

I²C-Bus-Kommunikation mit digitalen Drucksensoren der HTD, HMI, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Serie

1 EINFÜHRUNG

Die digitalen Drucksensoren der HTD, HMI-, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Serie nutzen einen internen ASIC zur Kalibrierung, Temperaturkompensation und Ausgabe eines fehlerkorrigierten digitalen Ausgangssignals. Bei der HTD, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Serie steht zusätzlich ein analoges Ausgangssignal zur Verfügung. Die Reaktionszeit der Sensoren ist abhängig von der eingestellten Auflösung und beträgt bei 12 Bit typisch 0,5 ms.

Die HTD, HMI-, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Sensoren sind für die I²C-Bus-Kommunikation konfiguriert.

Der I²C-Bus ist ein einfacher, serieller 8-Bit-Datenbus. Er eignet sich für die Kommunikation zwischen verschiedenen Schaltkreisen (daher der Name Inter-IC bzw. I²C) über kurze Distanzen, z.B. zur Verbindung eines Mikrocontrollers mit verschiedenen Peripheriebausteinen auf einer Platine. Jeder Busteilnehmer besitzt eine eigene Adresse, über die er eindeutig angesprochen werden kann. Der I²C-Bus benötigt nur zwei bidirektionale Leitungen: eine Taktleitung (Serial Clock Line, SCL) und eine Datenleitung (Serial Data Line, SDA). Die Datenübertragungsrate ist frei wählbar und beträgt max. 400 kbit/s.

2 I²C-BUS-PROTOKOLL

2.1 Allgemeine Merkmale

Der I²C-Bus ist als Master-Slave-Bus konzipiert. Zwei bidirektionale Leitungen, die Taktleitung (SCL) und die Datenleitung (SDA), übertragen Informationen zwischen den einzelnen IC's (siehe Bild 1). Jeder Schaltkreis mit einer I²C-Schnittstelle kann an den Bus angeschlossen werden. SCL und SDA müssen über entsprechende Pull-Up-Widerstände mit einer positiven Versorgungsspannung verbunden sein (siehe Abschnitt 4, Busverdrahtung). Im Ruhezustand befinden sich beide Leitungen auf HIGH-Pegel. Sie können nur durch die angeschlossenen IC's auf LOW-Pegel (Masse) gezogen werden.

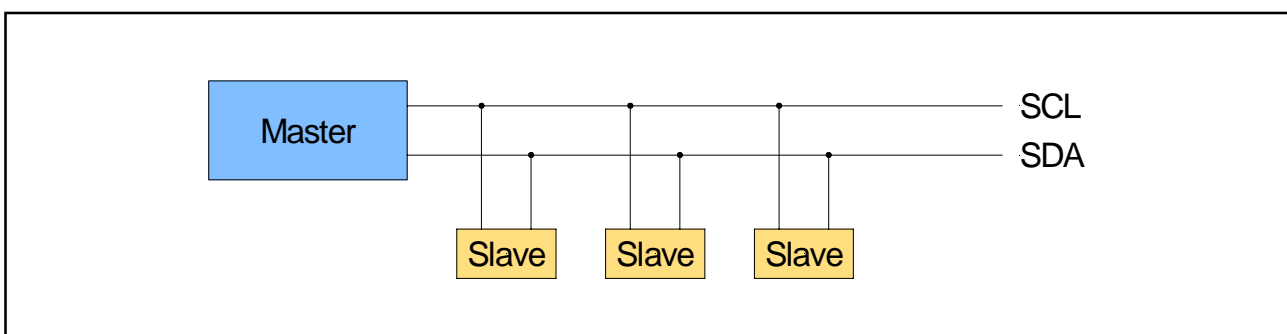


Bild 1: Beispiel eines I²C-Bus-Aufbaus

I²C-Bus-Kommunikation mit digitalen Drucksensoren der HTD, HMI, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Serie

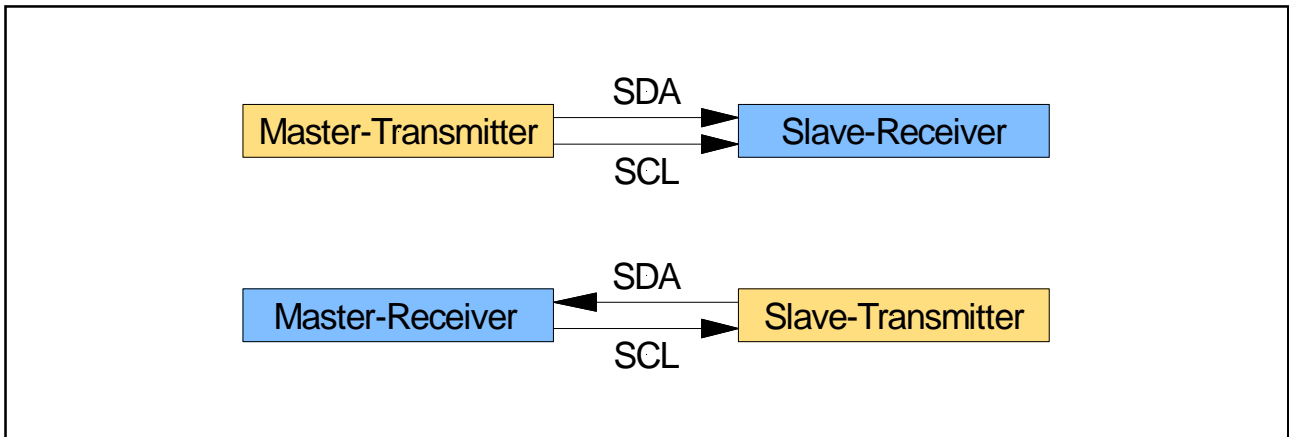


Bild 2: Master-Slave-Konzept des I²C-Busses

2.2 Master-Slave Konzept

Der I²C-Bus nutzt ein einfaches Master-Slave-Konzept. Der Master initialisiert eine Datenübertragung (START-Bedingung), generiert den Takt (SCL) und beendet die Übertragung (STOP-Bedingung). Geräte, die vom Master adressiert werden, bezeichnet man als Slaves.

Master und Slaves können als Transmitter und Receiver arbeiten (siehe Bild 2). Der Transmitter sendet Daten und der Receiver empfängt sie. Adressiert ein Master einen Slave und sendet danach selber Daten an diesen, spricht man von einem Master-Transmitter und Slave-Receiver. Empfängt der Master hingegen Daten vom Slave, spricht man von einem Master-Receiver und Slave-Transmitter.

HINWEIS:

Die digitalen HTD, HMI-, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Drucksensoren arbeiten ausschließlich als Slave-Transmitter, d.h. es ist nur möglich, Druckwerte vom Sensor auszulesen.

2.3 Gültige Datenübertragung

Daten werden mit dem HIGH-Pegel des Taktes als gültig erkannt (siehe Bild 3). Dabei ist wichtig, dass die Daten auf SDA während dieser Phase stabil sind. Liegt die Datenleitung auf HIGH, wird eine "1" übertragen, liegt sie auf LOW, eine "0". Der Wert der Datenleitung darf nur geändert werden, während der Takt auf LOW liegt.

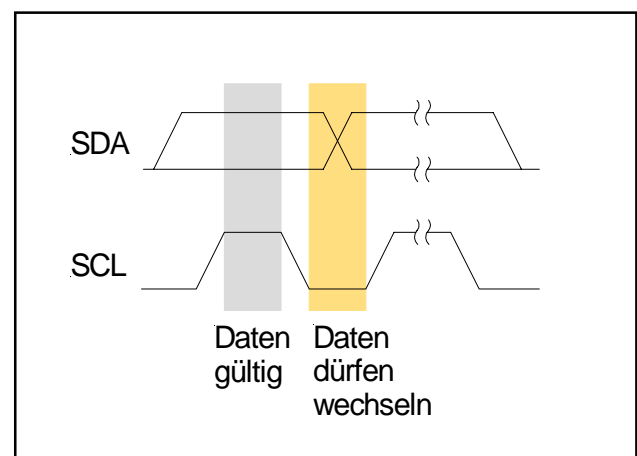


Bild 3: Gültige I²C-Bus-Datenübertragung

2.4 START (S) und STOP (P) Bedingungen

Jede Übertragungssequenz beginnt mit einer START-Bedingung, die vom Master ausgehen wird. Durch die START-Bedingung werden alle angeschlossenen IC's informiert, dass ein Datentransfer bevorsteht und der Bus gilt von jetzt an als belegt. Zur Beendigung der Übertragung sendet der Master eine STOP-Bedingung. Hierdurch signalisiert er allen Teilnehmern, dass keine weiteren Daten übertragen werden sollen und der Bus wieder frei ist.

Die START-Bedingung wird durch eine fallende Flanke auf der SDA-Leitung erzeugt, während sich SCL auf HIGH befindet. Die STOP-Bedingung wiederum ist definiert als steigende Flanke auf SDA, während SCL HIGH ist (siehe Bild 4).

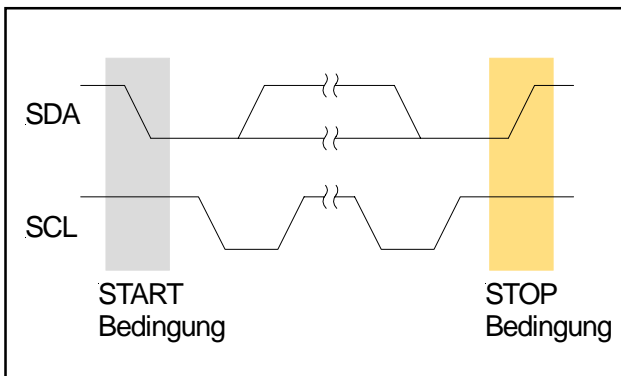


Bild 4: START- und STOP-Bedingung des I²C-Busses

2.5 Datenformat

Die Daten werden als Bytes im 8-Bit-Format übertragen. Dabei wird das höchstwertige Bit (MSB=Most Significant Bit) zuerst übermittelt (siehe Bild 5).

	MSB							LSB
Dual	0	1	1	0	1	1	0	1
Dezimal	128	64	32	16	8	4	2	1

Bild 5: I²C-Bus-Datenformat

2.6 Adressierung und Datenrichtung

Jeder Busteilnehmer besitzt eine eigene, feste Adresse, über die er eindeutig auf dem Bus identifiziert werden kann. Unmittelbar nach der START-Bedingung sendet der Master mit dem ersten Byte die Adresse eines Slaves seiner Wahl, mit dem er kommunizieren will. Die Adresse ist 7 Bit lang, gefolgt von Bit 8, dem Datenrichtungs-Bit (R/ \bar{W} -Bit). R/ \bar{W} =0 (WRITE) bedeutet, dass der Master Daten an den Slave senden möchte und somit zum Master-Transmitter wird. R/ \bar{W} =1 (READ) bedeutet, dass der Master Daten vom Slave auslesen möchte und die Funktion des Master-Receiver übernimmt.

MSB							LSB
7-Bit-Adresse							R/ \bar{W}
b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0

Bild 6: I²C-Bus-Adress-Byte

Nachdem der Master die Adresse übermittelt hat, vergleichen alle an den Bus angeschlossenen Slaves diese Adresse mit ihrer eigenen. Stimmt sie überein, sendet der angesprochene Slave eine Bestätigung (siehe 2.7) und meldet sich so bereit für die anschließende Datenübertragung.

Die 7-Bit-Adressierung erlaubt $2^7=128$ verschiedene Adressen auf dem gleichen Bus. Da einige Adressen für Sonderzwecke reserviert sind, ist die Anzahl in der Praxis jedoch geringer. Die Zahl der Busteilnehmer wird weiterhin durch die zulässige Gesamtkapazität aller angeschlossenen Geräte und deren Zuleitungen beschränkt ($C_{SDA}=400$ pF).

HINWEIS:

Alle I²C-Bus-Drucksensoren der HTD, HMI-, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Serie haben eine feste allgemeine Adresse (0x1111000b). Zusätzlich kann für jeden Sensor eine individuelle Adresse nach Festlegung des Kunden programmiert werden, wobei bis zu 127 Adressmöglichkeiten bestehen. Der Sensor kann dann über beide Adressen angesprochen werden.

2.7 Bestätigung (ACK oder A)

Jedes Byte, das über den Bus gesendet wird, muss vom Empfänger bestätigt werden. Die Bestätigung bedeutet, dass die Daten korrekt empfangen wurden und der Datentransfer fortgesetzt werden kann.

Der Master muss für die Bestätigung einen extra Taktpuls generieren. Der Sender (Transmitter) gibt nach dem übertragenen Byte die Datenleitung frei (HIGH-Pegel durch Pull-Up-Widerstand). Zur Bestätigung zieht der Empfänger (Receiver) die Datenleitung auf LOW. Wichtig: Diese Bestätigung muss so erfolgen, dass sich die SDA-Leitung während des gesamten Taktpulses, d.h. vom Beginn der ansteigenden Flanke bis zum Ende der fallenden Flanke, auf einem stabilen LOW-Pegel befindet (siehe Bild 7).

Möchte der Receiver kein weiteres Byte mehr empfangen, lässt er SDA auf HIGH und sendet so eine Nicht-Bestätigung (NACK oder \bar{A}). Der Master kann nun die Datenübertragung mit einer STOP-Bedingung beenden.

I²C-Bus-Kommunikation mit digitalen Drucksensoren der HTD, HMI, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Serie

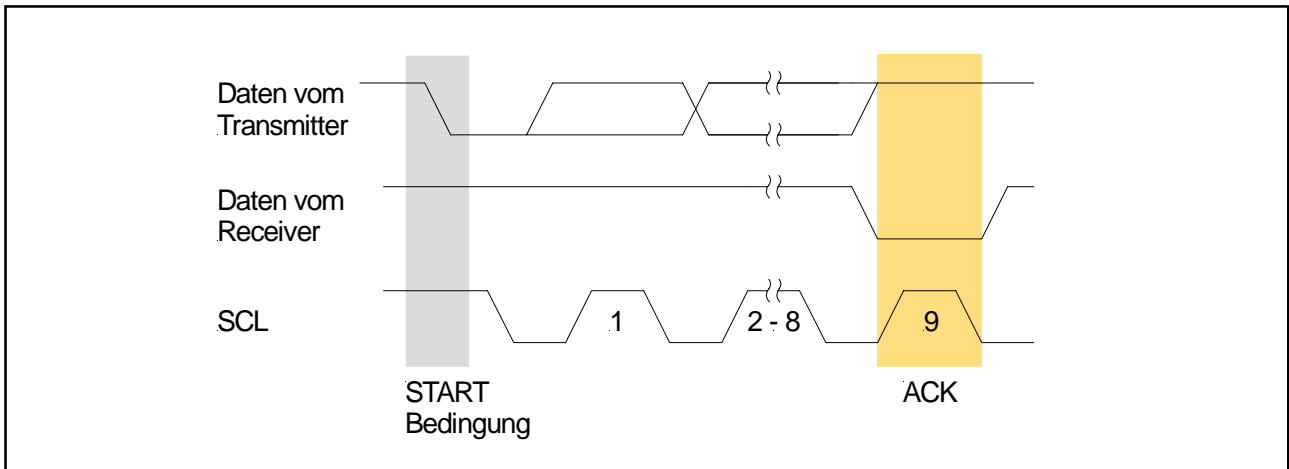


Bild 7: Bestätigung (ACK) empfangener Daten

2.8 Vollständiger Datentransfer

Bild 8 zeigt das Beispiel eines vollständigen I²C-Bus-Datentransfers. Nach der START-Bedingung sendet der Master die Adresse eines von ihm ausgewählten Slaves. Das Datenrichtungs-Bit (R/W) bestimmt, ob es sich um einen READ- oder WRITE-Transfer handelt. Der angesprochene Slave bestätigt (ACK) den korrekten Erhalt des ersten Daten-Bytes.

Nun kann eine unbegrenzte Anzahl weiterer Daten-Bytes übertragen werden, jeweils gefolgt von einer Bestätigung durch den Empfänger.

Die Datenübertragung wird immer mit Hilfe einer STOP-Bedingung durch den Master beendet. Wenn der Master danach weiter über den Bus kommunizieren will, muss er eine erneute START-Bedingung senden und eine neue Datenübertragung beginnen.

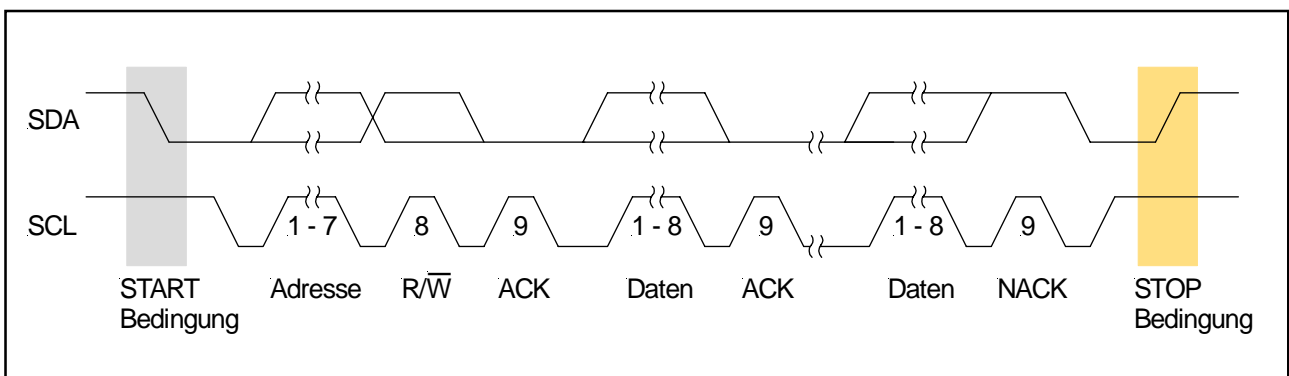


Bild 8: Beispiel einer vollständigen I²C-Bus-Datenübertragung

I²C-Bus-Kommunikation mit digitalen Drucksensoren der HTD, HMI, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Serie

3 DATENTRANSFER MIT HTD, HMI-, HDI-, HCLA-, HCA- UND SSI-DRUCKSENSOREN

Die digitalen HTD, HMI-, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Drucksensoren arbeiten ausschließlich als Slave-Transmitter, d.h. sie reagieren nur auf READ-Anfragen eines Masters zum Auslesen von Druckwerten.

3.1 Auslesen von Druckwerten

Um einen Auslesevorgang zu starten, sendet der Master nach der START-Bedingung die entsprechende Sensoradresse (entweder 0x1111000bin oder die kundenspezifisch festgelegte Adresse) gefolgt von einem Lesebefehl ($R/\overline{W}=1$) (siehe Bild 9). Nach der Bestätigung des Datenempfangs (A) durch den Sensor wird der Master zum Empfänger und der Drucksensor zum Sender. Der Sensor sendet nun 2 Daten-Bytes mit dem aktuell gemessenen Druckwert als 15-Bit-Information (siehe Bild 10). Der Master muss nach dem ersten Byte eine Bestätigung senden und kann den Auslesevorgang nach dem zweiten Byte durch eine STOP-Bedingung beenden. Er hat jedoch genauso die Möglichkeit, kontinuierlich weitere Druckwerte auszulesen. Hierzu muss der Master nach dem letzten übertragenen Byte eine weitere Bestätigung senden. Der Drucksensor fährt dann mit dem Senden aktueller Werte fort.

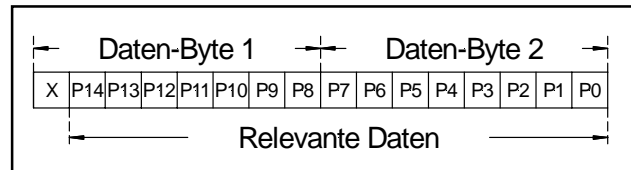


Bild 10: Druckwert als 15-Bit-Information

HINWEIS:

Bei einer SCL-Taktfrequenz von 400 kHz dauert die Übertragung von 2 Bytes ca. 40 µs. Die interne Sensor-Durchlaufzeit zur Berechnung und Ausgabe eines neuen Druckwerts beträgt bei einer Auflösung von 12 Bit jedoch 250 µs. Deshalb empfängt der Master bei einer kontinuierlichen Abfrage des Sensors mit 400 kHz bis zu siebenmal den selben Druckwert! Für weitere Informationen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

3.2 Auslesen von Temperaturwerten (optional)

Optional bieten die Sensoren die Möglichkeit der Ausgabe eines zusätzlichen 15-Bit-Temperaturwerts. Dieser wird als drittes und viertes Byte nach den beiden Druck-Bytes übertragen. Bestätigt der Master das vierte Byte, fährt der Sensor mit dem Senden weiterer kombinierter Druck- und Temperaturwerte fort, bis die Übertragung mit einem STOP-Befehl beendet wird.

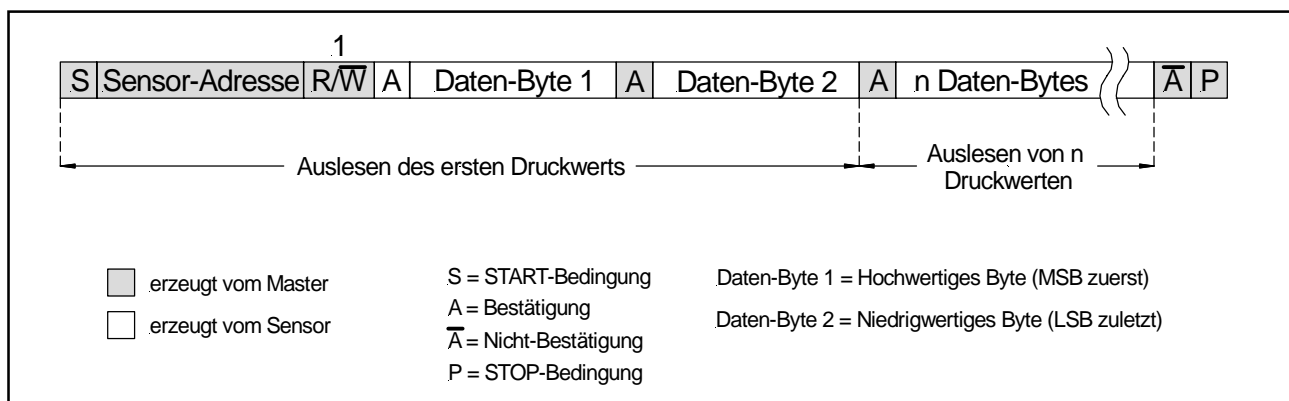


Bild 9: I²C-Bus-Auslesevorgang von digitalen Druckwerten

I²C-Bus-Kommunikation mit digitalen Drucksensoren der HTD, HMI, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Serie

3.3 Berechnung des Druckwerts aus dem Digitalwert

Mit Hilfe der folgenden Formeln kann aus der digitalen Druckwert-Information der tatsächliche physikalische Druckwert berechnet werden:

Definitionen:

- S = Empfindlichkeit [counts/mbar]
- Out_{max} = Ausgabe bei max. Druck [counts]
- Out_{min} = Ausgabe bei min. Druck [counts]
- P_{max} = Druckbereichs-Endwert [mbar]
- P_{min} = Druckbereichs-Anfangswert [mbar]
- P = Druckmesswert [mbar]
- P_{counts} = Digitaler Druckmesswert [counts]

$$S = \frac{Out_{max} - Out_{min}}{P_{max} - P_{min}} \quad (1)$$

$$P = \frac{P_{counts} - Out_{min}}{S} + P_{min} \quad (2)$$

Als Berechnungsbeispiel dient der Drucksensor HCLA0050...U mit einem unidirektionalen Druckbereich von 0...50 mbar. Für die folgenden Berechnungen werden die typischen Kalibrierwerte verwendet. Die individuellen Sensoren können hiervon geringfügig abweichen (die entsprechenden Toleranzen sind im Datenblatt angegeben).

$$\begin{aligned} Out_{min} &= 0666 \text{ counts hex} = 1638 \text{ counts dec} \\ Out_{max} &= 6CCC \text{ counts hex} = 27852 \text{ counts dec} \end{aligned}$$

Die Empfindlichkeit des Sensors berechnet sich aus Formel (1) wie folgt:

$$S = \frac{27852 \text{ counts} - 1638 \text{ counts}}{50 \text{ mbar} - 0 \text{ mbar}} = 524,28 \text{ counts/mbar}$$

Für einen digitalen Druckmesswert von

$$P_{counts} = 5080 \text{ counts hex} = 20608 \text{ counts dec}$$

berechnet sich der physikalische Druckmesswert nach Formel (2) zu:

$$P = \frac{20608 \text{ counts} - 1638 \text{ counts}}{524,28 \text{ counts/mbar}} + 0 \text{ mbar} = \underline{\underline{36,18 \text{ mbar}}}$$

3.4 Auflösung

Jeder Druck- und Temperaturwert wird als 15-Bit-Information übertragen. Die tatsächliche Auflösung des Messwerts ist jedoch abhängig von der Einstellung des internen A/D-Wandlers und kann daher geringer sein. Die Auflösung kann sich außerdem durch interne Rechenvorgänge und Verluste bei der Abtastung des Signals (Fensterung) verschlechtern. In der Standardeinstellung beträgt die interne Auflösung 12 Bit, was zu einer tatsächlichen Auflösung des Messwerts von 11 bis 12 Bit führt. Die erreichbare Auflösung der Temperaturmessung wird zusätzlich durch die Empfindlichkeit des Sensorelements beschränkt. Für weitere Informationen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

I²C-Bus-Kommunikation mit digitalen Drucksensoren der HTD, HMI, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Serie

3.5 Zeitbedingungen

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Einheit
Zeit, die der Bus zwischen STOP- und START-Bedingung frei sein muss	t_{BUF}	1.3			µs
Halte-Zeit für START-Bedingung bis zum ersten Taktimpuls	$t_{\text{HD;STA}}$	0.8			
LOW-Periode des Taktsignals	t_{LOW}	1.3			
HIGH-Periode des Taktsignals	t_{HIGH}	0.6			
Setup-Zeit für wiederholte START-Bedingung	$t_{\text{SU;STA}}$	1			
Halte-Zeit für Daten	$t_{\text{HD;DAT}}$	0			
Setup-Zeit für Daten	$t_{\text{SU;DAT}}$	0.2			
Anstiegszeit für SCL und SDA	t_{R}			0.3	
Abfallzeit für SCL und SDA	t_{F}			0.3	
Setup-Zeit für STOP-Bedingung	$t_{\text{SU;STO}}$	0.6			

Tabelle 1: Zeitbedingungen für die I²C-Bus-Kommunikation mit Drucksensoren der HTD, HMI-, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Serie

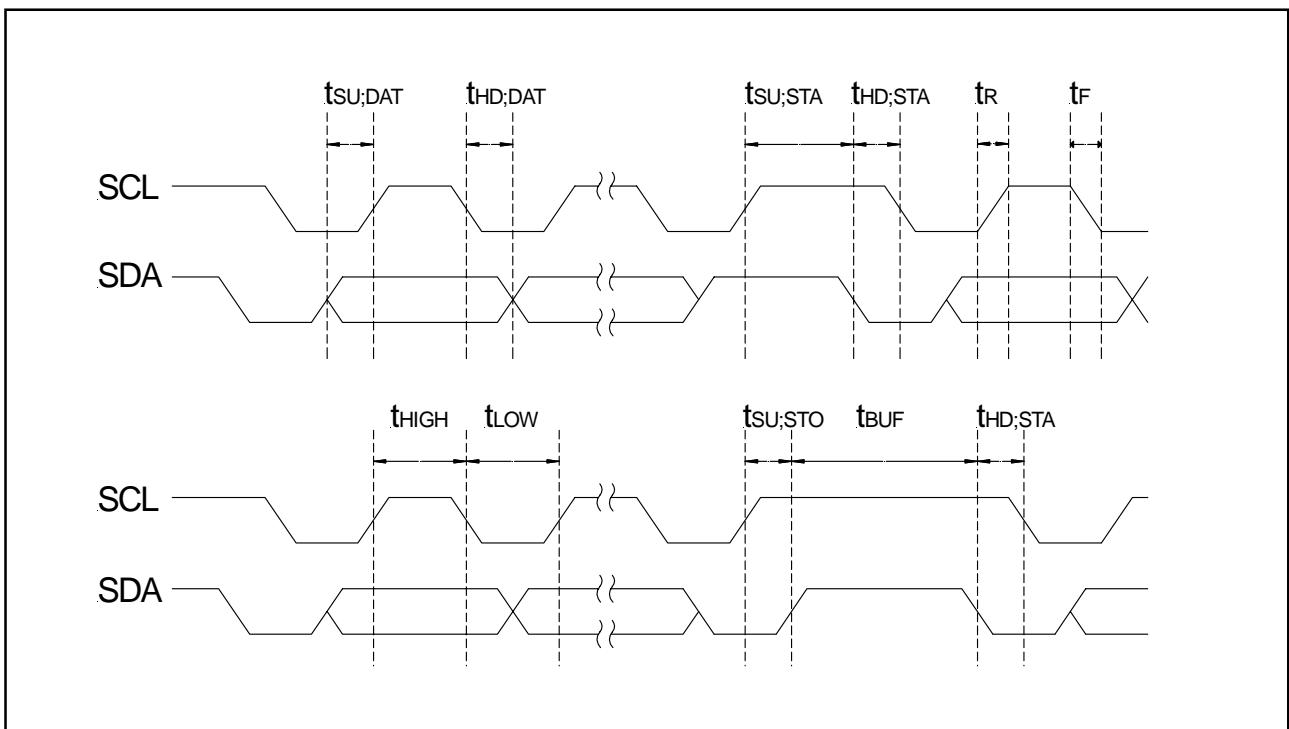


Bild 11: I²C-Bus-Zeitverläufe

I²C-Bus-Kommunikation mit digitalen Drucksensoren der HTD, HMI, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Serie

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Eingehender HIGH-Pegel		90		100	% von V _S
Eingehender LOW-Pegel		0		10	
Ausgehender LOW-Pegel				10	
Pull-Up-Widerstand		500			Ω
Lastkapazität	C _{SDA}			400	pF
Eingangskapazität	C _{I²C_IN}			10	
SCL Taktfrequenz	f _{SCL}	100*		400	kHz

* empfohlen (siehe Hinweis auf dieser Seite unten)

Tabelle 2: Parameter für die I²C-Bus-Kommunikation mit Drucksensoren der HTD, HMI-, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Serie

3.6 Übertragungsgeschwindigkeit

Die maximal erlaubte Kommunikations-Geschwindigkeit wird durch die intern eingestellte Taktfrequenz der HTD, HMI-, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Sensoren bestimmt. Diese beträgt in der Standardeinstellung 400 kHz und entspricht damit dem Fast-Mode der I²C-Bus-Spezifikation.

3.7 Elektromagnetische Störungen

Die steilen Flanken der SCL- und SDA-Signale können elektromagnetische Störungen verursachen. Speziell bei Niederst druck-sensoren und bei sehr nahe aneinander liegenden Bus-Leitungen bzw. IC's, kann dies zu Störungen des von der Sensor-Messbrücke erzeugten analogen mV-Signals führen.

HINWEIS:

Zur Verhinderung elektromagnetischer Störungen wird eine Taktfrequenz von min. 100 kHz (max. 400 kHz) und Übertragungspausen von min. 500 µs zwischen zwei Druckwertübertragungen empfohlen. Dies ist vor allem für alle Niederst druckversionen bis 25 mbar relevant. Für weitere Informationen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Bei gleichzeitiger Nutzung der digitalen I²C-Bus-Signale und des analogen Spannungsausgangs sollten die betreffenden Leitungen so weit wie möglich voneinander getrennt werden. Zusätzlich empfehlen sich Entstörkondensatoren von 220 nF zwischen Versorgungsspannung und Masse und 15 nF zwischen analogem Ausgang und Masse.

4 ANWENDERSCHALTUNG

Beide Bus-Leitungen, SCL und SDA, müssen über jeweils einen Pull-Up-Widerstand (R_p) an die Sensor-Versorgungsspannung angeschlossen sein (siehe Bild 12). Es werden 1,5 kΩ Widerstände empfohlen. Zusätzlich sollten in beiden Bus-Leitungen Widerstände von max. 240 Ω in Reihe geschaltet werden (R_s).

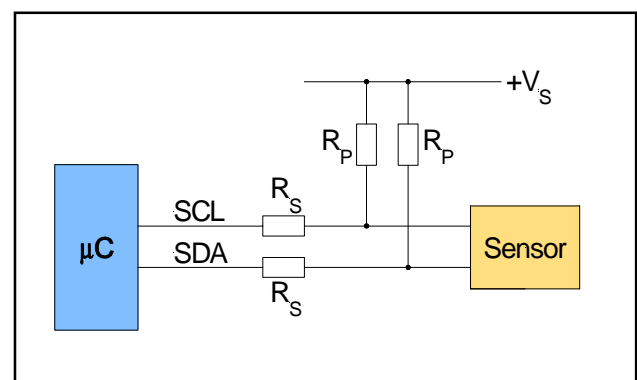


Bild 12: I²C-Bus-Anwenderschaltung für HTD, HMI-, HDI-, HCLA-, HCA- und SSI-Drucksensoren

5 BEI PROBLEMEN

5.1 Sensor liefert instabile Werte

- Sind die Hinweise zur elektromagnetischen Einstrahlung unter Punkt 3.7 eingehalten?

5.2 Sensor reagiert nicht

- Bei HTD, HDI, HCLA, HCA, SSI:
Prüfen Sie den analogen Ausgang des Sensors. Reagiert dieser auf Druckschwankungen so funktioniert der Sensor. Fehler im digitalen Ausgang können so auf den I²C Bus eingegrenzt werden.
- Schalten Sie die Versorgungsspannung aus und wieder ein. Damit starten Sie den Sensor neu.
- Prüfen Sie die Signalbestätigungen (ACK, NACK) und die STOP-Bedingung vom Master in der Applikationsschaltung. Bei fehlerhaftem Abbruch der Signalübertragung muss der Sensor durch Aus- und Einschalten der Versorgungsspannung neu gestartet werden.

5.3 Schaltungsempfehlung für I²C-Reset

Für den seltenen Fall, dass ein Sensor der HD-, HC- oder HM-Baureihe nicht mehr reagiert und der I²C-Datenbus nicht mehr ansprechbar ist, lässt sich der Sensor nur durch einen Hardware-Reset wieder starten. Ist es nicht möglich das Gesamtgerät abzuschalten, empfehlen wir die Schaltung in Bild 13, um einen Hardware-Reset des Sensors ohne Netztrennung durchführen zu können.

Für R1 bis R3 empfehlen wir 10 k Ω Widerstände. Folgende Transistoren (T1) wurden von First Sensor getestet und zur Verwendung freigegeben:

- IRLB8743PBF, MOSFET, N-Kanal, R_{ds(on)} = 2.5 m Ω , Bauform: TO-220AB
- IPD031N03L G, MOSFET, N-Kanal, R_{ds(on)} = 2.6 m Ω , Bauform: TO-252

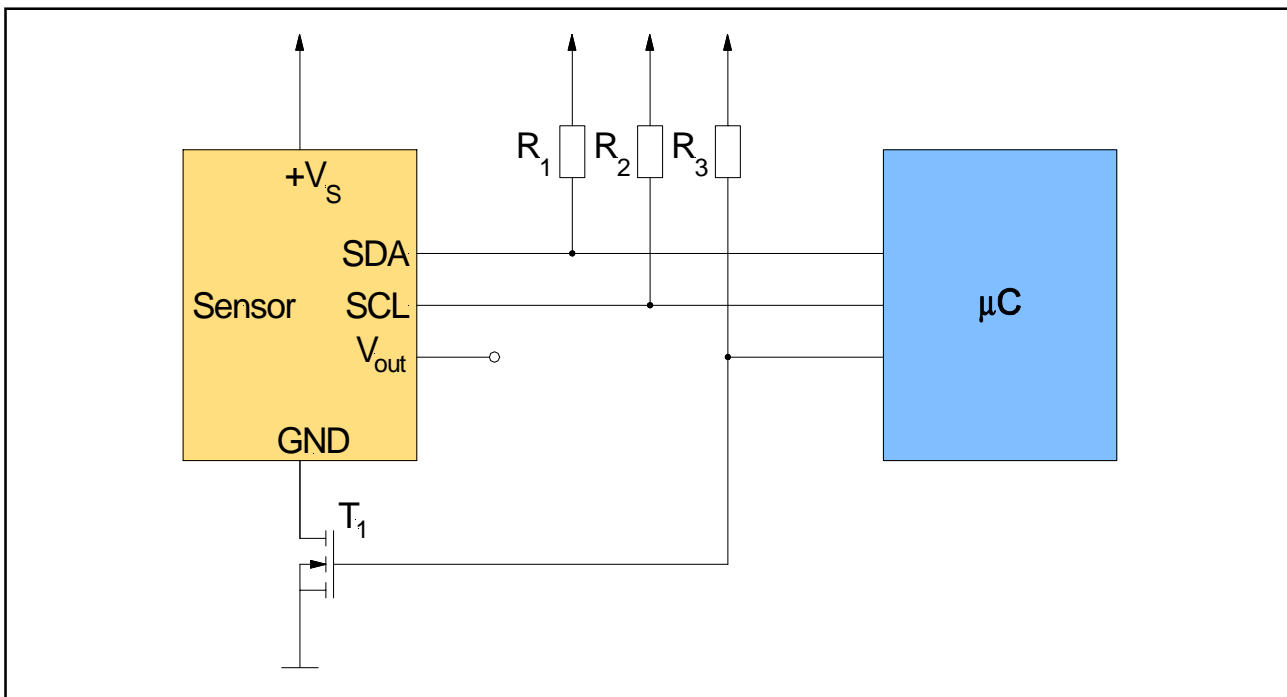


Bild 13: Schaltung für I²C-Reset

6 BEISPIEL EINER I²C-BUS-PROGRAMMIERUNG

```
byte byte_msb, byte_lsb; // 8bit values
int16 pressure; // 16bit value

// Set I2C unit to I2C master mode, clock speed 100 kHz and 7 bit addressing
configureI2C (I2C_MASTER | CLK_SPEED_100KHZ | ADDRESSING_7BIT);
// Set the target address of the sensor (0x78 = 120dec)
I2C_set_target(0x78);
// Send start condition for reading from sensor (slave)
I2C_send_start_read();
// Read first (MSB) data byte and answer with ACK (continue communication)
I2C_read (&byte_msb, SEND_ACK);
// Read second (LSB) data byte and answer with NACK (end communication)
I2C_read (&byte_lsb, SEND_NACK);
// Send Stop condition
I2C_send_stop();

// Put both values together
pressure = ((int16)byte_msb << 8) | byte_lsb;
```

***Für weitere Informationen stehen wir
Ihnen gerne zur Verfügung:***

***Tel. +49 (0)89 80083-0
FSM@first-sensor.com***