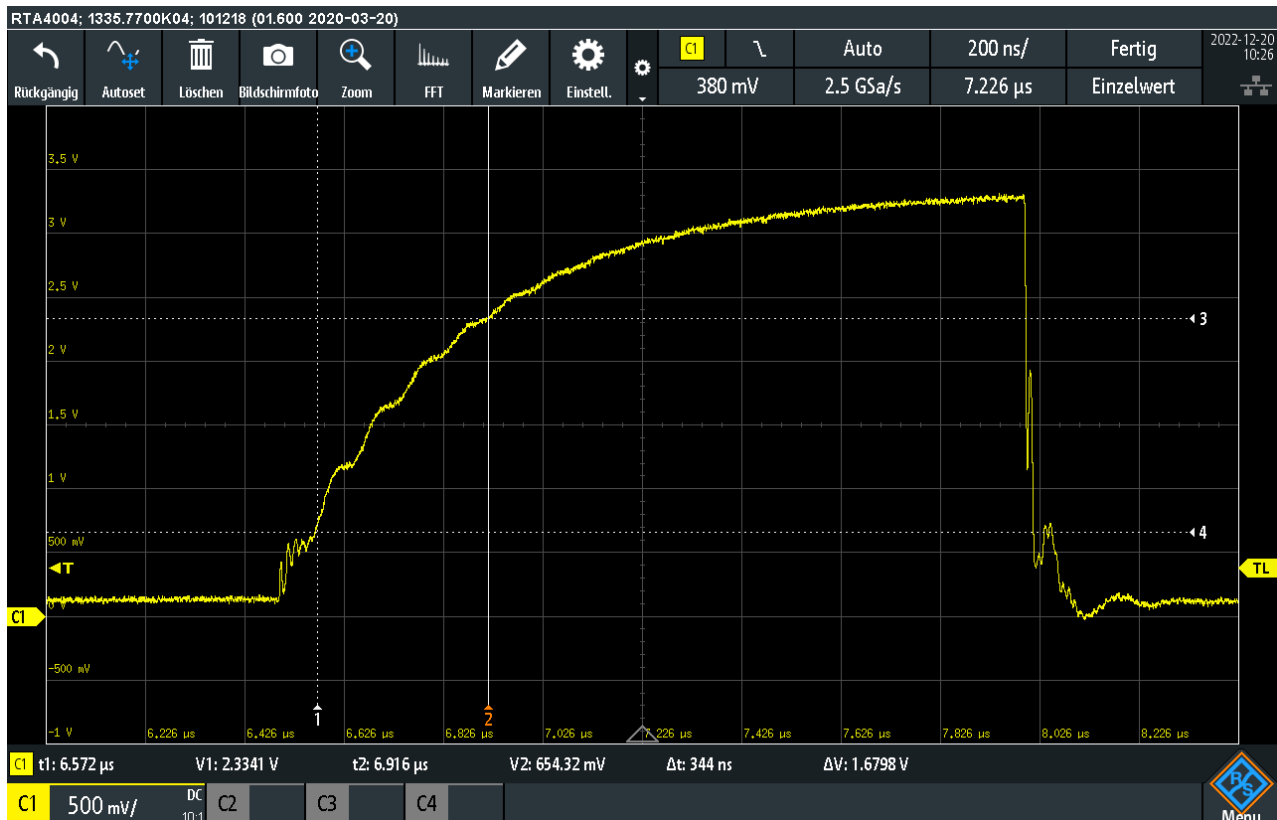


Abbildung 9: Referenzmessung mit 1 k Ω Pullups + Multilayer-SMT-Ferrit + TVS-Diodenarray + 20 cm Kabellitzen + 400 pF MLCCs (= 344 ns Anstiegszeit)

Die Messungen zeigen praktisch ein identisches Ergebnis wie die Simulation. Die Anstiegszeit als auch die Signalqualität werden von dem Multilayer-SMT-Ferrit in Kombination mit der TVS-Diode nicht relevant negativ beeinflusst. Die als kritisch für das Timing zu bewertende Anstiegszeit des High-Signals hängt nur von der Buskapazität in Kombination mit den gewählten Pullup-Widerständen ab. Mithilfe der Smartphone-App (WE-SensorBLE) konnte in allen drei getesteten Szenarien eine fehlerfreie Funktion verifiziert werden.

08. ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Appnote konnte mithilfe von Simulation und Messung gezeigt werden, dass SMT-Ferrite in Kombination mit ESD-Schutzdioden das Datensignal (SDA) und das Taktsignal (SCL) des I²C-Bus praktisch nicht beeinflussen. Die Flankensteilheit der Signale wird größtenteils durch die Pullup-Widerstände in Kombination mit der parasitären Buskapazität beeinflusst. Im Gegenzug erhöht diese Bauteilkombination aus ESD-Schutzdiode und breitbandig wirkendem SMT-Ferrit die Störfestigkeit des I²C-Bus. In der Praxis bedeutet das insbesondere eine höhere Immunität gegen ESD, Burst als auch eingestrahelter HF.

APPLICATION NOTE

ANP121 | Filter und Überspannungsschutz für I²C-Bus

A Anhang

A.1 Stückliste/BOM

Index	Beschreibung	Wert	Baugröße	Artikelnummer
L	WE-CBF Wide Band SMT-Ferrit	Z = 2,2 kΩ @ 100 MHz	0603	742792693
D	WE-TVS Super Speed TVS Diodearray, 2 channel ESD Protection,	V _{CC} = 3,3 V	DFN1210	824012823

A.2 Relevante Normen

ESD Test: DIN EN 61000-4-2 / IEC 61000-4-2

Burst Test: DIN EN 61000-4-4 / IEC 61000-4-4

Eingestrahlte HF: DIN EN 61000-4-3 / IEC 61000-4-3

A.3 Literatur

SLVA689 – I²C-Bus Pull-up Resistor Calculation

APPLICATION NOTE

ANP121 | Filter und Überspannungsschutz für I²C-Bus

WICHTIGER HINWEIS

Der Anwendungshinweis basiert auf unserem aktuellen Wissens- und Erfahrungsstand, dient als allgemeine Information und ist keine Zusicherung der Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG zur Eignung des Produktes für Kundenanwendungen. Der Anwendungshinweis kann ohne Bekanntgabe verändert werden. Dieses Dokument und Teile hiervon dürfen nicht ohne schriftliche Genehmigung vervielfältigt oder kopiert werden. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG und seine Partner- und Tochtergesellschaften (nachfolgend gemeinsam als „WE“ genannt) sind für eine anwendungsbezogene Unterstützung jeglicher Art nicht haftbar. Kunden sind berechtigt, die Unterstützung und Produktempfehlungen von WE für eigene Anwendungen und Entwürfe zu nutzen. Die Verantwortung für die Anwendbarkeit und die Verwendung von WE-Produkten in einem bestimmten Entwurf trägt in jedem Fall ausschließlich der Kunde. Aufgrund dieser Tatsache ist es Aufgabe des Kunden, erforderlichenfalls Untersuchungen anzustellen und zu entscheiden, ob das Gerät mit den in der Produktspezifikation beschriebenen spezifischen Produktmerkmalen für die jeweilige Kundenanwendung zulässig und geeignet ist oder nicht. Die technischen Daten sind im aktuellen Datenblatt zum Produkt angegeben. Aus diesem Grund muss der Kunde die Datenblätter verwenden und wird ausdrücklich auf die Tatsache hingewiesen, dass er dafür Sorge zu tragen hat, die Datenblätter auf Aktualität zu prüfen. Die aktuellen Datenblätter können von www.we-online.com heruntergeladen werden. Der Kunde muss produktspezifische Anmerkungen und Warnhinweise strikt beachten. WE behält sich das Recht vor, an seinen Produkten und Dienstleistungen Korrekturen, Modifikationen, Erweiterungen, Verbesserungen und sonstige Änderungen vorzunehmen. Lizenzen oder sonstige Rechte, gleich welcher Art, insbesondere an Patenten, Gebrauchsmustern, Marken, Urheber- oder sonstigen gewerblichen Schutzrechten

werden hierdurch weder eingeräumt noch ergibt sich hieraus eine entsprechende Pflicht, derartige Rechte einzuräumen. Durch Veröffentlichung von Informationen zu Produkten oder Dienstleistungen Dritter gewährt WE weder eine Lizenz zur Verwendung solcher Produkte oder Dienstleistungen noch eine Garantie oder Billigung derselben.

Die Verwendung von WE-Produkten in sicherheitskritischen oder solchen Anwendungen, bei denen aufgrund eines Produktausfalls sich schwere Personenschäden oder Todesfällen ergeben können, sind unzulässig. Des Weiteren sind WE-Produkte für den Einsatz in Bereichen wie Militärtechnik, Luft- und Raumfahrt, Nuklearsteuerung, Marine, Verkehrswesen (Steuerung von Kfz, Zügen oder Schiffen), Verkehrssignalanlagen, Katastrophenschutz, Medizintechnik, öffentlichen Informationsnetzwerken usw. weder ausgelegt noch vorgesehen. Der Kunde muss WE über die Absicht eines solchen Einsatzes vor Beginn der Planungsphase (Design-In-Phase) informieren. Bei Kundenanwendungen, die ein Höchstmaß an Sicherheit erfordern und die bei Fehlfunktionen oder Ausfall eines elektronischen Bauteils Leib und Leben gefährden können, muss der Kunde sicherstellen, dass er über das erforderliche Fachwissen zu sicherheitstechnischen und rechtlichen Auswirkungen seiner Anwendungen verfügt. Der Kunde bestätigt und erklärt sich damit einverstanden, dass er ungeachtet aller anwendungsbezogenen Informationen und Unterstützung, die ihm durch WE gewährt wird, die Gesamtverantwortung für alle rechtlichen, gesetzlichen und sicherheitsbezogenen Anforderungen im Zusammenhang mit seinen Produkten und der Verwendung von WE-Produkten in solchen sicherheitskritischen Anwendungen trägt. Der Kunde hält WE schad- und klaglos bei allen Schadensansprüchen, die durch derartige sicherheitskritische Kundenanwendungen entstanden sind.

NÜTZLICHE LINKS



Application Notes
www.we-online.com/app-notes



REDEXPERT Design Plattform
www.we-online.com/redexpert



Toolbox
www.we-online.com/toolbox



Produkt Katalog
www.we-online.com/produkte

KONTAKTINFORMATION



appnotes@we-online.de
Tel. +49 7942 945 - 0



Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG
Max-Eyth-Str. 1 · 74638 Waldenburg
Germany
www.we-online.com