



Drahtloses Drucksensorsystem

Masterarbeit

Xin Gao
331315

05.12.2013

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. Klaus-Dieter Lang
Prof. Dr.-Ing. Ha Duong Ngo

Technische Universität Berlin
Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik
Berlin Center of Advanced Packaging
Mikrosensor & Aktuator Technologie

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbst-ständig und eigenhändig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Berlin, den

Unterschrift:

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich als erstes bei meinem Betreuer, Prof. Dr.-Ing. Ha Duong Ngo, für seine freundschaftliche Unterstützung bedanken. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Piotr Mackowiak für seine geduldige Hilfe bedanken. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Olaf Pohl und Herrn Volker Noack an Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, die für die Herstellung der Leiterplatte gesorgt haben, dass diese Arbeit für mich so lehrreich war.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	viii
1 Kurzfassung	1
Glossar	1
Symbolverzeichnis	1
2 Einleitung	3
3 Theoretische Grundlagen des piezoresistiven Si-Drucksensors	4
3.1 Arbeitsprinzip des Sensors	4
3.2 Herstellung des Sensors	9
3.3 Probleme der Ausgangssignale	11
4 Auswertung und Vergleich der Kompensation-Lösungen	13
4.1 Überblick der Kompensation-Lösungen	13
4.1.1 Passive Signalverarbeitungsschaltung	13
4.1.2 Aktive Signalverarbeitungsschaltung	14
4.1.3 ASIC-Lösung	15
4.2 Vergleich und Folgerung	17
5 Auswertung und Vergleich der Wireless-Lösungen	19
5.1 Überblick der Wireless-Lösungen	19
5.1.1 Bluetooth	19
5.1.2 UWB (Ultra-wideband)	20
5.1.3 Wi-Fi	22
5.1.4 NFC (Near Field Communication)	22
5.1.5 Zigbee	23
5.2 Vergleich und Folgerung	27
6 Block-level Realisierung	31
6.1 Charakterisierung des Drucksensors	31
6.1.1 Kleben und Drahtbonden des Drucksensors	31
6.1.2 Messplatz aufbauen	34
6.1.3 Messergebnisse	35
6.2 Funktionalität von MLX90308 verifizieren	37

6.2.1	Entwicklungsboard und Programmersoftware SW90308	37
6.2.2	Anpassung der Kompensationskoeffiziente zum Drucksensor	39
6.2.3	Kompensierte Messergebnisse	42
6.3	Funktionalität von XBee verifizieren	44
6.3.1	Basis-Funktion verifizieren	44
6.3.2	Drahtloses Neigungserkennung-System mittels XBee aufbauen .	47
6.4	Zusammenschluss aller Komponenten	49
7	Board-level Realisierung	51
7.1	Entwurf der Leiterplatte	51
7.1.1	Energieversorgung und Peripherieschaltungen bestimmen	51
7.1.2	Leiterplatten-Schematic entwerfen	53
7.1.3	Layoutentwurf der Leiterplatte	55
7.2	Herstellung der Leiterplatte	58
7.2.1	Herstellung des Prototyps	58
7.2.2	Herstellung der zweiten Version	71
7.3	Testen der Leiterplatte	74
7.3.1	Lesen, Verarbeitung und Darstellung der empfangenen Daten .	74
7.3.2	Messergebnisse und Auswertung	77
8	Diskussion und Ausblick	80
Literatur		82
A Anhang		i
B Anhang		iv
C Anhang		vii
D Anhang		ix
E Anhang		xi
F Anhang		xii

Abbildungsverzeichnis

3.1	Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines piezoresistiven Drucksensors [1]	4
3.2	Darstellung der Struktur der implantierten Piezowiderständen und offenen Wheatstone-Brücke [1]	9
3.3	Schematische Darstellung eines gebondeten piezoresistiver Drucksensor auf einem TO-8 Sockel [1]	10
4.1	Passive Schaltung zur Kompensation [3]	13
4.2	Aktive Schaltung mit Bipolar-Transistor zur Kompensation [2]	14
4.3	Aktive Schaltung mit Operationsverstärker zur Kompensation [2]	15
4.4	Blockdiagramm von MLX90308	16
4.5	Gehäuse vom ASIC MLX90308 [5]	18
4.6	Pinbelegung vom ASIC MLX90308 [5]	18
5.1	Frequenzband verschiedener drahtlosen Kommunikationstechnologien [8]	21
5.2	NFC zum Einsatz für elektrische Fahrscheine (aktiv-aktiv) und für elektronische Zahlung (aktiv-passiv) [11]	23
5.3	Anwendungsbereiche verschiedener WL-Protokolle [13]	24
5.4	Zigbee Promoter [14]	24
5.5	Von IEEE 802.15.4 und ZigBee-Protokollstapel definiertes Zigbee Schichtmodell [15]	25
5.6	XBee Chip [16]	29
5.7	Vergleich der Dimensionen der XBee und XBee-Pro Serie [16]	30
6.1	Graphische Darstellung des Prozesses vom Ball-Wedge-Bonden [18] . .	32
6.2	Manuelles Thermosonic-Bondgerät	32
6.3	Auf dem TO8-Sockel gebondeter Drucksensor	33
6.4	Instabile Temperaturausgabe bei Pt100 im Druckkammer	35
6.5	Kennlinien des 5 bar-Drucksensors für verschiedene Temperaturen . .	36
6.6	Entwicklungsboard EVB90308	37
6.7	Schaltbild vom Entwicklungsboard EVB90308 [19]	38
6.8	Edit Parameter Fenster	39
6.9	Kennlinien des Drucksensors unter verschiedenen Temperaturen nach Kompensation	43
6.10	Software X-CTU für Konfiguration der XBee-Parameter	44
6.11	Unterhaltung zwischen zwei XBee-Modulen	45
6.12	Parameter von XBee konfigurieren in Kommando-Modus	46
6.13	Darstellung der vom XBee Chip A empfangenen Signale in Frame-Form	47

6.14	3-Achsen Beschleunigungssensor ADXL345 [20]	48
6.15	Drahtlos-Neigungserkennung-System mittels XBee und Beschleunigungssensor	49
6.16	Zusammengepasste Module im Messplatz	50
7.1	Dimension des Spannungsreglers LM2937 im SOT-223 Gehäuse [21]	52
7.2	Schematic des drahtlosen Drucksensorsystems	54
7.3	Warnungen zu prüfen beim ERC der Schematic	54
7.4	Platine mit platzierten Komponenten	56
7.5	Beziehung zwischen Leitungsbreite, Temperatur, Kupferdicke und Strombelastbarkeit der Leitung	57
7.6	Komplettiertes Layout des drahtlosen Drucksensorsystems	58
7.7	Erzeugung der Dateien im CAM-Prozessor für die Herstellung der Leiterplatte	59
7.8	aktive Leitplattenbohrmaschine	60
7.9	gebohrte kupferkaschierte Rohplatine	61
7.10	Bädergruppe für die nasschemische und galvanische Bearbeitung der Leiterplatte	62
7.11	Rasterfotoplotter im Dunkelkammerlabor	64
7.12	Vorderseite des fotolithographischen Films	65
7.13	Galvanoresist der Vorderseite	65
7.14	Entfernen des Resistes mittels KOH-Lösung (Strippen)	67
7.15	Leiterplatte nach Ätzen der nicht verzinnten Kupferflächen	67
7.16	Platine nach Zinn-Entfernung	68
7.17	Testbereiter Prototyp der Leiterplatte	69
7.18	Layout der 2ten Version der Leiterplatte	71
7.19	Lithographisches Filme für die Galvanoresistmaske (links) und Lötstopmaske (rechts)	72
7.20	Laminierte Leiterplatte	73
7.21	fertige 2te Version der Leiterplatte	74
7.22	Darstellung der Messergebnisse nach Transformation in „Matlab“	76
7.23	Messergebnisse und graphischen Darstellung der Druckwerte	77
7.24	Ausgangskennlinie des drahtlosen Drucksensorsystems	78
D.1	Drucksensor	ix
D.2	TLV-1117	x
D.3	MLX90308	x

Tabellenverzeichnis

3.1	Piezowiderstandskoeffizienten für Silizium [2]	7
5.1	Vergleich der wichtigen Eigenschaften verschiedener WL-Technologien	27
5.2	wichtige Spezifikationen von XBee und XBee-Pro [16]	30
6.1	Bezeichnung der Messgeräte zur Charakterisierung des Drucksensors .	34
6.2	Ausgangsspannung des 5 bar-Drucksensors bei 5V Spannungsspeisung	35
6.3	Konfiguration der Kompensationskoeffiziente	41
6.4	Kompensierte Messergebnisse des 5 bar-Drucksensors bei 5V Spannungsspeisung	42
7.1	Ausgangsspannung des Drucksensors nach Verstärkung, Kompensation, A/D Umsetzung und Signalübertragung	77

Glossar

OPV	Operationsverstärker
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio
MCU	Microcontroller Unit
TKO	Temperaturkoeffizient der Offsetspannung
TKS	Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit
PTC	Positive Temperature Coefficient
PGA	Programmable Gain Amplifier
SMD	Surface Mounted Device
FTP	File Transfer Protocol
SMD	Surface Mounted Device
FTP	File Transfer Protocol
RF	Radio Frequency
UWB	Ultra-Wideband
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
WLAN	Wireless Local Area Network
OSI Model	Open Systems Interconnection Model
MAC	Media Access control
RFID	Radio Frequency Identification
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
APS	Application Support Sub-Layer
ZDO	ZigBee device objects
LDO	Low Dropout Regulator
GPIB	General Purpose Interface Bus
TO	Transistor Outline
SOT	Small Outline Transistor
ERC	Electrical Rule Check
DRC	Design Rules Checks
THT	Through Hole Technology
FIFO	First In-First Out
ICC	Leadless Chip Carrier

1 Kurzfassung

Der vorliegende piezoresistive Si-Drucksensor ist ein Produkt von Technischen Universität Berlin des Fachbereiches Technologien der Mikroperipherik, der aus einer Si-Membran und vier darin integrierten Piezowiderständen besteht. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Kompensationsmodul und einen drahtlosen Kommunikationsmodul hinzuzufügen und die drei Bauteile inkl. Energieversorgung und Peripherieschaltungen auf Boardlevel zu integrieren.

Die Ausgangssignale des Drucksensors sind im Millivoltbereich und immer mit einem Offsetfehler und Temperaturabhängigkeit der Sensitivität belastet. Zur Signalverstärkung und zur Kompensation gibt es verschiedene Lösungen vorhanden. Gleichfalls sind viele mögliche Lösungen für eine drahtlose Kommunikation auf Markt zur Verfügung. In dieser Arbeit waren die verschiedenen Lösungen zu vergleichen und auszuwerten. Besonderes Augenmerk lag auf den für diese Aufgabe ausgewählten Lösungen, nämlich ASIC MLX-90308 und Zigbee.

Nach den theoretischen Studien erfolgte die praktische Realisierung. Um diese drei Module zusammen zu führen, war vor allem sicherzustellen, dass jeder einzelne Modul stabil arbeiten kann. Zuerst wurde der Messplatz aufgebaut und der Drucksensor charakterisiert. An die Kennlinien des Drucksensors bei verschiedenen Temperaturen haben sich die Koeffizienten des Kompensationsmoduls angepasst. Zur Verifikation der Funktionen des Zigbee-Moduls wurde ein drahtloses Neigungserkennung-System aufgebaut. Nachdem die drei Module getrennt überprüft worden sind, wurden sie zusammen auf Block-level verbunden und im Temperatur-

und Druckschrank geprüft.

Aufgrund des erfolgreich funktionierenden Block-level Systems wurden die drei Module zusammen in die Leiterplatte integriert. Die Leiterplatte wurde mit dem CAD-Software „Eagle“ entworfen und im Labor in HTW hergestellt. Als die erste Version wurde eine Prototyp-Leiterplatte mit vielen Pins zum Testen hergestellt. Nachdem die Testergebnisse des Prototypen in Ordnung waren, wurde eine zweite, vereinfachte Version der Leiterplatte hergestellt und überprüft. Das Signal-Empfangssystem auf der PC-Seite wurde in Matlab-Umgebung aufgebaut.

2 Einleitung

Zusammen mit der rasanten Entwicklung der Halbleiterindustrie werden piezoresistive Silizium-Drucksensoren heutzutage in großer Stückzahl preiswert hergestellt. Entsprechend werden sie auf immer mehr Gebieten eingesetzt, z.B. Medizintechnik, Automobiltechnik, Regelungstechnik und Konsumgüter. Gängige piezoresistive Silizium-Drucksensoren enthalten Kabel für Signaleübertragung, was die Größe und Kosten des Systems erhöhen. Langes Kabel verschlechtern daneben die Qualität der Signale. Die Entwicklung eines drahtlosen Drucksensor-Systems ist eine gute Lösung für diese Probleme. Ein Drahtlos-Drucksensor kann auch in den speziellen Bereichen verwendet werden, an denen eine Verkabelung schwierig zu realisieren ist, z.B. in rotierten Reifen, unter extremer Temperatur und pH.

Ziel dieser Arbeit ist, passende Kompensationslösung und Drahtlos-Nahbereichkommunikationslösung für den vorhandenen Silizium-Drucksensor zu finden und das alles auf Boardlevel zu integrieren.

Kapitel 3-5 sind die theoretischen Studien. Zuerst werden die Grundlagen des Drucksensors kurz vorgestellt. Im Kapitel 4 und Kapitel 5 wurden jeweils unterschiedliche Komunikationslösungen und Wireless-Lösungen untersucht und verglichen. Nach Bestimmung des Konzepts wird in Kapitel 6 und Kapitel 7 genau erklärt, wie der Drahtlos-Drucksensor-System Schritt für Schritt realisiert und getestet wurde.

3 Theoretische Grundlagen des piezoresistiven Si-Drucksensors

3.1 Arbeitsprinzip des Sensors

Piezoresistive Silizium-Drucksensoren beruhen auf dem piezoresistiven Effekt von Silizium. Sie besitzen als drucksensitives Element eine allseitig eingespannte Silizium-Membran. In der Membran sind vier Piezowiderstände angeordnet und zu einer Wheatstone-Brücke verschaltet.

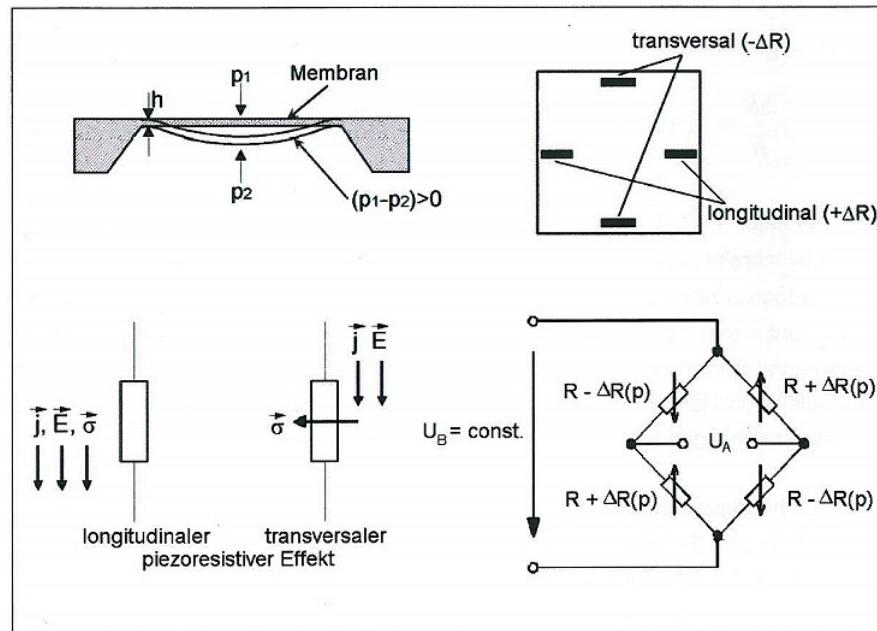


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines piezoresistiven Drucksensors [1]

3 Theoretische Grundlagen des piezoresistiven Si-Drucksensors

Je nach Anordnung der vier Widerstände auf der Membran relativ zur Richtung von elektrischer Stromdichte unterscheidet man zwischen dem transversalen und dem longitudinalen piezoresistiven Effekt. Wirkt ein Druckdifferenz auf die Membran, wird die Membran verformt und damit ändern sich die Widerstandswerte paarweise gegensinnig.

Wie in Abbildung 3.1 gezeigt, mit einer Spannungsquelle (U_B =konstant) ist die Ausgangsspannung:

$$\begin{aligned} U_A &= U_B \left[\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R - \Delta R} - \frac{R - \Delta R}{R - \Delta R + R + \Delta R} \right] \\ &= U_B \left[\frac{R + \Delta R}{2R} - \frac{R - \Delta R}{2R} \right] = U_B \cdot \frac{\Delta R}{R} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Unter der Einwirkung einer mechanischen Spannung ändert sich der spezifische Widerstand von kristallinem Silizium. Dadurch entsteht eine Änderung des Widerstandswertes der Piezowiderstände. Der Zusammenhang zwischen der Widerstandsänderung ΔR und der Deformation ε wird vom K-Faktor (Gauge-Faktor) beschrieben [2]. Für Widerstand R eines Quaders gilt allgemein:

$$R = \frac{l}{A} \cdot \rho = \frac{l}{a \cdot b} \cdot \rho \quad (3.2)$$

$A = a \cdot b$: Querschnittsfläche des Quaders

l : Länge des Quaders

ρ : spezifischer Widerstand

Durch Logarithmieren erhält man:

$$\ln R = \ln l - \ln a - \ln b + \ln \rho \quad (3.3)$$

Als partielle Ableitung von der Gleichung 3.3 ergibt sich:

$$dR/R = dl/l - da/a - db/b + d\rho/\rho \quad (3.4)$$

3 Theoretische Grundlagen des piezoresistiven Si-Drucksensors

Für kleine Maßänderung Δl , Δa und Δb und die Änderung des spezifischen widerstands $\Delta\rho$ gilt:

$$\Delta R/R = \Delta l/l - \Delta a/a - \Delta b/b + \Delta\rho/\rho \quad (3.5)$$

Mit der Poiszenzahl $\varepsilon = \Delta l/l$ und Dehnung $\gamma = -\frac{\Delta a/a}{\Delta l/l} = -\frac{\Delta b/b}{\Delta l/l}$ ergibt sich

$$\Delta R/R = \varepsilon(1 + 2\gamma) + \Delta\rho/\rho = (1 + 2\gamma + \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho}) \cdot \varepsilon = K \cdot \varepsilon \quad (3.6)$$

Diese Beziehung beschreibt allgemein das Verhalten von Metallen und Halbleitern bei einer äußeren Kraft. Der Anteil $\varepsilon(1 + 2\gamma)$ beschreibt den Geometrieffekt und $\Delta\rho/\rho$ den Piezowiderstandseffekt.

Bei Metallen ist für die Widerstandsänderung der Geometrieffekt maßgeblich, während bei Halbleiter der Piezowiderstandseffekt überwiegt. Nach Vernachlässigung des Geometrieffekts ist die Ausgangsspannung U_B proportional zur Änderung der spezifischen Widerständen $\Delta\rho/\rho$.

Silizium zeigt aufgrund seiner kubischen Gitterstruktur im spannungsfreien Zustand isotropes elektrisches Verhalten:

$$\begin{aligned} E_1 &= \rho_0 \cdot j_1 \\ E_2 &= \rho_0 \cdot j_2 \\ E_3 &= \rho_0 \cdot j_3 \end{aligned} \quad (3.7)$$

E_1, E_2, E_3 : elektrische Feeldstärke in orthogonalen Richtungen

j_1, j_2, j_3 : Stromdichte in orthogonalen Richtungen

In diesem Fall ist der spezifische Widerstand ρ_0 eine skalare Konstante.

Das Einwirken äußerer Kräfte führt zu einer anisotropen Änderung des spezifischen Widerstands:

$$\vec{E} = \vec{j}(\underline{\rho} + \underline{\Delta\rho}) = \vec{j}\rho_0(1 + \underline{\pi}\underline{\sigma}) \quad (3.8)$$

3 Theoretische Grundlagen des piezoresistiven Si-Drucksensors

Im Koordinatensystem der Kristallachsen gilt:

$$\begin{aligned} E_1/\rho_0 &= j_1[1 + \pi_{11}\sigma_1 + \pi_{12}(\sigma_2 + \sigma_3)] + \pi_{44}(j_2\sigma_6 + j_3\sigma_5) \\ E_2/\rho_0 &= j_2[1 + \pi_{11}\sigma_2 + \pi_{12}(\sigma_1 + \sigma_3)] + \pi_{44}(j_1\sigma_6 + j_3\sigma_4) \\ E_3/\rho_0 &= j_3[1 + \pi_{11}\sigma_3 + \pi_{12}(\sigma_1 + \sigma_2)] + \pi_{44}(j_1\sigma_5 + j_2\sigma_4) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Dabei sind $\pi_{11}, \pi_{12}, \pi_{44}$ die elementaren Piezokoeffizienten, die jeweils für Längskopplung, Querkopplung und Scherkopplung stehen. Sie sind im kubischen Kristallsystem von Silizium unabhängig voneinander. Sowohl Dotierung als auch Temperatur beeinflussen ihre Werte. Bei einer Temperatur von 300K und Ladungsträgerkonzentrationen von $N_A, N_D < 10^{16} cm^{-3}$ erhält man folgende Werte für $\pi_{11}, \pi_{12}, \pi_{44}$:

Tabelle 3.1: Piezowiderstandskoeffizienten für Silizium [2]

	$\rho [\Omega cm]$	$\pi_{11}[10^{-11} Pa^{-1}]$	$\pi_{12}[10^{-11} Pa^{-1}]$	$\pi_{44}[10^{-11} Pa^{-1}]$
n-Silizium	11	-102,2	53,4	-13,6
p-Silizium	8	6,6	-1,1	138,1

Beim Longitudinaleffekt haben E, j und σ die gleiche Richtung. Gemäß Gleichung 3.9 gilt:

$$E_1/\rho_0 = j_1(1 + \pi_{11}\sigma_1) = j_1(1 + \pi_l\sigma_l) \quad (3.10)$$

Daraus ergibt sich:

$$\Delta R/R \approx (\Delta\rho/\rho_0)_l = \pi_l\sigma_l \quad (3.11)$$

Dabei ist π_l der longitudinale Piezowiderstandskoeffizient, für den in Richtung der Kristallachsen $\pi_l = \pi_{11}$ gilt.

Für beliebige Richtung ist π_l :

$$\pi_l = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2) \quad (3.12)$$

l_1, m_1, n_1 : Kosinus der Winkel der Stromdichte j , Feldstärke E und Spannung σ_l gegen die Kristallachsen

3 Theoretische Grundlagen des piezoresistiven Si-Drucksensors

Sind E , j und σ in [110] Richtung, sodass

$$l_1 = m_1 = \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2}, n_1 = 0 \quad (3.13)$$

Gemäß Gleichung 3.12, Gleichung 3.13 und Tabelle 3.1 ergibt sich für p-Silizium:

$$\pi_t = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44}) \cdot \frac{1}{4} = 71,8[10^{-11} Pa^{-1}] \quad (3.14)$$

Mit $E_{[110]} = 1,69 \cdot 10^7 N/cm^2$ erhält man für p-Silizium:

$$K_t \approx 121,3 \quad (3.15)$$

Beim Transversaleffekt wirken Stromdichte und Feldstärke senkrecht zur mechanischen Spannung. Damit folgt:

$$E_1/\rho_0 = j_1(1 + \pi_{12}\sigma_2) = j_1(1 + \pi_t\sigma_t) \quad (3.16)$$

beziehungsweise

$$\Delta R/R \approx (\Delta\rho/\rho_0)_t = \pi_t\sigma_t \quad (3.17)$$

Für beliebige Richtungen ist π_t

$$\pi_t = \pi'_{12} = \pi_{12} + 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2) \quad (3.18)$$

l_1, m_1, n_1 : Kosinus der Winkel der Stromdichte j , Feldstärke E und Spannung σ_t gegen die Kristallachsen

Sind E , j in [110] Richtung, σ in [1̄10] Richtung, sodass

$$\begin{aligned} l_1 &= m_1 = \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2}, n_1 = 0 \\ l_2 &= m_2 = \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2}, n_2 = 0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Gemäß Gleichung 3.18, Gleichung 3.19 und Tabelle 3.1 ergibt sich für p-Silizium:

$$\pi_t = \pi_{12} + \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}) = -66,3[10^{-11} Pa^{-1}] \quad (3.20)$$

Mit $E_{[110]} = 1,69 \cdot 10^7 N/cm^2$ erhält man für p-Silizium:

$$K_t \approx -112,1 \quad (3.21)$$

Mit den ungefähr gleichwertigen aber negierten K_l und K_t erhält man umgekehrte Änderungen der longitudinalen und transversalen Widerständen bei den gleichen Deformationen ε in Piezowiderständen. Damit kann man auch umgekehrte Spannungen aus den zwei Ausgängen der Wheatstone-Brücke bekommen.

3.2 Herstellung des Sensors

Die Struktur des piezoresistiven Drucksensors wird durch KOH-Ätzen einer Grube aus einkristallinem Silizium und durch Lonenimplantation (p-Dotierung mit Bor in einem n-Siliziumsubstrat(n-dotiert mit Phosphor)) hergestellt.

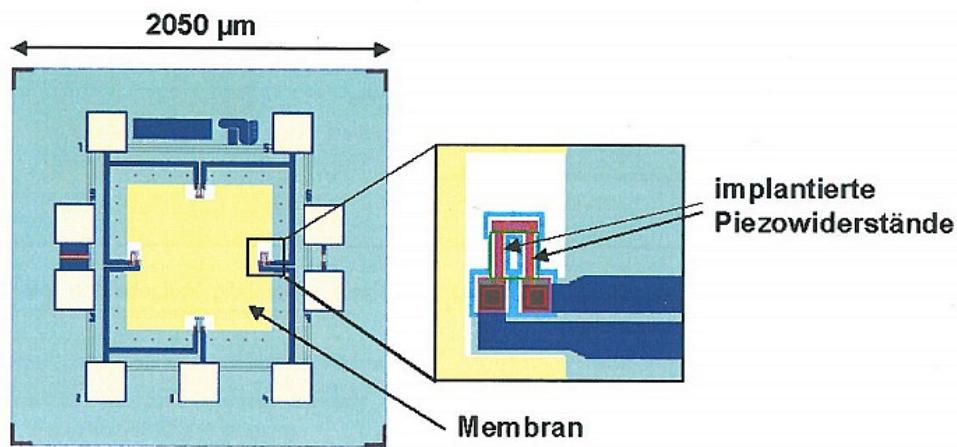


Abbildung 3.2: Darstellung der Struktur der implantierten Piezowiderständen und offenen Wheatstone-Brücke [1]

Eine offene Struktur der Wheatstone-Brücke ist günstig für die Prüfung der

3 Theoretische Grundlagen des piezoresistiven Si-Drucksensors

Widerstandswerte der Piezowiderstände. Die Offene Brücke wird beim Drahtboden geschlossen.

Wie in Abbildung 3.2 gezeichnet, markiert das gelbe Quadrat den Bereich der Membran. Die silbernen kleinen Quadrate stellen die Aluminiumbondpads dar. Die Leiterbahnen zur Verdrahtung der Brücken sind dunkelblau dargestellt.

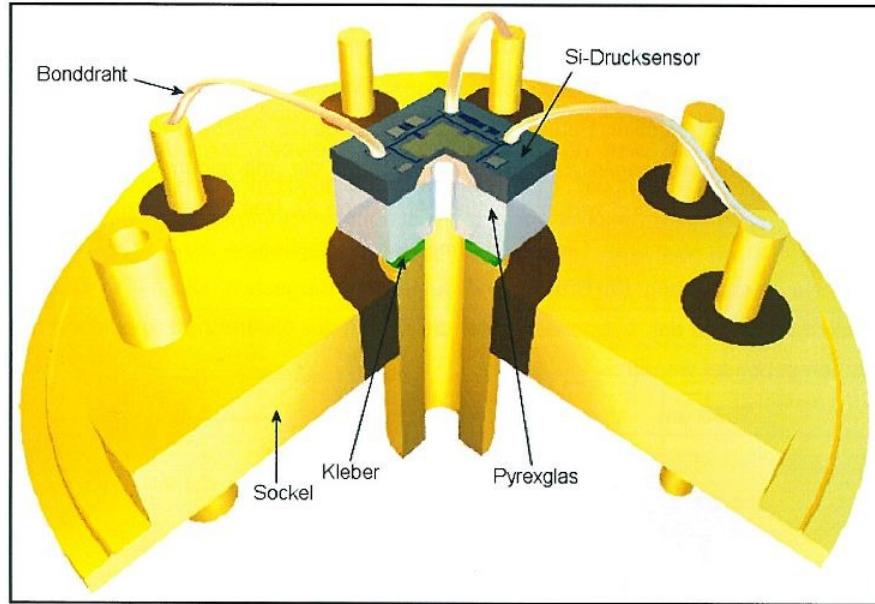


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung eines gebondeten piezoresistiven Drucksensor auf einem TO-8 Sockel [1]

Der piezoresistive Si-Drucksensor wird mit mikroelektronischen und -mechanischen Fertigungsverfahren im Reinraum produziert. Die Herstellung umfasst insgesamt 57 Technologieschritte inklusive Oxidation, Kontaktimplantation, Piezoimplantation, Piezo-Passivierung, RIE-Ätzen, Sputtern, PECVD, KOH-Ätzen usw. Bevor die Drucksensoren aus dem Siliziumwafer vereinzelt werden, wird ein mit Löchern versehener Pyrexglas-Wafer durch anodisches Bonden aufgebracht. Die Löcher in dem Pyrex-Wafer ermöglichen den Sensor als Referenzdrucksensor einzusetzen. Anschließend werden die Drucksensoren durch Trennschleifen vereinzelt. Nach dem Kleben auf TO-8 Sockel und Drahtboden wird die elektrische Verbindung wie in Abbildung 3.3 gezeigt zwischen dem Sensor und den äußeren Leiterpins des TO8 Sockels hergestellt.

3.3 Probleme der Ausgangssignale

Das Ausgangssignal, das direkt vom piezoresistiven Drucksensor beim normalen Spannung- oder Stromspeisung ist sehr klein (im Millivoltbereich). Zur Anwendung muss es vorher in Voltbereich verstärkt werden.

Bei der Messung der Ausgangssignale des unbelasteten Drucksensors misst man immer eine Spannung ungleich 0V. Die wird als Offsetspannung bezeichnet. Sie wird hauptsächlich durch Fertigungstoleranzen verursacht. Bei Niederdrucksensoren kann der Offset auch durch mechanische Spannungen in den Schichten des Chipaufbaus entstehen, da bei der dünneren Membran diese Effekte stärker zur Geltung kommen.

Die Empfindlichkeit des Sensors durch 3.22 beschrieben.

$$S = \frac{1}{U_b} \cdot \frac{U_N - U_0}{p_N - p_0} [mV/V \cdot Pa] \quad (3.22)$$

U_b : Speisungsspannung

$p_N - p_0$: Messbereich

$U_N = U_{p_N}$: Ausgangsspannung bei Nenndruck

$U_0 = U_{p_0}$: Nullpunktsspannung. Weil Temperaturänderungen zusätzliche mechanische Spannungen in Membran erzeugen, ist die Offsetspannung temperaturabhängig und durch Temperaturkoeffizient der Offsetspannung TKO bezeichnet.

$$TKO = \frac{1}{U_s(T_0)} \cdot \frac{U_0(T) - U_0(T_0)}{T - T_0} \cdot 100\% \quad (3.23)$$

$U_0(T)$: Nullpunktsspannung bei Temperatur T

$U_0(T_0)$: Nullpunktsspannung bei Temperatur T_0

$U_s(T_0) = U_N(T_0) - U_0(T_0)$: Spannensignal bei Temperatur T_0

$T - T_0$: Temperaturbereich

Des weiteren sinkt bei konstantem Druck die Ausgangsspannung des Sensors mit steigender Temperatur. Denn der K-Faktor von Silizium nimmt mit zunehmender Dotierung und steigender Temperatur ab. Das Verhalten ist unabhängig vom

Dotierungstyp und der Belastungsart. Aber mit steigender Dotierung sinkt die Temperaturabhängigkeit der Widerstände. Man spricht hierbei von einem negativen Temperaturkoeffizient (TK).

Die Größe der Temperaturabhängigkeit von Ausgangssignalen wird durch Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit (TKS) bezeichnet.

$$TKS = \frac{1}{U_s(T)} \cdot \frac{U_s(T) - U_s(T_0)}{T - T_0} \cdot 100\% \quad (3.24)$$

$U_s(T) = U_N(T) - U_0(T_0)$: Spannensignal bei Temperatur T_0

$U_s(T_0) = U_N(T_0) - U_0(T_0)$: Spannensignal bei Temperatur T_0

$T - T_0$: Temperaturbereich

TKO und TKS werden jeweils als prozentuale Änderung bezogen auf das Spannensignal angegeben und die Einheit für die beiden Größen ist K^{-1} .

Für die Verarbeitung der Ausgangssignale der Sensoren müssen folgende Aufgaben erfüllt werden:

- Verstärkung der Ausgangssignals
- Abgleich der Offsetspannung
- Kompensation des TKO
- Kompensation des TKS

4 Auswertung und Vergleich der Kompensation-Lösungen

4.1 Überblick der Kompensation-Lösungen

4.1.1 Passive Signalverarbeitungsschaltung

Bei passiven Schaltungen wird ein PTC-Widerstand (Positive Temperature Coefficient) als Temperatursensor verwendet, der in der Nähe des Drucksensors platziert wird. Abbildung 4.1 zeigt eine solche Schaltung.

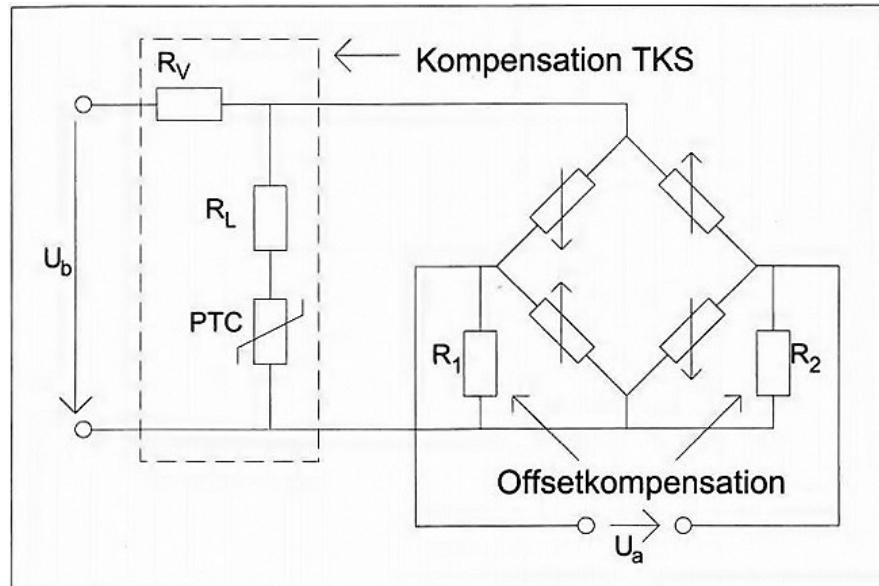


Abbildung 4.1: Passive Schaltung zur Kompensation [3]

Die Werte des PTC-Widerstands nehmen bei steigender Temperatur zu, wodurch die

Spannung über den PTC-Widerstand ebenfalls ansteigt. Weil der Drucksensor und der PTC-Widerstand parallel zueinander liegen, steigt dabei auch die Versorgungsspannung des Drucksensors. Die sinkende Empfindlichkeit des Drucksensors wird dadurch kompensiert. R_1 und R_2 dienen zur Kompensation der Nullpunktoffsetspannung. Durch Einstellung der Widerstände R_1 und R_2 können die Differenzausgänge der Wheatstone-Brücke beim Nullpunkt ausgleichend geregelt werden.

4.1.2 Aktive Signalverarbeitungsschaltung

Im Vergleich zu den passiven Schaltungen können aktive Schaltungen neben der Temperaturkompensation die Signale auch verstärken. Damit ist eine Anhebung des Signalpegels möglich und die Störsicherheit ist größer. In Abbildung 4.2 ist eine einfache aktive Kompensationschaltung mittels eines Bipolar-Transistors dargestellt.

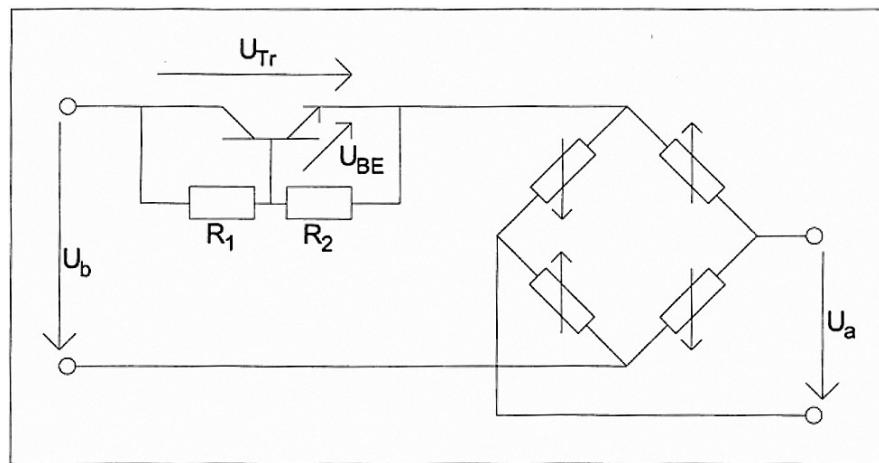


Abbildung 4.2: Aktive Schaltung mit Bipolar-Transistor zur Kompensation [2]

Das Kompensationsprinzip dieser Schaltung basiert auf der Ausnutzung der Temperaturabhängigkeit der Basis-Emitter-Spannung eines Bipolar-Transistors. Bei steigender Temperatur sinkt U_{BE} und damit sinkt die Spannung auf dem Transistor U_{Tr} . Durch den Spannungsabfall über den Bipolar-Transistor steigt die

Einspeisungsspannung der Brücke an. Dabei gelten folgende Gleichungen:

$$U_{Tr}(T) = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot U_{BE}(T) \quad (4.1)$$

$$\frac{1}{U_{BE}} \cdot \frac{dU_{BE}}{dT} \approx -2,5 \cdot 10^{-3} [K^{-1}] \quad (4.2)$$

Hier kann man die Werte der Widerstände R_1 und R_2 einstellen, um die Schaltung an verschiedene Brückenwiderstände anzupassen.

Statt mittels einem Transistors zeigt Abbildung 4.3 eine aktive Schaltung mittels Operationsverstärker.

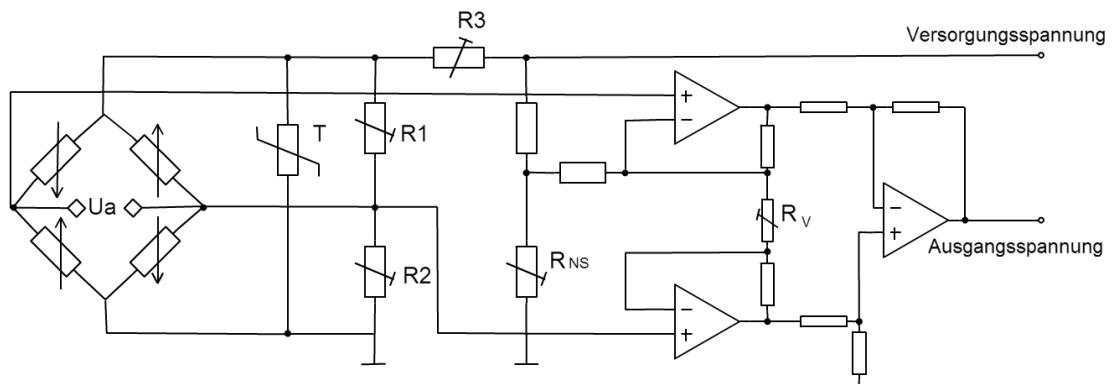


Abbildung 4.3: Aktive Schaltung mit Operationsverstärker zur Kompensation [2]

Dabei wird der TKS mittels eines Temperatursensors und eines Variable-Widerstands R_3 kompensiert. R_1 und R_2 dienen zur Kompensation des TKO. Mit dem geeignet eingestellten R_{NS} wird die Offsetspannung abgleichen. Am Ende ist eine typische Differenzverstärkerschaltung mit OPV angeschlossen. Damit können die Gleichtaktstörungen unterdrückt werden. Durch die Einstellung vom Widerstand R_V kann man den Verstärkungsfaktor ändern.

4.1.3 ASIC-Lösung

Statt mit diskreten Komponenten, mittels ASIC (Application Specific Integrated Circuit)-Lösung wird die Verarbeitungsschaltung zusammen mit einem Temperatursensor und einem vereinfachten Mikrokontroller monolithisch integriert.

Alle Kompensation-Parameter werden in einem EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) gespeichert und sind durch PC programmierbar. Der Einstellbereich ist sehr breit.

Anders wie Universal-Mikrokontroller werden ASIC normalerweise für speziellen Einsatzzweck entworfen. Wegen der Anpassung auf eine bestimmte Aufgabe werden der Platzbedarf und der Energieverbrauch vom ASIC optimiert und damit arbeitet ASIC effizienter.

In Abbildung 4.4 ist das Blockdiagramm von einem typischen Kompensation-ASIC MLX90308 dargestellt [4].

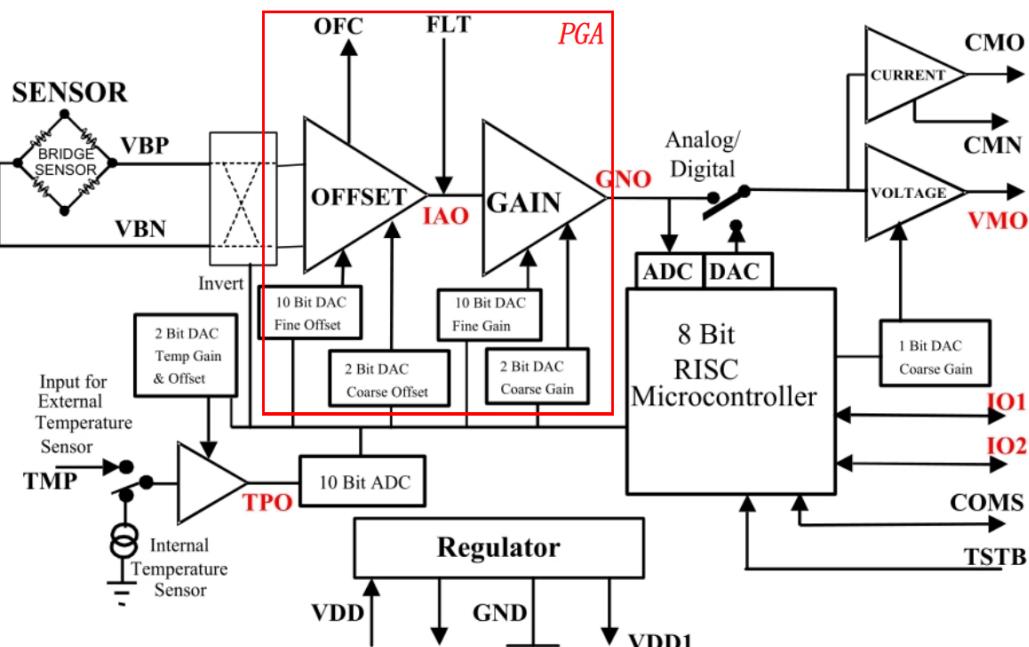


Abbildung 4.4: Blockdiagramm von MLX90308

Mit dem Programmierten Inverter kann man bestimmen, ob die Differenzsignale „VBP“ und „VBN“ aus dem Sensor invertiert werden. Anschließend folgt ein rauscharmer Hardware-Amplifier, der die Signale mit festem Vergrößerungsfaktor verstärken kann. Danach kann der PGA (programmable gain amplifier) die Analogsignale je nach der gemessenen Temperatur und eingegebenen Koeffizienten kompensieren und weiter verstärken. Mittels Programmierung kann man Analog- oder Digital-Modus entscheiden. Im Analog-Modus sind die verarbeitenden Analogsignale

nach der endgültigen Verstärkung direkt herauszuführen. Im Digital-Modus werden die verarbeitenden Analogsignale nach A/D Umsetzung in Mikrokontroller für andere Funktionen weiter bearbeitet und dann digital oder nach D/A Umsetzung analog herausgeführt.

4.2 Vergleich und Folgerung

Bei der Auswahl der endgültigen Kompensation-Lösungen müssen viele Faktoren berücksichtigt werden, z.B. Realisierbarkeit, Steuerbarkeit, Reproduzierbarkeit, Kosten, Platzbedarf, Verlustleistung und Störsicherheit.

Die Vorteile der passiven und aktiven Kompensationsschaltungen sind die geringe Verlustleistung und Kosten. Aber es gibt dabei schwerwiegende Schwächen. Passive Schaltungen können die Ausgangssignale vom Sensor nicht verstärken. Das wirkt sich negativ für die nachfolgende AD-Umsetzung und drahtlose Signalübertragung wegen der schlechten Erkennbarkeit und Störsicherheit der mV-Signale. Andererseits, obwohl die Strukturen und Prinzipien der Lösung mit aktiven Schaltungen einfach sind, bedeutet einfache Struktur nicht einfache Verwirklichbarkeit. Falls man diskrete Komponenten verwendet, die auf Breadboard oder Platine angeschlossen sind, muss man etwas Platzbedarf einplanen. Darüber hinaus gibt es bei der manuellen Verdrahtung und Einstellung der Potentiometern schlechte Wiederholgenauigkeit. Falls man bestimmten Sensor zusammen mit der wie in Abbildung 4.3 gezeigten akiven Kompensationsschaltung auf Chiplevel integrieren will, kostet es von Entwurf bis zur Fertigung eine hohe Arbeitsbelastung.

Um die alle vier in Kapitel 3.3 erwähnte Aufgaben praktisch und günstig zu erfüllen, empfiehlt sich die ASIC-Lösung statt der passiven und aktiven Kompensationsschaltungen. Der breite Kompensation- und Verstärkungsbereich des ASIC gewährleistet die Anpassbarkeit mit dem Sensor und dem nachfolgenden RF-Modul. Mit den programmierbaren Koeffizienten in EEPROM ist die

Wiederholgenauigkeit einfacher zu sichern als mit Potentiometern. Daneben kann ein ASIC in SMD (Surface-mounted device)-Gehäuse mehr Boardplatzsparen.



Abbildung 4.5: Gehäuse vom ASIC MLX90308 [5]

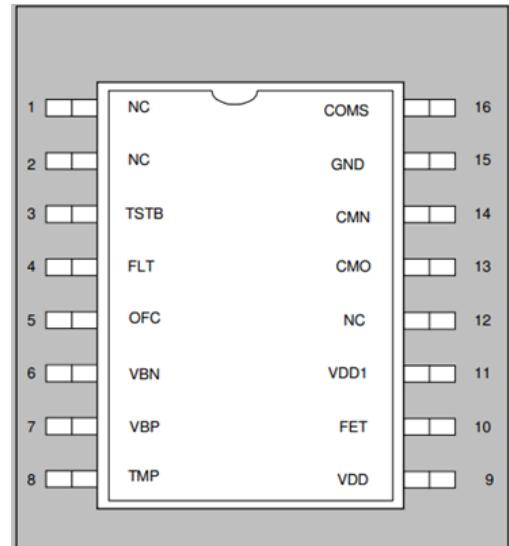


Abbildung 4.6: Pinbelegung vom ASIC MLX90308 [5]

In dieser Arbeit wird der ASIC MLX90308 aufgrund seiner zuvor erwähnten Vorteile eingesetzt. Der MLX90308 ist ein Produkt von Melexis, der speziell für die Signalverarbeitung der Sensoren mit Differenzausgängen entwickelt wurde. Außer der Grundverstärkung- und Offsetabgleich-Funktionen unterstützt MLX90308 bis vier Temperaturbereiche. Hier können verschiedene Koeffiziente für die Kompensation der TKO und TKS definiert werden. Der interne Temperatursensor entscheidet, in welchem Temperaturbereich die Signale zu kompensieren. Der Kompensationsalgorithmus ist im Kapitel 6.2.2 dargestellt. Die MCU (microcontroller unit)-Taktfrequenz wird von einem auf Chip integrierten Oszillatoren und einer PLL (Phase Locked Loop) erzeugt. Dazu braucht es keine externen Komponenten mehr. Durch die 60dB CMRR (Common mode rejection mode) können die Gleichtaktstörungen gut unterdrückt werden. Der MLX30308 wird in einem SO16W gehäuse geliefert. Das Gehäuse und die Pinbelegung zeigt Abbildung 4.5 und 4.6.

5 Auswertung und Vergleich der Wireless-Lösungen

5.1 Überblick der Wireless-Lösungen

5.1.1 Bluetooth

Bluetooth ist ein in den 1990er-Jahren durch die Bluetooth SIG (Special Interest Group von Ericsson, IBM, Intel, Nokia, Toshiba) entwickelter Industriestandard. Gemäß IEEE 802.15.1 ist es für die Datenübertragung zwischen Geräten über kurze Distanz. Bluetooth bildet die Schnittstelle, über die sowohl mobile Kleingeräte wie Mobiltelefone und PDAs als auch Computer und Peripheriegeräte miteinander kommunizieren können [6].

Geräte nach dem Bluetooth-Protokoll arbeiten in einem lizenzenfreien ISM-Band (Industrial, Scientific and Medical Band) zwischen 2,402 GHz und 2,480 GHz bei einer 79 MHz-Kanalbreite. Sie dürfen weltweit zulassungsfrei betrieben werden. Störungen können aber zum Beispiel durch WLANs, Handy oder Mikrowellenherde verursacht werden, die in demselben Frequenzband arbeiten. Zur Verbesserung der Interferenz wird ein Frequenzsprungverfahren (Frequency Hopping) eingesetzt, bei dem das Frequenzband in 79 verschiedene Frequenzstufen in 1-MHz-Abstand eingeteilt wird, die bis zu 1600 Frequenzwechsel pro Sekunde. Die Datenübertragungsgeschwindigkeit kann durch Enhanced Data Rate (EDR) maximal

2,1 Mbit/s erreichen. Ein Bluetooth-Netzwerk kann bis zu 255 Teilnehmer umfassen, von denen 8 Geräte gleichzeitig aktiv sein können (3-bit-adressiert) und 247 (8-bit-adressiert) währenddessen im Ruhezustand geparkt werden. Alle nicht aktiven Geräte können im Parkmodus die Synchronisation halten und auf Anfrage im Netz aktiviert werden.

Hauptsächliche Einsatzbereiche:

- Anwendungen am Computer: z.B Headset, HID (Human Interface Device) Geräte
- Kommunikation: Bluetooth-Hotspots als Funkzelle ermöglichen einen schnurlosen Zugriff auf ein Netzwerk, wie das Internet oder ein Unternehmens-LAN
- Spielgeräte: zur Kommunikation mit der Konsole
- Industrie: Bluetooth werden in Industrie-Bereichen eingesetzt, um kabellos zwischen verschiedenen Komponenten in Maschinen kommunizieren zu können
- Haustechnik: z.B. Alarmsysteme und Schlüssel

5.1.2 UWB (Ultra-wideband)

UWB-Technologie stammt aus der Forschung auf „Impulsantwort der Mikrowelle“ in den 1960er Jahren. UWB wurde in ihren Frühjahren hauptsächlich für Radarsysteme verwendet. Ab Februar 2002 wurde sie erst von FCC (Federal Communications Commission) für zivile Anwendungen zugelassen. Die Bundesnetzagentur in Deutschland erteilt am Anfang 2008 die Allgemeinzulassung für die Nutzung von UWB-Geräten im Frequenzbereich von 30 MHz bis 10,6 GHz [7].

Das UWB - Verfahren basiert auf der drahtlosen Übertragung impulsförmiger Signale über Funkkanäle sehr hoher Bandbreite. Dieser große Frequenzbereich ermöglicht eine hohe Übertragungsrate, die sich auf 480 MBit/s erhöhen kann [8]. Damit steht ausreichend Kapazität für Multimedia-Anwendungen zur Verfügung.

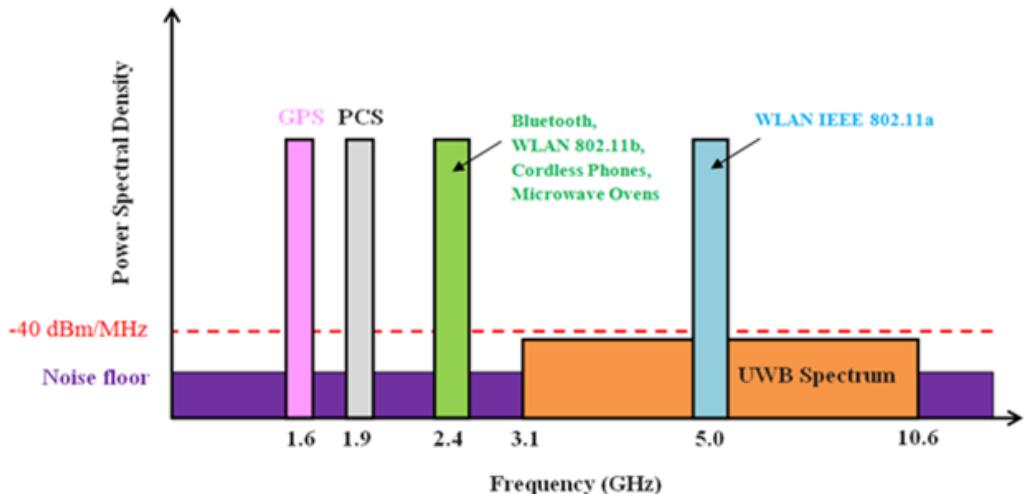


Abbildung 5.1: Frequenzband verschiedener drahtloser Kommunikationstechnologien [8]

Anders wie normale Wireless-Lösungen, bei UWB werden keine Sinusschwingungen erzeugt, sondern Impulse mit möglichst kurzer Dauer. Die UWB-Signal kann man als gestreckte Signale sehen, auf die schmalbandige Störungen keinen Einfluss haben, weil sie nur auf einem kleinen Teil des breiten Signals einwirken. Die Reichweite von UWB ist bis 50m (je nach Anwendungsfall). Zu einer IEEE-Spezifikation ist es jedoch nie gekommen. Die Arbeitsgruppe 802.15.3a wurde wegen Uneinigkeit leider aufgelöst.

Hauptsächliche Einsatzbereiche:

- Übertragung der Audio- und Video-Daten zwischen Geräten der Unterhaltungselektronik, wie zwischen DVD-Player, Fernseher und Lautsprecher.
- Kabellose Verbindung zwischen Computer, Bildschirm, Scanner und Drucker.
- Bodenradar, dient zur Messung der Störungen in den oberen Schicht des Erdbodens.

5.1.3 Wi-Fi

Wi-Fi ist heutzutage überall um uns herum. Als Definition von Wi-Fi Alliance bedeutet Wi-Fi alle WLAN-Produkte, die auf dem Standard IEEE 802.11 basieren. Die erste Version vom Standard IEEE 802.11 wurde im Jahr 1997 veröffentlicht [9]. Der Standard definiert eine MAC (Media Access Control)-Schicht und eine PHY (Physical)-Schicht nach OSI-Modell für lokale Funknetzwerke.

Wi-Fi kann entweder in einem lizenzenfreien 2,4GHz ISM-Band (Industrial, Scientific and Medical Band) oder in 5GHz Band arbeiten. Die Datenübertragungsrate von Wi-Fi kann 54Mbit/s erreichen. Wi-Fi-Netzwerke haben begrenzte Reichweite. Eine typische Wireless Access Point bei IEEE 802.11b oder 802.11g kann eine Reichweite von 35m im Gebäude und 100m im Freien erreichen. Bei dem Standard IEEE 802.11n konnte die Reichweite verdoppelt und die Übertragungsrate von 450 Mbit/s erreicht werden.

Vorteile von Wi-Fi:

- Weite Reichweite: Mit einem 100 m Erfassungsradius können Signale ganzes Gebäude erreichen.
- Hohe Übertragungsrate: Mit einer 54 Mbit/s Übertragungsrate kann Wi-Fi die meisten Anforderungen an Datenübertragung erfüllen.
- Niedrige Kosten: Die Kosten für die Einstellung eines Netzwerk sind gering.

5.1.4 NFC (Near Field Communication)

NFC ist ein internationaler Übertragungsstandard zum kontaktlosen Austausch von Daten über kurze Strecken. Die ersten Entwürfe wurden 2002 gemeinsam von NXP Semiconductors (vormals Philips) und Sony veröffentlicht. Die Entwicklung von mehreren internationalen Normen (ISO/IEC 13157, -14443, -18092 etc.) sind noch nicht abgeschlossen.

Die NFC-Technik basiert auf der Kombination aus Smartcard- und kontaktlosen

Verbindungstechniken. Sie arbeitet in einem Frequenzbereich von 13,56 MHz und bietet eine Datenübertragungsrate von maximal 424 kBit/s bei einer Reichweite von nur zehn Zentimetern [10]. Die Kommunikation zwischen NFC-fähigen Geräten kann sowohl aktiv-passiv als auch aktiv-aktiv sein (Peer-To-Peer) im Gegensatz zur herkömmlichen Kontaktlostechnik in diesem Frequenzbereich (nur aktiv-passiv). Daher stellt NFC eine Verbindung zur RFID (radio-frequency identification)-Welt dar. Bisher kommt diese Technologie vor allem in Lösungen für bargeldlose Zahlungen kleiner Beträge zum Einsatz.



Abbildung 5.2: NFC zum Einsatz für elektrische Fahrscheine (aktiv-aktiv) und für elektronische Zahlung (aktiv-passiv) [11]

5.1.5 Zigbee

Nach der Markteinführung von Bluetooth stellte aus der Sicht verschiedener Firmen und Unternehmen heraus, dass weder Wi-Fi noch Bluetooth für selbstorganisierende Ad-hoc-Netzwerke kleiner und einfacher Geräte und Sensoren geeignet sind. Daher begann 1998 die Entwicklung eines neuen Standards für energiesparende, kabellos kommunizierende Endgeräte mit geringen Datenraten. Im Mai 2003 wurde mit dem Standard IEEE 802.15.4, die Grundlage für ZigBee geschaffen [12].

Der Standard IEEE802.15.4 definiert die physikalische Schicht (PHY) und die Subschicht für die Medienzugriffskontrolle (MAC). Auf dieser Grundlage hat ZigBee Alliance im Dezember 2004 die ZigBee-Spezifikation verabschiedet und sie im Juni

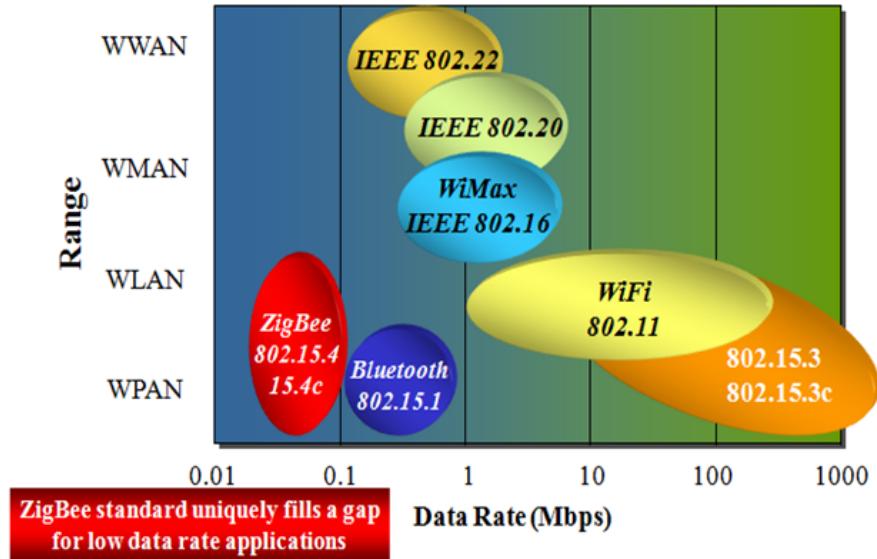


Abbildung 5.3: Anwendungsbereiche verschiedener WL-Protokolle [13]

2005 für die Öffentlichkeit verfügbar gemacht. ZigBee Alliance ist als eine unabhängige, neutrale, gemeinnützige Organisation die im Jahr 2002 gegründet wurde. In dieser Allianz haben sich über 100 namhafte Unternehmen zusammen geschlossen. Zu den Gründungsmitgliedern, die die Vereinigung leiten, gehören Freescale, Philips, Texas Instruments etc. wie in Abbildung 5.4 gezeigt .



Abbildung 5.4: Zigbee Promoter [14]

Die von IEEE802.15.4 definierte physikalische Schicht (PHY) hat eigentlich zwei Schichten, die in zwei Frequenzbereichen 868/915 MHz and 2.4 GHz getrennt arbeiten. Die niedrigere PHY-Schicht umfasst das 868 MHz-Band (Bereitschaft in

Europa) und das 915 MHz Band (Bereitschaft in USA und Australia). Die höhere PHY-Schicht arbeitet in 2,4 GHz und ist nahezu weltweit frei verwendbar. Die MAC-Schicht steuert den Zugriff auf den Funkkanal mit einem CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) Mechanismus.

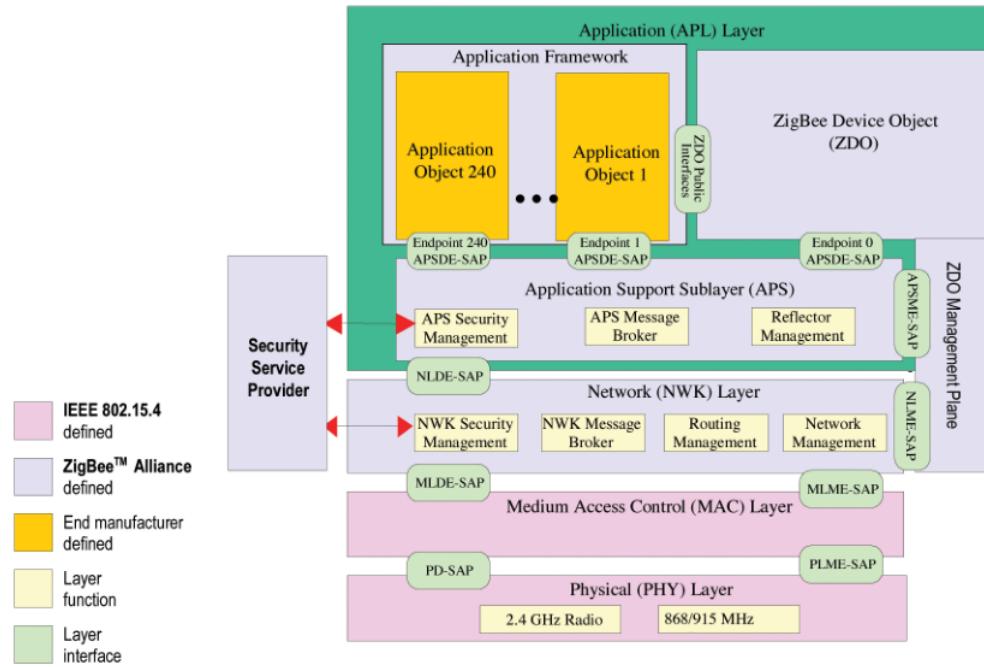


Abbildung 5.5: Von IEEE 802.15.4 und ZigBee-Protokollstapel definiertes Zigbee Schichtmodell [15]

Der Rahmen der Applikation-Schicht (APL) besteht aus Applikation Support Subschicht (APS) und Zigbee Gerät Objekt (ZDO). Die von Zigbee Produkten Hersteller definierten Applikation-Objekte nutzen den Applikation-Schicht-Rahmen und teilen sich die Sicherheitsdienste zusammen mit ZDO. Abbildung 5.5 stellt die Struktur des Zigbee-Protokollstapels dar.

Abschließend soll eine Zusammenfassung einiger wichtiger Parameter der Zigbee-Technologie gegeben werden.

Frequenzbereiche: Grundsätzlich nutzt ZigBee das 2,4 GHz ISM-Band zur Kommunikation, allerdings kann der Frequenzbereich um 868 MHz (in Europa) und 915 MHz (in den USA) als Fallback genutzt werden.

Kanäle: Im 2,4 GHz Bereich nutzt ZigBee 16 Kanäle mit einer Bandbreite von je 5

MHz. Ein weiterer Kanal ist ZigBee in Europa im 868 MHz Bereich zugewiesen. In den USA kann ZigBee im 915 MHz -Bereich weitere 10 Kanäle nutzen.

Sendeleistung: Die Sendeleistung von ZigBee-Geräten liegt zwischen 1 - 10 mW.

Reichweite: Laut ZigBee Alliance liegt die theoretische Reichweite bei etwa 100 m. Praktisch kann jedoch mit einer maximal erreichbaren Reichweite von ungefähr 50 - 70 m gerechnet werden.

Datenrate: Die Datenrate beträgt im Bereich 2,4 GHz etwa 250 kbit/s pro Kanal, etwa 40 kbit/s pro Kanal im Bereich 915 MHz und 20 kbit/s im Bereich 868 MHz.

Datenkodierung: Zur Kodierung der Daten wird bei der Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) Technik ein Frequenzsprungverfahren verwendet.

Darüber hinaus hat ZigBee folgende Eigenschaften:

- **Geringe Datenrate und niedrige Verlustleistung**

ZigBee fokussiert sich auf dem Gebiet in geringer Datenrate, nämlich 10-250 kbit/s. Die Verlustleistung ist im Betrieb dutzende Milliwatt und in Schlaf-Modus nur dutzende Mikrowatt. Mit normalen AA-Batterien kann ein Knoten damit mehrere Monate auskommen.

- **Kurzes Netzwerk-Delay**

Die Antwortzeit von ZigBee ist kurz. Es dauert normalerweise 15 ms vom Schlaf-Modus bis Betrieb. Es braucht nur 30 ms, damit ein Knoten mit dem Netzwerk eine Verbindung herstellt. Im Gegensatz dazu braucht Bluetooth 3-10 s und Wi-Fi ungefähr 3 s.

- **Hohe Zuverlässigkeit**

Mit einem Handshake-Mechanismus kann ZigBee-Geräte Daten zuverlässig übertragen.

- **Große Netzwerk-Kapazität**

Ein ZigBee-Netzwerk kann aus maximal 255 Clustern bestehen, die selbst wieder maximal 254 Knoten (Nodes) besitzen können. Daraus folgt, dass ein ZigBee-Netzwerk insgesamt maximal 64770 Geräte umfassen kann.

- **Niedrige Kosten**

Durch die geringen Datenraten und das einfache Kommunikationsprotokoll werden die Entwicklungskosten stark reduziert. Immer mehr Unternehmen haben die Entwicklung von Zigbee aktiv beteiligt. TI, Freescale, Motorola, Philips und Digi haben nacheinander ihre auf Zigbee basierten Chips und die entsprechenden Entwicklung-Kits auf den Markt vorgestellt. Nach der Schätzung von Philips ist Zigbee zukünftig über die Kosten konkurrenzfähiger als Bluetooth.

5.2 Vergleich und Folgerung

Tabelle 5.1: Vergleich der wichtigen Eigenschaften verschiedener WL-Technologien

	Bluetooth	UWB	Wi-Fi	ZigBee	NFC
International-Standard	IEEE 802.15.1x	Noch nicht fertigen	IEEE 802.11	IEEE 802.15.4	ISO/IEC 13157, -14443, -18092
Frequenzband	2,4 GHz	3,1-10,6 GHz	2,4 GHz	2,4GHz(Weltweit) 866MHz(Euro) 915MHz(USA)	13,56MHz
Datenrate	bis 2,1 Mbit/s	bis 480 Mbit/s	bis 54 Mbit/s	20-250 kbit/s	bis 424 kbit/s
Sendeleistung	1mW /2.5mW /100mW	<1 mW	>1 W	Einige Milliwatt in Betrieb, Einige Mikrowatt in Schlaf-Modus	passive Komunikation unterstützen
Reichweite	0-100m	0-50m	0-100m	0-100m	0-10cm
Sicherheit	hoch	hoch	niedrig	mitte	sehr hoch
Netzwerk Kapazität	7	127	32	64770	1
Kosten (Chipset)	circa \$5	circa \$20	circa \$25	circa \$4	circa \$2,4-4

Im Kapitel 5.1 werden kurz die fünf modernen Wireless Kommunikationstechnologien auf dem Markt vorgestellt. Außerdem werden „Wireless USB“ wegen des Streits zwischen den beiden Vertretern UWB-Forum und WiMedia-Alliance und „Infrared

Data Übertragung“ wegen des kleinen Öffnungswinkels ($\pm 15^\circ$) nicht in dieser Aufgabe berücksichtigt. In Tabelle 4.1 werden die Hauptparameter der fünf Wireless-Technologien gelistet und verglichen.

Die aufgelisteten WL-Lösungen haben jeweils ihre Stärken in ihren eigenen Umfang, z.B. Wi-Fi in WLAN, NFC in RFID, UWB in Nahbereich-Multimedia. Für diese Arbeit sind Wi-Fi, UWB und NFC nicht gut geeignet, weil sie wesentlichen Nachteile haben:

Wi-Fi: hoher Preis (\$25), hohe Sendeleistung(>1W)

UWB: hoher Preis (\$20), kein Standard, wenig Entwicklungswerkzeug

NFC: kurze Reichweite (10cm)

Deshalb soll Bluetooth und ZigBee in den Bereichen Netzwerk Kapazität, Kosten, Sicherheit und Verlustleistung miteinander verglichen werden.

- **Netzwerk-Kapazität:** Für eine Punkt-Punkt drahtlose Kommunikation gibt es bei der Kapazität keinen Unterschied zwischen Bluetooth und ZigBee. Soll ein Sensor-Netz aufgebaut werden, ist ein ZigBee Netzwerk im Vorteil, da es 64770 Geräte umfassen kann. Ein Bluetooth Netzwerk kann nur 7 Geräte umfassen.
- **Kosten:** Mit ungefähr \$4 für ein Chipsets ist ZigBee ein bisschen billiger als Bluetooth. Andererseits ist ZigBee im Vergleich zu Bluetooth noch im „Kindestalter“. Es gibt zukünftig den größeren Kostensenkungraum für Zigbee wenn die Produktion steigt.
- **Sicherheit:** Bei der Signalübertragung ist Bluetooth sicherer als ZigBee. ZigBee bietet jedoch drei grundsätzliche Mechanismen für eine sichere Datenübertragungen an: Access Control List, Verschlüsselung auf der Basis von AES und Packet Freshness Timer. Dies ist genügend für die meisten industriellen Bereiche.
- **Verlustleistung:** Bei dieser Arbeit ist die Verlustleistung ein wichtiger Faktor zu berücksichtigen. Bei der Dateübertragung ist die Sendeleistung zum großen Teil abhängig von der Daterate. An diesem Punkt fokussiert sich ZigBee nur auf dem

Gebiet in geringer Datenrate. Andererseits wenn keine Signale übergetragen werden, geht ZigBee-Knoten in Schlaf-Modus und es verbraucht dabei nur wenige Mikrowatt. Die „Schlafzeit“ eines Drucksensors macht ein Großteil der ganzen Laufzeit aus, manchmal sogar 99%. Die geringe Verlustleistung und kurze Aufweckzeiten sind eine der größten Vorteile von ZigBee gegenüber Bluetooth.

Alles in allem, ist Zigbee sowohl für die gegenwärtige Aufgabe als auch für die zukünftige Entwicklung geeigneter für unseren Drucksensor als Bluetooth und andere Wireless-Lösungen.



Abbildung 5.6: XBee Chip [16]

Der für unsere Aufgabe verwendete Zigbee-Chip ist XBee, das Produkt von Digi International. XBee beruht auf dem IEEE 802.15.4 Standard. Es arbeitet mit 3,3V CMOS-Logik und hat sehr geringe Leckströme (<10uA). Es unterstützt die UART-Schnittstelle und 10-Bit AD-Wandelung. Der Antennen-Typ kann zwischen Chip-Antenne, Whip-Antenne und Dipole-Antenne gewählt werden.

Die XBee-Produktgruppe unterscheidet sich in XBee Serie und XBee-Pro Serie. Die zwei Serien werden für verschiedene Einsatzbereiche entworfen. Die Hauptunterschiede zwischen den beiden Serien sind die Reichweite, die Verlustleistung und die Größe. Die XBee-Serie kann die Reichweite von 30 m im Gebäude und 90 m im Freien erreichen. Sie verbraucht typischweise 1 mW bei der Datensendung. Zum Vergleich erreicht die XBee-Pro-Serie eine Reichweite von 90 m im Gebäude und 1600 m im Freien. Die XBee Pro-Serie verbraucht typischweise 63

mW bei der Datensendung. Die Dimension von XBee und XBee-Pro werden in Abbildung 5.7 dargestellt.

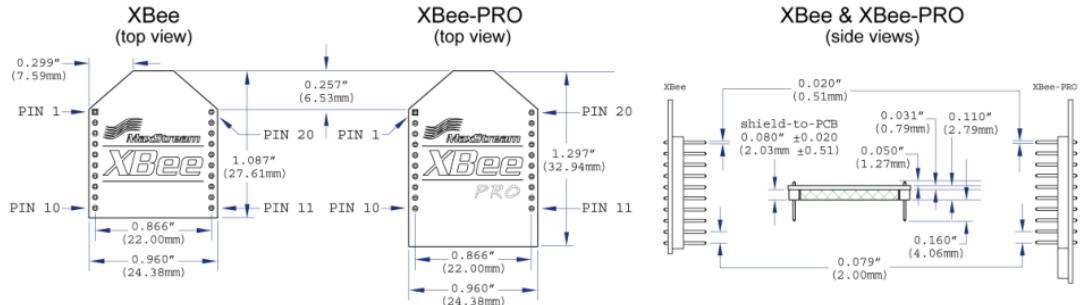


Abbildung 5.7: Vergleich der Dimensionen der XBee und XBee-Pro Serie [16]

Die andere Parameter von XBee und XBee-Pro unterscheiden sich lediglich nur geringfügig. In Tabelle 4.2 werden wichtige Spezifikationen von XBee und XBee-Pro gezeigt.

Tabelle 5.2: wichtige Spezifikationen von XBee und XBee-Pro [16]

	XBee	XBee-Pro
Operation Frequenz	ISM 2,4 GHz	
Operation Temperatur	-40°C – 85°C	
Datenrate	250kbps	
Sendeleistung	1mW	63mW
Reichweite im Gebäude	30m	90m
Reichweite im Freien	90m	1600m
Sendung Arbeitsstrom	45mA	250mA
Receive Arbeitsstrom	50mA	55mA

In dieser Arbeit ist die 30m Reichweite für die Indoor-Übertragung schon genügend. Darüber hinaus sind die Chipgröße und Verlustleistung wichtige Faktoren für die endgültige Platine. Deshalb wird XBee statt XBee-Pro ausgewählt.

6 Block-level Realisierung

Nachdem die Kompensation-Lösung und die Wireless-Lösung bestimmt werden, ist sicherzustellen, dass die Funktion des Systems gut verwirklicht werden kann. Dazu dient das Block-level System als die Grundlage des Board-level Systems. Bevor der Drucksensor, der Kompensationsmodul und der Wireless-Modul zusammenarbeiten, werden dessen Funktionen einzeln verifiziert.

6.1 Charakterisierung des Drucksensors

6.1.1 Kleben und Drahtbonden des Drucksensors

Um den Drucksensor in der Form eines Siliciumchips (Die) im Klimaschrank zu messen, muss er zunächst elektrisch einfach anschließbar sein.

Dazu wird der Drucksensor zuerst mit einem Zweikomponentenkleber (UHU plus endfest 300) auf den TO8-Sockel geklebt. Für den Epoxidharzkleber werden der Binder und Härter im Verhältnis 1:1 gemischt. Zum Aushärten muss der Sensor mindestens 4 Stunden bei 100°C gebacken werden [17]. Der TO8-Sockel mit sieben Pins und einem Hohlpin dient nicht nur als Träger des Sensors, sondern auch für die elektrische Kontaktierung und eine druckdichten Trennung zweier Räume.

Nachdem der Drucksensorchip auf dem TO8-Sockel befestigt ist, erfolgt die Herstellung der elektrischen Verbindung zwischen dem Sensor und den Pins vom TO8 mittels Drahtbonden. Drahtbonden ist ein ultraschallunterstütztes

Kaltpressschweißverfahren, bei dem metallische Bindungen durch Diffusionsvorgänge im Interface ausgebildet werden [18].

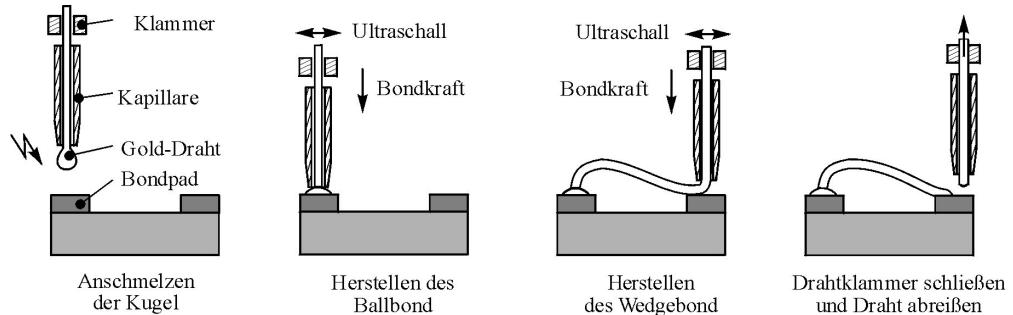


Abbildung 6.1: Graphische Darstellung des Prozesses vom Ball-Wedge-Bonden [18]

Es wird zwischen Ball-Wedge und Wedge-Wedge Verfahren unterschieden. Zur Montage des Sensorchips wird in dieser Arbeit Ball-Wedge-Bonden mit Golddraht von 25um Durchmesser an einem manuellen Thermosonic-Bonder durchgeführt. Im Abbildung 6.1 wird der Bondprozess vom Ball-Wedge-Bonden schematisch dargestellt.



Abbildung 6.2: Manuelles Thermosonic-Bondgerät

Beim Drahtboden wird zunächst eine Kugel („Ball“) am Drahtende durch eine

Funkenentladung angeschmolzen. Die Kugel hat circa 2,5-3 fachen Drahtdurchmesser. Die Ultraschall-Bewegung der Kapillare verdrängt Verunreinigungen auf dem Bondpad nach außen. Unter Temperaturzufuhr, Druck und Ultraschall-Leistung wird der erste Bond auf ein Bondpad des Drucksensors gesetzt. Die Kugel erhält dabei durch die Verformung ein nagelkopfähnliches Aussehen. Danach wird die Kapillare angehoben und in Richtung Pin bewegt. Über dem Pin wird erneut mit einer Ultraschall-Bewegung, Temperatur und Druck der Vorgang wiederholt. Dabei bildet sich die zweite Bondverbindung in Form eines Keils („Wedge“). Nach dem setzen des Wedge bildet sich eine Sollbruchstelle, an der der Draht beim weiteren Bewegen der Kapillare abreißt.

Durch eine erneute Funkenentladung wird eine Kugel für den nächsten Bondvorgang erzeugt. Das verwendete manuelle Thermosonic-Bondgerät zeigt Abbildung 6.2.

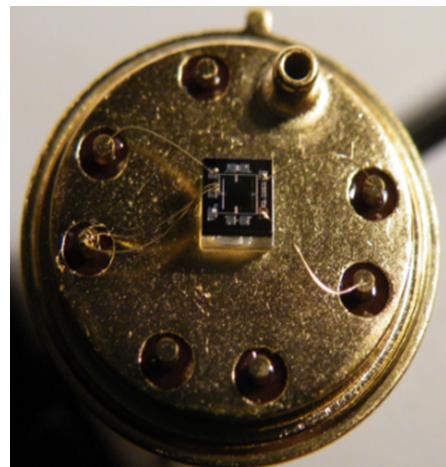


Abbildung 6.3: Auf dem TO8-Sockel gebondeter Drucksensor

Da auf dem Sensor eine geöffnete Wheatstone Brücke realisiert wurde, muss diese beim Bonden mit einem zusätzlichen Bond geschlossen werden. Dazu können die zwei nicht verbundenen Bondpads auf demselben Pin des TO8-Sockels gebondet werden.

6.1.2 Messplatz aufbauen

Nach dem Drahtboden des Drucksensors soll er charakterisiert werden. Für die Aufnahme der Kennlinie des Drucksensors steht ein Digitalmultimeter, eine Spannungsquelle, ein Scanner und ein Klimaschrank mit Druckregeler zur Verfügung. Die für den Aufbau des Messplatzes gebrauchten Messgeräte werden in Tabelle 6.1 aufgelistet [17].

Tabelle 6.1: Bezeichnung der Messgeräte zur Charakterisierung des Drucksensors

	Serienmodell Hersteller	Arbeits -bereich	Schrittweite	Fehlergrenze
Spannungsquelle	Keithley230, Keithley Instruments Inc.	100V 10V 1V 0,1V	50mV 5mV 0,5mV 0,05mV	0,05%+50mV 0,05%+10mV 0,05%+0,5mV 0,075%+0,05mV
Digitalmultimeter	Keithley193A, Keithley Instruments Inc.	1000 V	100 nV	0,005%+2 uV
Temperaturschrank	VMT 07/64 Heraeus Vötsch GmbH	−70°C – 180°C	0,1°C	0,1%
Druckregeler	DP510, Druck Inc.	0-7 bar 0-70 bar	0,7 mbar 7mbar	2,8 mbar 5,6 mbar

Diese Messgeräte können entweder manuell oder mittels GPIB-Datenbus vom PC gesteuert werden. Auf der PC-Seite dient ein Labview-Programm zur automatisierten Messsteuerung und Datenaufnahme. Aufgrund eines defekten Thermistorwiderstandes (Pt-100) kann die Temperatur in der Druckkammer nicht stabil gemessen werden wie in Abbildung 6.4 dargestellt.

Daher ist eine automatisierte Messung nicht durchführbar und man muss alle Parameter der Testumgebung direkt bei jedem Messgerät eingeben und die Ergebnisse manuell notieren. Nach jeder Einstellung der Druckeingabe muss man warten, bis die Ausgangsspannung sich stabilisiert hat, erst dann können die Ergebnisse notiert werden. Weil die Temperatur in der Druckkammer langsam der Temperatur im

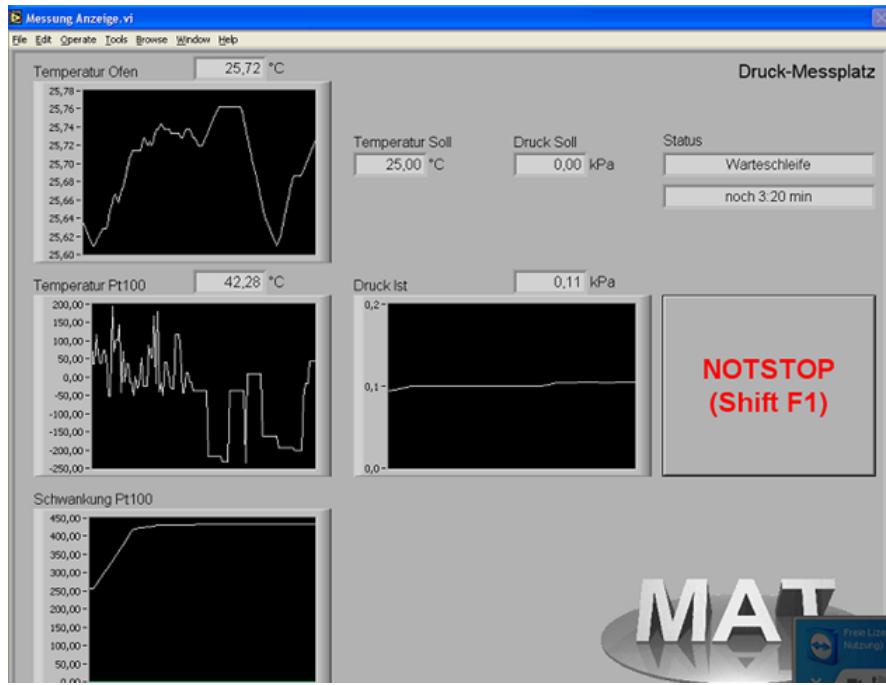


Abbildung 6.4: Instabile Temperaturausgabe bei Pt100 im Druckkammer

Klimaschrank folgt, muss die Wartezeit nach jeder Einstellung der Temperatur länger sein.

6.1.3 Messergebnisse

Tabelle 6.2: Ausgangsspannung des 5 bar-Drucksensors bei 5V Spannungsspeisung

	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C
0 bar	-1,47	-1,31	-1,20	-1,07	-1,23	-1,25	-1,18	-1,24
0,5 bar	0,76	0,87	0,93	1,04	0,82	0,76	0,79	0,71
1 bar	3,00	3,04	3,08	3,14	2,86	2,76	2,76	2,64
1,5 bar	5,23	5,21	5,22	5,24	4,91	4,77	4,73	4,57
2 bar	7,45	7,38	7,36	7,33	6,95	6,77	6,70	6,50
2,5 bar	9,70	9,56	9,49	9,43	8,99	8,78	8,65	8,42
3 bar	11,93	11,74	11,63	11,50	11,03	10,78	10,61	10,35
3,5 bar	14,16	13,92	13,76	13,57	13,07	12,78	12,57	12,26
4 bar	16,39	16,10	15,90	15,64	15,11	14,78	14,53	14,19
4,5 bar	18,62	18,29	18,04	17,72	17,15	16,78	16,49	16,12
5 bar	20,86	20,47	20,17	19,81	19,19	18,79	18,45	18,03

Tabelle 6.2 zeigt die gemessenen Ausgangsspannungen des Drucksensors mit 5 bar Druckbereich in Abhängigkeit von Druck und Temperatur. Der Temperaturbereich

wurde von 0°C bis 70°C in 10°C Schritten und der Druckbereich zwischen 0 bar und 5 bar in 0,5 bar-Schritten variiert. Die Einheit der Ausgangsspannung ist Millivolt.

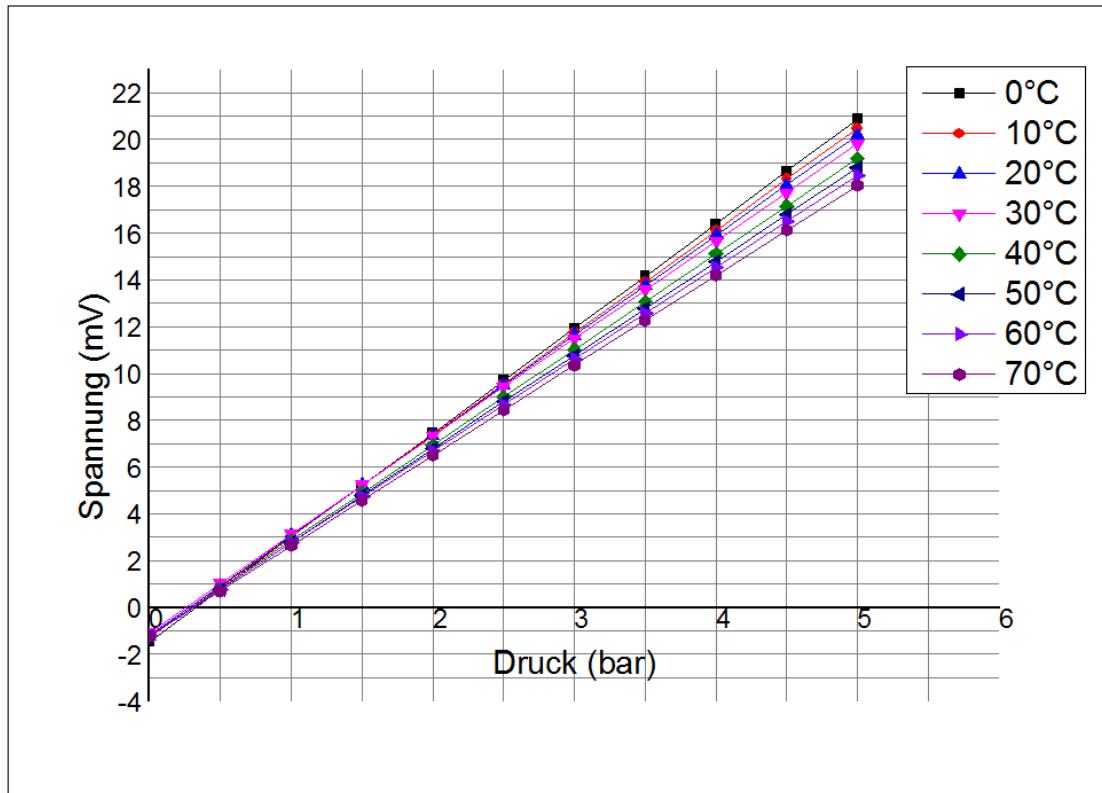


Abbildung 6.5: Kennlinien des 5 bar-Drucksensors für verschiedene Temperaturen

In Abbildung 6.5 kann man die gute Linearität und große Temperaturabhängigkeit des Sensors erkennen. Die Kennlinien weisen eine geringere Steigung mit einem Temperaturanstieg, was mit der Theorieerklärung im Kapitel 3.3 übereinstimmen. Ausgehen von der Gleichung 3.22 erkennt man, dass die Empfindlichkeit des Drucksensors bei 0°C $0,89 \text{ [mV/V} \cdot \text{bar]}$ ist, während sie bei 70°C auf $0,77 \text{ [mV/V} \cdot \text{bar]}$ sinkt. Die 14,3% Schwankung der Empfindlichkeit und die 0,4V Schwankung der Nullpunktoffsetspannung zwischen 0°C und 70°C zeigt den großen Einfluss des Temperaturwechsels im Ausgangssignal des Sensors.

6.2 Funktionalität von MLX90308 verifizieren

Um die Funktionalität des Kompensation-ASIC MLX-90308 zu verifizieren, muss es mit dem Drucksensor verbunden werden und anschließend die Ausgangssignale am Messplatz überprüft werden. Dazu müssen zuerst die Kompensationskoeffizienten im MLX-90308 eingegeben werden.

6.2.1 Entwicklungsboard und Programmersoftware SW90308

Für die Programmierung des Chips MLX90308 wird das Entwicklungsboard EVB90308 und Software SW90308 eingesetzt. EVB90308 ist auch ein Produkt von Melexis, das MLX90308 unterstützt.

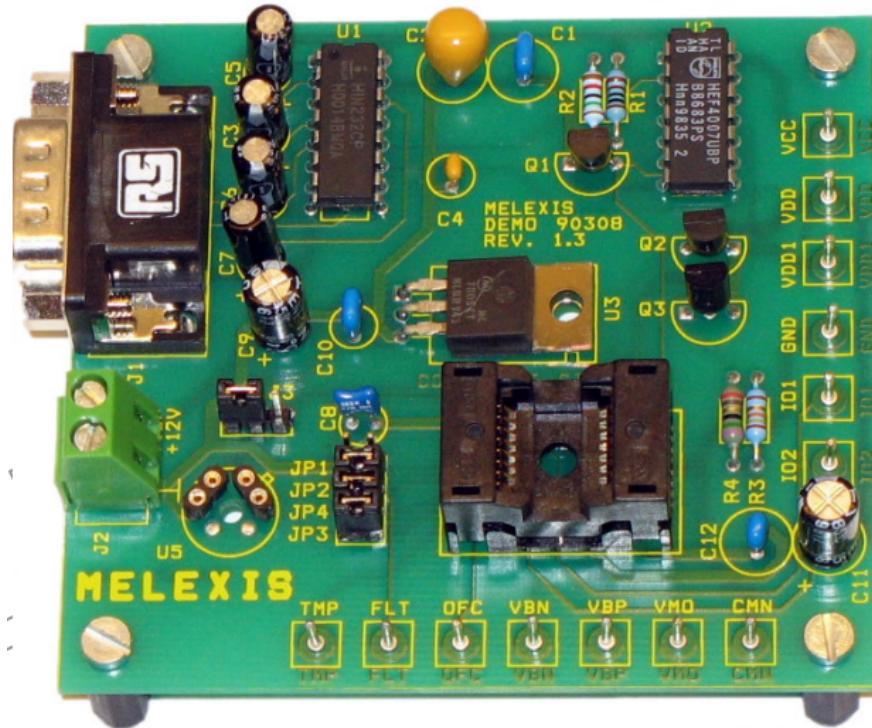


Abbildung 6.6: Entwicklungsboard EVB90308

Mit dem SO16 (Small Outline Package)-Adapter auf dem Board wird der SMD (Surface Mounted Device)-Chip einfach steckbar und herausziehbar. Das ist wichtig für In-System-Programmierung und Wiederverwendung des Chips. Mittels dem in

EVB90308 integrierten ASIC MAX-232 und dazu gehörten Peripherieschaltungen ist MLX90308 dann durch RS-232 Schnittstelle mit PC kommunizierbar. Abbildung 6.6 zeigt das Schaltbild des Entwicklungsboards.

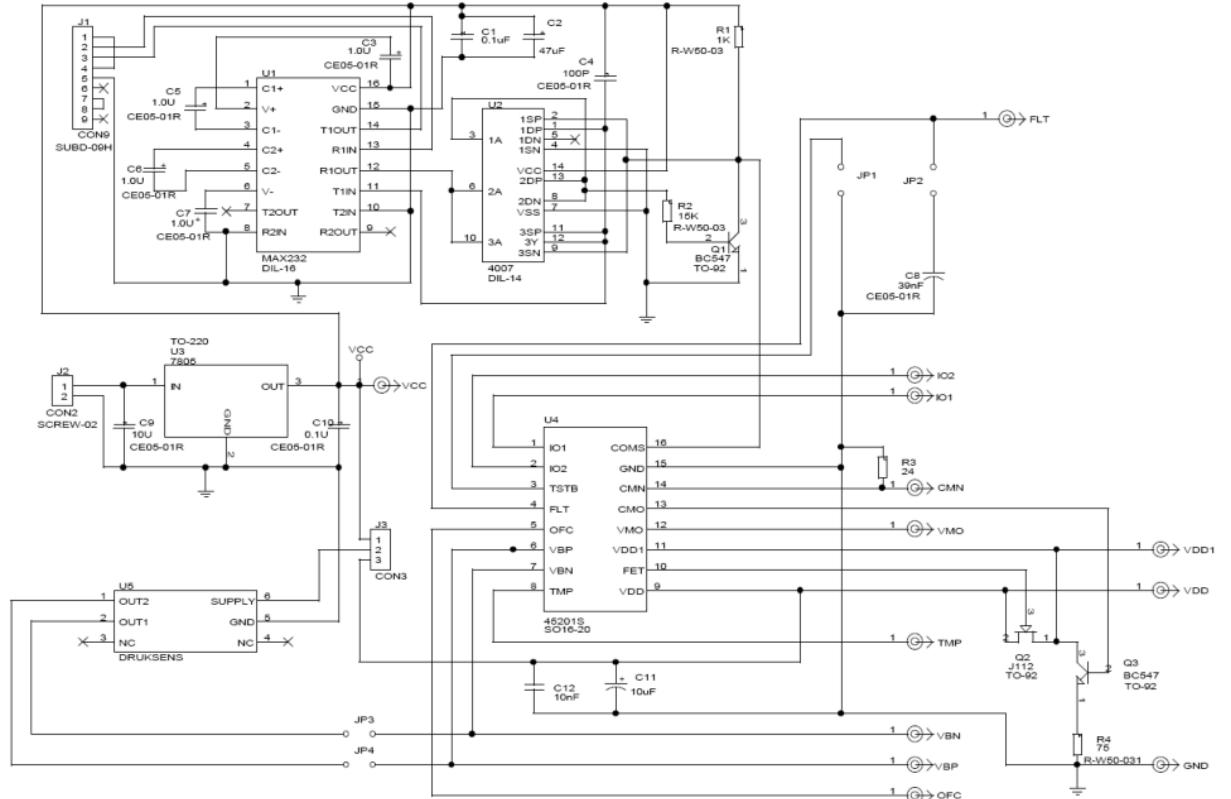


Abbildung 6.7: Schaltbild vom Entwicklungsboard EVB90308 [19]

Wie in Abbildung 6.6 und 6.7 gezeigt, liefert der Sensoreingang U5 eine Möglichkeit, dass man den Sensor direkt anschließen kann. Aber wegen der Dimensionsfehlanpassung zum TO8-Sockel ist die Schnittstelle nicht verwendbar. Daher werden die Ausgangssignale vom Drucksensor mittels Drähten zu dem VBP-Pin und dem VBN-Pin auf dem EVB90308 führen. Weiterhin ist zu beachten, dass der MLX90308 wegen des Designmangels des EVB90308 nicht direkt vom PC gefunden werden kann nach Verbindung über die RS-232 Schnittstelle und VDD-Pin. Es ist erst dann lesbar und schreibbar nach der Verbindung zwischen VDD-Pin und VCC-Pin auf dem Board.

Nachdem die elektrische Verbindung zwischen PC und EVB90308 hergestellt wurde, wurde die Programmersoftware SW90308 verwendet. Diese Software wurde von

Melexis zum Lesen und Schreiben der Parameter in den MLX90308 entwickelt. Nach der Einstellung des Seriellen Ports „Serial Port“ und der „Baud Rate“ kann der MLX90308 mit dem PC kommunizieren.

6.2.2 Anpassung der Kompensationskoeffiziente zum Drucksensor

Bevor die Kompensationskoeffiziente eingegeben werden, soll der Kompensationsalgorithmus von MLX90308 dargestellt werden.

Abbildung 6.8 zeigt die Bedienoberfläche für die Einstellung der Kompensationskoeffiziente.

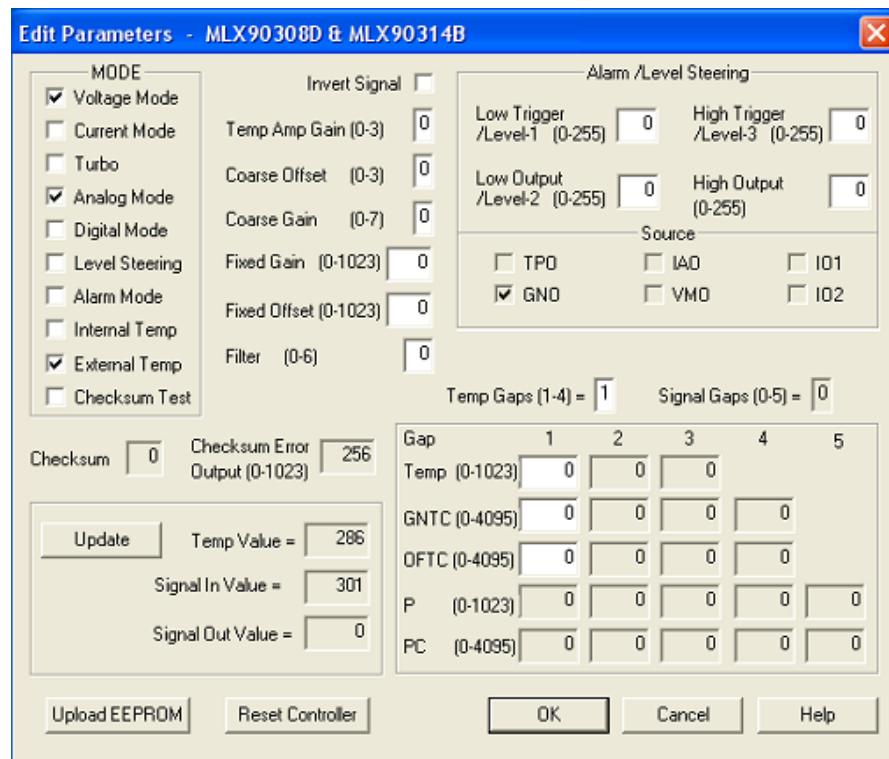


Abbildung 6.8: Edit Parameter Fenster

Das Ausgangsspannung des MLX90308 ist ein Analogsignal und hat folgende Form [5]:

$$V_{out} = HG * T_Gain_i * CSGN * (V_{in} + T_OFFSET_i + CSOF) \quad (6.1)$$

HG: Hardware Verstärkung (20V/V), nicht veränderbar

T_Gain_i : Von Temperatur abhängige Verstärkung im i_ten Temperaturausschnitt

T_OFFSET_i : Von Temperatur abhängige Offsetskompensation im i_ten Temperaturausschnitt

CSGN (Coarse Gain) : grobe Verstärkung (4 bit)

CSOF (Coarse Offset) : grobe Offsetskompensation (8 bit)

Bei dem MLX90308 können vier Temperaturausschnitte (Temp. Gap) durch drei Demarkationspunkte T1, T2 und T3 definiert werden. Dabei kann man vier verschiedenen GNTC (Gain Tempratur Coefficient) und OFTC (Offset Temperatur Coefficient) jeweils für Kompensation von TKS und TKO einstellen. Die Werte von T_Gain_i in Gleichung 5.1 werden direkt mittels GNTC bestimmt (Gleichung 6.2-6.5)
Im 1_ten Temperaturausschnitt:

$$T_Gain_1 = FG - GNTC1 * (T1 - Temp) \quad (6.2)$$

Im 2.Temperaturausschnitt:

$$T_Gain_2 = FG + GNTC2 * (Temp - T1) \quad (6.3)$$

Im 3.Temperaturausschnitt:

$$T_Gain_3 = FG + GNTC3 * (Temp - T2) \quad (6.4)$$

Im 4.Temperaturausschnitt:

$$T_Gain_4 = FG + GNTC4 * (Temp - T3) \quad (6.5)$$

FG (Fixed Gain): Feste Verstärkung (10 bit, ändert sich nicht mit Temperatur)

Temp: Von MLX90308 gemessene Echtzeit-Temperatur

Ähnlich ergibt sich T_OFFSET_i:

$$T_{OFFSET_i} = FO + OFTCi * dT \quad (6.6)$$

FO (Fixed Offset): feste Offsetskompensation (10 bit, ändert sich nicht

mit Temperatur)

dT: Temperaturdifferenz zwischen der Echtzeit-Temperatur und dem letzten Temp-Demarkationspunkt Ti.

Nach zahlreichen Versuchen wurden die Kompensationskoeffizienten wie in Tabelle 6.3 konfiguriert. Das Ziel ist, dass die Kennlinien des Drucksensors nach Verstärkung und Kompensation zwischen 0°C und 70°C ohne Nullpunktsoffset, linear und gleich der Kennlinie bei 23°C sind. Die vier Temperaturausschnitte wurden hier <20°C, 20°C - 40°C, 40°C - 60°C, >60°C mit den entsprechenden Digital-Demarkationspunkten T1=315 (20°C), T2=363 (40°C), T3=414 (60°C) konfiguriert.

Tabelle 6.3: Konfiguration der Kompensationskoeffiziente

Temperatur Ausschnitt	1	2	3	4
Digital Demarkationspunkten	315	363	414	
Gain Tempratur Coefficient	1050	600	600	900
Offset TemperaturCoefficient	2260	0	285	40
Temp Gaps: 4 Temp Amp Gain: 2 Coarse offset: 2				
Coarse Gain: 3 Fixed Gain: 145 Fixed Offset: 0 Filter: 3				

Diese Koeffizienten kann man auch mit dem Textdokument aus dem Anhang C durch die Funktion „Upload EEPROM“ eingeben.

6.2.3 Kompensierte Messergebnisse

Nach Eingabe der Kompensationskoeffizienten muss überprüft werden, ob die kompensierten Messergebnisse wie gewünscht sind. Die Messmethode und Messumgebung sind identisch mit der im Kapitel 6.1 dargestellt. Es wird lediglich das Entwicklungsboard EVB90308 zusammen mit dem Drucksensor in Klimaschrank gelegt, dadurch erfährt der interne Temperatursensor des MLX90308 dieselbe Temperatur wie der Drucksensor. Das ist auch die Voraussetzung der Kompensation.

Tabelle 6.4: Kompensierte Messergebnisse des 5 bar-Drucksensors bei 5V Spannungsspeisung

	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C
0 bar	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5 bar	0,31	0,30	0,30	0,31	0,31	0,30	0,31	0,31
1 bar	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,60	0,61	0,60
1,5 bar	0,92	0,91	0,91	0,92	0,91	0,90	0,91	0,90
2 bar	1,22	1,21	1,22	1,22	1,21	1,20	1,21	1,20
2,5 bar	1,52	1,52	1,52	1,52	1,51	1,50	1,51	1,50
3 bar	1,82	1,82	1,82	1,82	1,81	1,80	1,81	1,80
3,5 bar	2,12	2,12	2,12	2,12	2,11	2,10	2,11	2,10
4 bar	2,43	2,43	2,42	2,42	2,41	2,40	2,41	2,39
4,5 bar	2,73	2,73	2,73	2,72	2,71	2,70	2,70	2,69
5 bar	3,03	3,03	3,03	3,02	3,01	3,00	3,00	2,99

Wie in Tabelle 6.4 und Abbildung 6.9 gezeigt, wurden die Ausgangssignale des Drucksensors vom Millivoltbereich in den Voltbereich verstärkt und die die Kennlinie besitzt eine konstante Empfindlichkeit von $0,1212[V/V \cdot bar]$. Der Nullpunktoffset wurde eliminiert. TKO und TKS sind vernachlässigbar gering. Die in Kapitel 3.3 genannten vier Aufgaben wurden erfüllt, was auch die Grundlage für die folgende Kombination mit dem XBee-Modul ist.

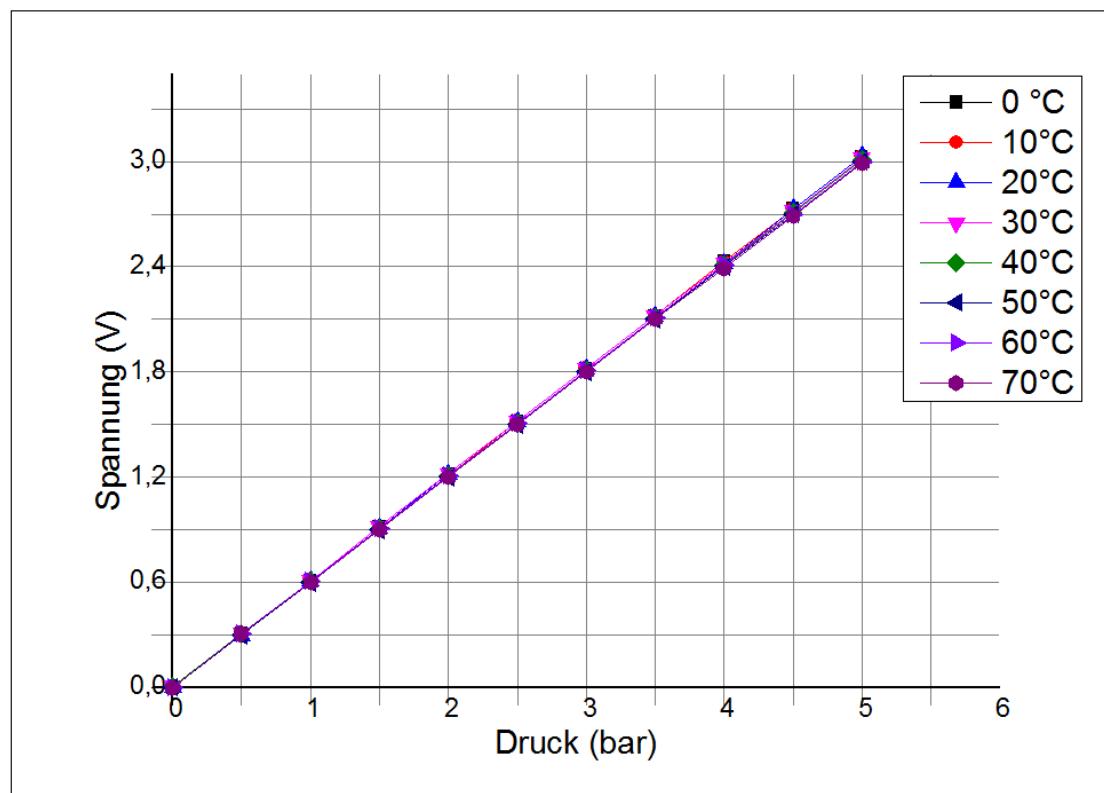


Abbildung 6.9: Kennlinien des Drucksensors unter verschiedenen Temperaturen nach Kompensation

6.3 Funktionalität von XBee verifizieren

6.3.1 Basis-Funktion verifizieren

Für die Verifikation der Funktionen des XBee ist ein XBee-Adapter notwendig. Nach einstecken auf den Adapter sind alle Pins des XBee-Chips mit den Standard-Dupont-Steckerbuchsen angeschlossen und damit einfach von außen lesbar und schreibbar. In diesem Adapter wird ein CH340T-Chip, ein typisches ASIC zur USB-TTL Schnittstelle-Wandlung, integriert. Damit kann der XBee mit PC kommunizieren und man kann die Parameter der XBee-Firmware direkt am PC konfigurieren.

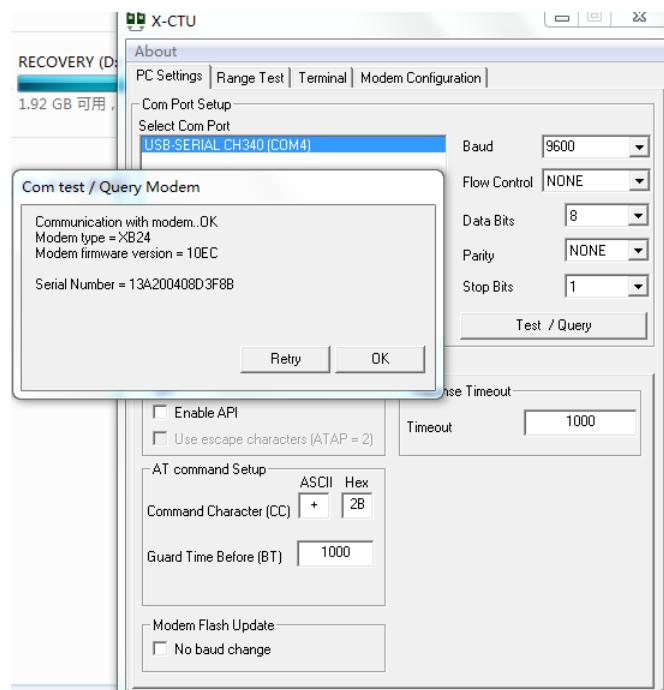


Abbildung 6.10: Software X-CTU für Konfiguration der XBee-Parameter

Nach Hardwareverbindungen und Installation der Software X-CTU und der CH340T-Treiber auf dem PC sind alle Vorbereitungsarbeiten für Verifikation der Basis-Funktionen von XBee fertig. Wie Abbildung 6.10 zeigt, durch die von Digi International selbst entwickelte Software X-CTU kann man den verbundenen XBee-Modul finden und seine Basis-Parameter lesen.

Wiederholte man die Vorarbeiten an einem anderen PC, können die beiden XBee Module miteinander kommunizieren.



Abbildung 6.11: Unterhaltung zwischen zwei XBee-Modulen

Außer der Basis-Kommunikation sind die Parameter-Konfiguration und 10 bit AD-Wandlung zu verifizieren. Um die Parameter in Firmware zu konfigurieren, muss der XBee-Modul zunächst von dem Idle-Modus in den Kommando-Modus wechseln, indem man die 3-Charakter Befehl Sequenz „+++“ eingibt und eine bestimmte Wartezeit abwartet.

Abbildung 6.12 zeigt das Lesen und die Konfiguration einiger wichtiger Parameter des XBee-Moduls. Mit dem Befehlen „atsh“ und „atsl“ kann man jeweils die höhere und niedrigere 32 bits der speziellen IEEE 64-bit Netzwerk Adresse lesen. Mit dem Befehl „atpl“ kann man den Leistungspegel bei der Signalsendung lesen und konfigurieren. Die Zahl 4 bedeutet 0 dBm (1 mW). Der Befehl „atch“ zeigt das RF-Kommunikationskanal zwischen XBee-Modulen. Mit dem Befehl „atnd“ können alle anwesenden XBee-Module in der aktuellen Kommunikationskanal gefunden und ihre Adresse gezeigt werden. Der Befehl „atd0 2“ setzt Pin 20 des XBee-Chips in

Modus „Analog in“. Der Befehl „atir f4“ ermöglicht es die Abtastrate zu konfigurieren. Dabei steht „f4“ für 100ms, also 10Hz Abtastrate. Mit dem Befehl „atcn“ verlässt der XBee den Kommando-Modus.



Abbildung 6.12: Parameter von XBee konfigurieren in Kommando-Modus

Nachdem Pin 20 des XBee-Chip B in „Analog in“ Modus versetzt wurde, konnte der XBee-Chip A die vom XBee-Chip B gelesenen Analogsignale mit 10Hz Abtastrate empfangen. Die empfangenen Signale sind alle in Frame-Format wie in Abbildung 6.13 gezeigt. Das heißt die A/D umgesetzten Drucksignale werden zusammen mit Start-Zeichen, Datenlänge, Signalstärke, Prüfsumme und andere Informationen in Frame gepackt. Wie in Abbildung 6.13 gezeigt, startet jeder Frame mit dem Start-Zeichen „7E“. Weil keine Signale an Pin 20 des XBee-Chips B verbunden wurden, zeigte die umgesetzte Digitalsignale „00“. Die genutzte Frame-Stuktur wird im Kapitel 7.3 ausführlich erklärt.

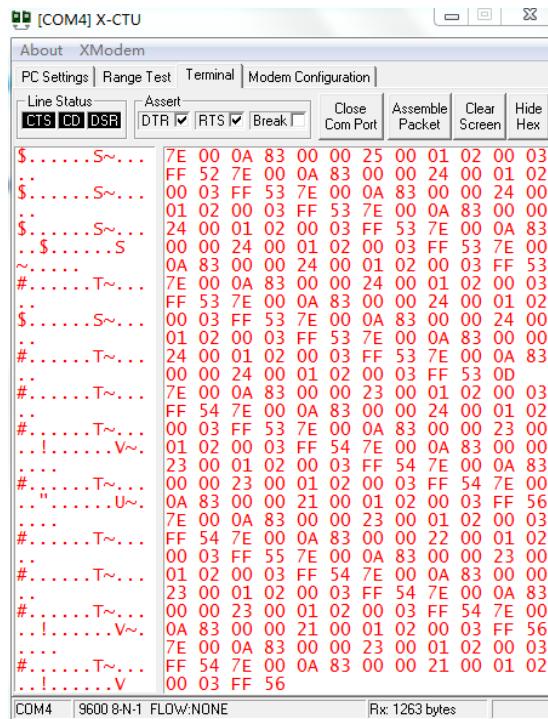


Abbildung 6.13: Darstellung der vom XBee Chip A empfangenen Signale in Frame-Form

6.3.2 Drahtloses Neigungserkennung-System mittels XBee aufbauen

Nach der Verifikation der Basis-Funktionen ist XBee im System zu testen. Dazu wurde ein Drahtlos-Neigungserkennung-System aufgebaut, damit die Echtzeit-Neigung des Sensors drahtlos durch PC gezeigt werden kann.

Das System besteht aus einem 3-Achsen Beschleunigungssensor, zwei XBee-Modulen für die Signalübertragung und einem Arduino-Board für Power-Management, Kontrollierung und Datenerfassung.

Der 3-Achsen Beschleunigungssensor ADXL345 ist ein Produkt von „Analog Device“. Der ist ein kleiner, dünner Low-Power-Sensor mit hoher Auflösung (13-bit). Die Ausgangssignale sind durch I2C Schnittstelle lesbar.

Zwischen dem Beschleunigungssensor ADXL345 und dem XBee-Module arbeitet ein Arduino Mega2560 als „Gehirn“ des Systems. Der Arduino Mega 2560 ist eine häufig verwendete Multifunktion-Leiterplatte basierend auf den Mikrokontroller

ATmega2560, einen Single Chip Microcontroller von der Fa. Atmel. Durch die in der Leiterplatte integrierten Spannungsregler kann man die vom XBee und Sensor benötigten Spannungspegel 3,3V und 5V einfach bekommen.



Abbildung 6.14: 3-Achsen Beschleunigungssensor ADXL345 [20]

Die Ausgangssignale des ADXL345 liegen in Form von 3 orthogonalen Beschleunigungen proportional zur Erdbeschleunigung vor und werden getrennt in 6 Register zwischgespeichert. Weil der Arduino sowohl I2C- als auch UART-Schnittstelle unterstützt, man kann mit passender Programmierung in ATmega2560 die Ausgangssignale vom Beschleunigungssensor ADXL345 lesen, verarbeiten und anschließend in XBee (Sender) weiterleiten. Der andere XBee (Rezeptor) empfängt die Sensorsignale und führt sie durch USB-Schnittstelle zum PC. Durch die Programmierung in der Softwareumgebung „Processing“, welche auf eine Einsatzbereiche Grafik, Simulation und Animation spezialisiert ist, werden die Sensorsignale am PC weiter bearbeitet und in ein Objekt (Mondwagen) übertragen. Wie in Abbildung 6.15 gezeigt, die Neigung des Mondwagens im Bildschirm spiegelt die Neigung des Sensors in einer kurzer Verzögerung. Alle dazu benötigte Programme sind im Anhang geschrieben.

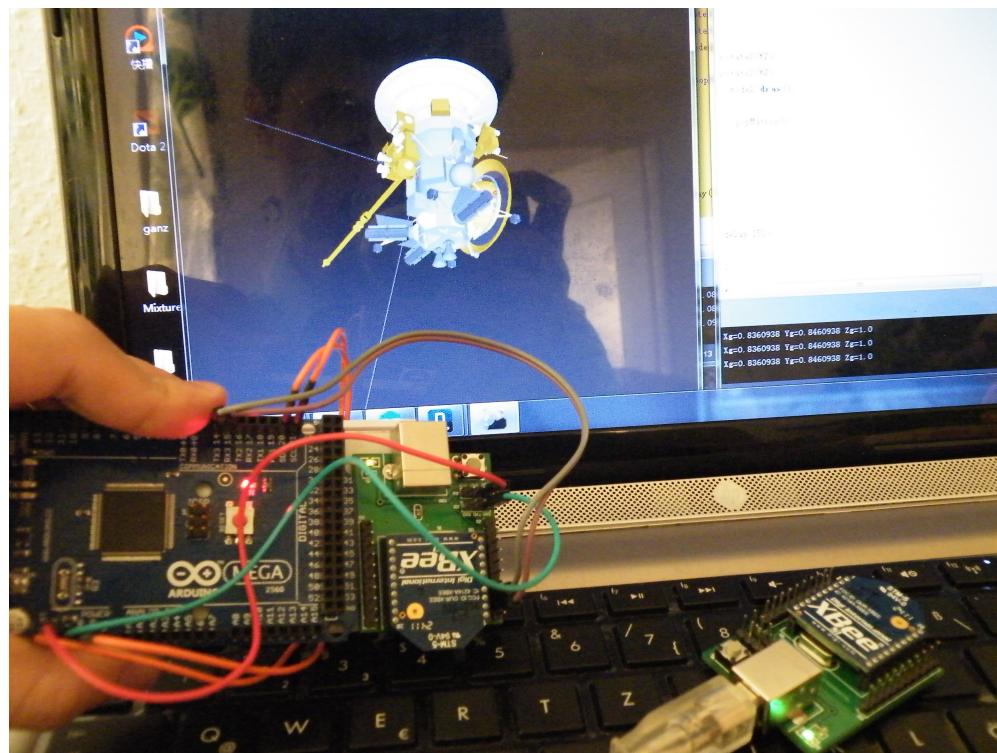


Abbildung 6.15: Drahtlos-Neigungserkennung-System mittels XBee und Beschleunigungssensor

6.4 Zusammenschluss aller Komponenten

Nach Verifikation der drei einzelnen Module sind sie zu verbinden, um die Hauptfunktion auf Blocklevel zu realisieren.

Die Signale der Module wurden durch direkte Kopplung verbunden. Pin 20 des XBee wurde zum Modus „Analog in“ konfiguriert und empfängt die Analogsignale aus Pin „VMO“ von MLX90308 bei einer 10Hz Abtastrate. „Samples Before Transmission“ wurde in „5“ konfiguriert. Das bedeutet, dass fünf Daten vor jeder Sendung gepuffert und in einem Rahmen gepackt werden. Pin-14 „VREF“ von XBee wurde mit Pin-1 „VCC“ verbunden, damit wurde die Referenzspannung für A/D-Umsetzung in 3,3V konfiguriert.

Wie Abbildung 6.16 zeigt, laufen die Ausgangssignale vom Drucksensor jeweils durch Bonddrähte, TO8-Adapter, Leiterplatteleitung, dünnen DuPont-Signaldrähte, Schalter, dicke Signaldrähte, DuPont-Schnittstellen und Pins im Entwicklungsboard.

Dabei gibt es viele Kontaktwiderstände und gekoppelte Störungen. Wichtig ist, die Funktionalität des Systems zu prüfen.

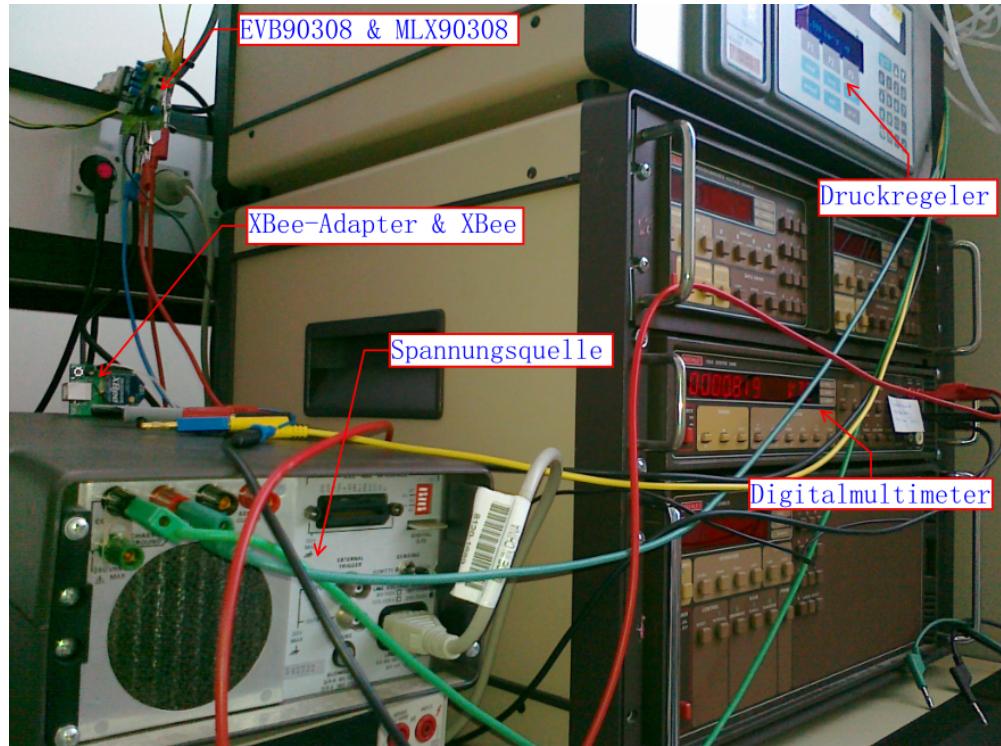


Abbildung 6.16: Zusammengepasste Module im Messplatz

Obwohl bei den von XBee umgesetzten Signalen immer eine 0,2V-Schwankung entstand, stimmen die Signale mit den vom Digitalmultimeter gemessenen Ausgangsspannung am Pin „VMO“ des MLX90308 überein. Außerdem folgten die umgesetzte Signale schnell der Änderung der geänderten Druckeingabe, was einen Grundstein für die folgende Boardlevel-Integration legte. Diese 0,2V-Schwankung bestand in der Regel aus der gekoppelten Störungen. Nachdem Bulk Kondensatoren und Bypass Kondensatoren zwischen den Modulen bei der Boardlevel-Integration eingelegt werden, kann die Schwankung zum großen Teil eliminiert werden.

7 Board-level Realisierung

7.1 Entwurf der Leiterplatte

7.1.1 Energieversorgung und Peripherieschaltungen

bestimmen

Vor dem Boardlevel-Entwurf sind zuerst die Bauteile für die Energieversorgung zu bestimmen. Dabei muss man nicht nur die Spannungspeisung für den Drucksensor und Versorgungsspannung für MLX90308 und XBee berücksichtigen, sondern auch die Arbeitsströme des Systems gewährleisten.

MLX90308 arbeitet mit 5V-Versorgungsspannung, während der XBee mit 3,3V arbeitet. Weil der Spannungspegel einer Batterie normalerweise nach einer Periode der Verwendung sinken kann, sind vorzugsweise 6V-Batterien mit LDOs (low dropout regulator) einzusetzen. Den 6V-Pegel kann man entweder durch zwei 3V Knopfzelle-Batterien in Serie oder durch vier 1,5V AAA-Batterien in Serie realisieren. Der Vorteil bei der Größe von Knopfzelle-Batterien ist offensichtlich. Aber es gibt Probleme bei ihrem lieferbaren Strom. Der Arbeitsstrom der MLX90308 ist meistens 5mA, während der Strom bei der Signalsendung von XBee 45mA ist. Inklusive des Querstroms des Sensors und der Peripherieschaltungen kann die Arbeitsströme bei der Signalsendung 60-70mA erreichen. Der Ausgangsstrom der Lithium Knopfzelle-Batterien ist normalerweise nur einige Milliampere. Deshalb ist die Durchführbarkeit der Knopfzelle-Batterien nach der Fertigung der ersten Version

der Platine zu verifizieren.

Den Batterien nachgeschaltet sind Spannungsregler, um den stabilen 3,3V- und 5V-Spannungspegel zu erzeugen. Weil die Abfallspannung zwischen 5V und Ausgangsspannung der Batterien um 1V beträgt, standartisierte Spannungsregler aber große Abfallspannung benötigen (z.B. L7805), sind diese hier nicht anwendbar. Für den 5V-Spannungspegel wurde LM2937 eingesetzt. Dieser von „National Semiconductor“ produzierte LDO (low dropout regulator) erlaubt mindestens 500mV Spannungsabfall und kann bis 400mA Ausgangsströme liefern. Als Gehäuse kann die TO-220, TO-263 oder SOT-223 Variante gewählt werden. Unter Berücksichtigung der Größe und Wärmeableitung wurde das SOT-223 Gehäuse gewählt.

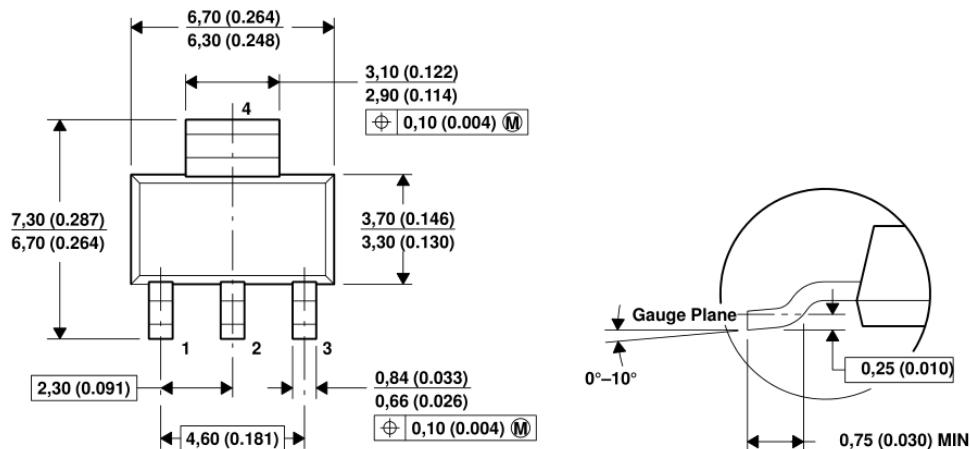


Abbildung 7.1: Dimension des Spannungsreglers LM2937 im SOT-223 Gehäuse [21]

Diese Gehäusedimensionen sind wichtig für die Herstellung der Gehäuse-Datei in „Eagle“. Diese muss genau beachtet werden, da ansonsten Abweichungen im nachfolgenden Lötprozess auftreten.

Um den Spannungspegel von 3,3V zu erhalten, wurde der Spannungsregler TLV1117 verwendet. Dieser von „Texas Instruments“ produzierte LDO (low dropout regulator) erlaubt mindestens 1V Spannungsabfall und kann bis 800mA Ausgangsströme liefern. Als Gehäuse wurde ebenfalls das SOT-223 Gehäuse wie bereits beim LM2937 ausgewählt.

Zwischen den Batterien, dem LM2937 und dem TLV1117 müssen

Bulk-Kondensatoren und Bypass-Kondensatoren vorgesehen werden, um Störungen zu minimieren.

7.1.2 Leiterplatten-Schematic entwerfen

Nachdem alle für das System benötigten Komponenten bestimmt wurden, kann das Schematic und das dazu entsprechende Layout begonnen werden. Die Entwurfsarbeiten wurden mittels der professionellen PCB Design Software „Eagle“ durchgeführt.

Die Aufgabe beim Entwurf des Schematic ist es, alle benötigten Komponenten aus der Datenbank (Library) auszuwählen und sie in einem Netz richtig miteinander zu verbinden. Obwohl „Eagle“ bereits eine umfangreiche Datenbank (Library) besitzt, enthält sie leider nicht alle benötigten Bauteile des Systems. Die Symbol-Datei und die entsprechende Gehäuse-Datei von XBee kann man vom Eagle-OpenSourceForum herunterladen. Die Symbole- und Gehäuse-Datei für den LM2937, MLX90308 und TO8-Sockel des Drucksensors muss man selbst im Komponent-Editor herstellen. Zu beachten ist, dass Pins im Symbol und Pads der Gehäuse übereinstimmen müssen. Die Dimensionen der Gehäuse müssen präzis nach dem jeweiligen Datenblatt der Komponenten erzeugt werden. Die Symboldatei und Gehäusedatei der Komponenten werden im Anhang D gezeigt.

Abbildung 7.2 stellt das fertige Schmatic des Systems dar. Wie in der Abbildung gezeigt, außer den erwähnten Komponenten stehen noch drei Pin-Raster, die die wichtige Signale (z.B. die Ausgangssignale des Sensors und die kompensierten Signale herausführen. Mit Standard 100mil (2,54mm) Abständen liegen die Pins. Damit ist das System später einfach testbar. In der zweiten Version der Leiterplatte werden die Pin-Raster beseitigt, um den Boardplatz zu sparen und Verdrahtung zu vereinfachen.

Bei den Differenzeingängen Pin-VBP und Pin-VBN des MLX90308 wurden zwei $0,1\mu F$ Bypass-Kondensatoren eingefügt, um die Hochfrequenz-Störungen zu

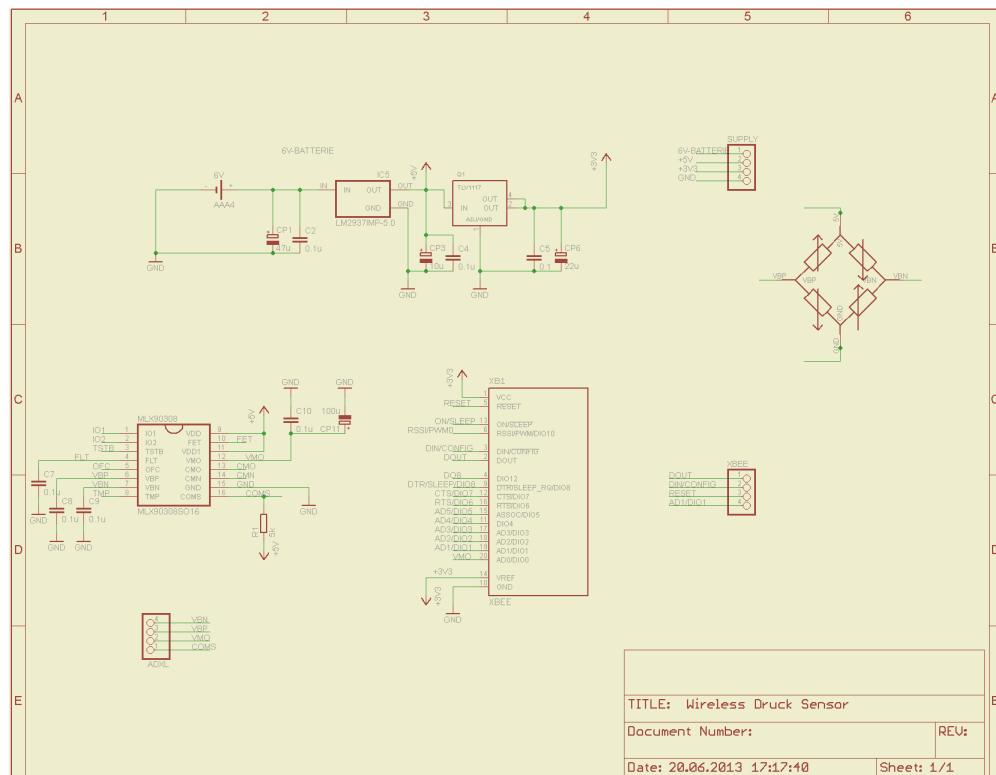


Abbildung 7.2: Schematic des drahtlosen Drucksensorsystems

unterdrücken. Außerdem wurde ein $47\mu F$ Bulk-Kondensator zwischen Pin-VMO des MLX90308 und Pin-AD0 des XBee eingefügt. Obwohl sich dies auf die Geschwindigkeit der Reaktionzeit ein wenig auswirkt, kann der AD-Wandler in XBee damit stabiler arbeiten.

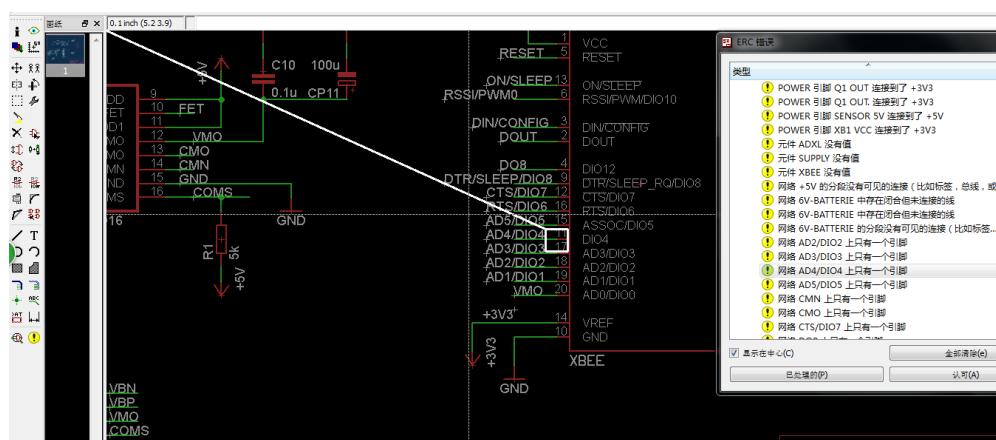


Abbildung 7.3: Warnungen zu prüfen beim ERC der Schematic

Alle im System verwendeten polarisierte Kondensatoren, unpolarisierte

Kondensatoren und Widerstände sind im SMD-Gehäuse (Surface-mounted device). Im Vergleich zu Komponenten der Durchsteckmontage können sie viel Platz sparen.

Am Ende der Erstellung der Schematic-Datei muss ERC (Electrical Rule Check) durchgeführt werden. Dabei gibt es viele Warnungen, die geprüft werden müssen. Die meisten Warnungen beeinflussen das Ergebnis nicht und kann vernachlässigt werden, z.B. „Bauteil hat keinen Wert“. Andere hingegen müssen korrigiert werden.

7.1.3 Layoutentwurf der Leiterplatte

Vor der Erstellung des Layout sind die „Design Rules“ zu prüfen. In den „Design Rules“ werden alle Begrenzungsparameter definiert, welche auf dem Layout eingehalten werden müssen, z.B. der kleinste zulässige Abstand zwischen Draht, Via und Pads. Sie werden von der Fertigungstechnik der zuständigen PCB-Hersteller festgelegt. Nach der Beratung im Labor an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, wo die Leiterplatten gefertigt worden sind, wurden nur die Mindestbreite der Drähte von 10 mil nach 8 mil und der Mindestdurchmesser der Durchlöcher von 24 mil nach 16 mil vorgeschrieben und geändert, während die anderen Begrenzungsparameter „default“ blieben.

Der Entwurf des Layout gliedert sich in zwei Ablaufschritten in die Platzierung und die Verdrahtung.

Die Platzierung der Komponenten soll modular durchgeführt werden. Die Komponenten, die zu demselben Modul gehören, sollen möglichst dicht bei einander liegen. Das ist günstig für die danach folgende Verdrahtung. Die hochfrequenten Komponenten (z.B. XBee) und die niederfrequenten Komponenten (z.B. Drucksensor) sollen weit entfernt platziert werden, um gekoppelte Störungen zu unterdrücken. Jeder Bypass-Kondensator soll ganz in der Nähe von dem ihm zu gehörigem Chip platziert werden, um die hochfrequenten Störungen besser zu filtern. Die Bulk-Kondensatoren können am Verbindungspunkt verschiedener Chips liegen.

Abbildung 7.4 zeigt die Platine nach der Platzierung der Komponenten. Die

Boardgröße ist hier mit $54,5\text{mm} \times 68,6\text{mm}$ bestimmt worden.

Nach der Platzierung sind die Komponenten zu verbinden. Die Verdrahtung hat eine direkte Auswirkung auf die Qualität der Signalübertragung.

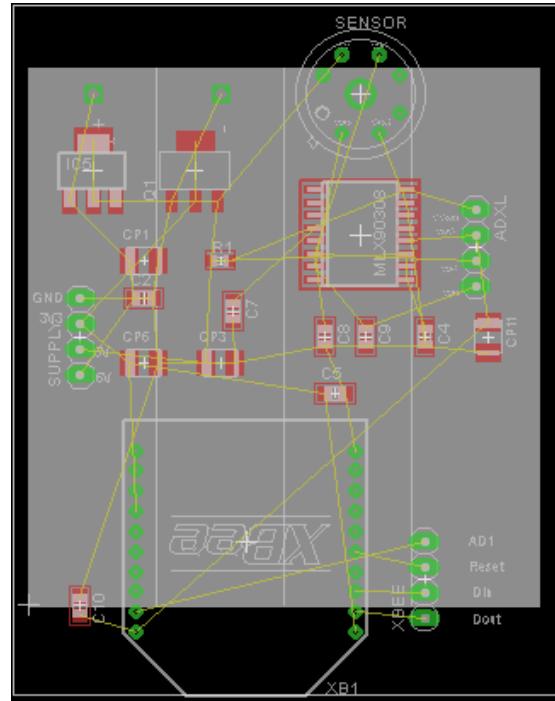


Abbildung 7.4: Platine mit platzierten Komponenten

Weil die Platine beidseitig ist, können die Schaltungen auf der Vorder- und Rückseite verdrahtet werden. Durch Bohrungen werden sie verbunden. Die Leitungen auf der Vorder- und Rückseite sollen sich möglichst kreuzen und nicht parallel zu einander liegen, um gekoppelte Störungen zu unterdrücken.

Dabei gilt es außerdem rechtwinklige Verdrahtung zu vermeiden, weil die rechteckige Form EMI (Electromagnetic Interference) erzeugen kann. Darüber hinaus ist die rechtwinklige Schaltung äquivalent zur kapazitiven Belastung an der Übertragungsleitung und kann damit die Anstiegszeit der Signale verlangsamen.

Da die Ausgangssignale des Drucksensors in differentieller Form sind, sollen die beiden Signalleitungen bis zum MLX90308 möglichst mit gleichen Abständen parallel liegen. Damit erhöht sich die CMRR (Common Mode Rejection Ratio).

Die Breite der Leitungen bestimmt ihre Fähigkeit der Strombelastbarkeit. Abbildung

7.5 erläutert, mit wieviel Strom eine Leitung theoretisch belastet werden kann, in Abhängigkeit von der Leitungsbreite, Temperatur und Kupferdicke. Es ist ein Referenzstandard für die Einstellung der Leitungsbreite. Aber praktisch müssen die GND-Leitungen und Power-Leitungen breiter als die theoretische Daten eingestellt werden, indem der Widerstand der Leitungen verringert werden kann. Damit vermeiden sich starke Schwankungen auf den GND-Leitungen und Power-Leitungen. Ebenso müssen die wichtigen Signalleitungen breiter erzeugt werden.

Trace Carrying Capacity per mil std 275									
Temp Rise	10C			20C			30C		
Copper	1/2 oz.	1 oz.	2 oz.	1/2 oz.	1 oz.	2 oz.	1/2 oz.	1 oz.	2 oz.
Trace Width	Maximum Current Amps								
0.010	0.5	1	1.4	0.6	1.2	1.6	0.7	1.5	2.2
0.015	0.7	1.2	1.6	0.8	1.3	2.4	1	1.6	3
0.020	0.7	1.3	2.1	1	1.7	3	1.2	2.4	3.6
0.025	0.9	1.7	2.5	1.2	2.2	3.3	1.5	2.8	4
0.030	1.1	1.9	3	1.4	2.5	4	1.7	3.2	5
0.050	1.5	2.6	4	2	3.6	6	2.6	4.4	7.3
0.075	2	3.5	5.7	2.8	4.5	7.8	3.5	6	10
0.100	2.6	4.2	6.9	3.5	6	9.9	4.3	7.5	12.5
0.200	4.2	7	11.5	6	10	11	7.5	13	20.5

Abbildung 7.5: Beziehung zwischen Leitungsbreite, Temperatur, Kupferdicke und Strombelastbarkeit der Leitung

Die analoge-Masse beim Drucksensor und digitale-Masse beim ASIC sollen getrennt verdrahtet und an einem einzelnen Punkt verbunden werden.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Rückverbindung der Power-Leitung und GND-Leitung möglichst weniger Boardplatz bedecken soll. Je weniger der Boardplatz bedeckt wird, umso weniger Störungen werden dabei eingekoppelt.

Am Ende ist der DRC (Design-Rules-Check) nach den vorher definierten „Design Rules“ durchzuführen. Nachdem alle Fehler und Warnungen korrigiert worden sind, ist das Layout vorbereitet für die Herstellung der Leiterplatte. Abbildung 7.6 zeigt das fertige Layout.

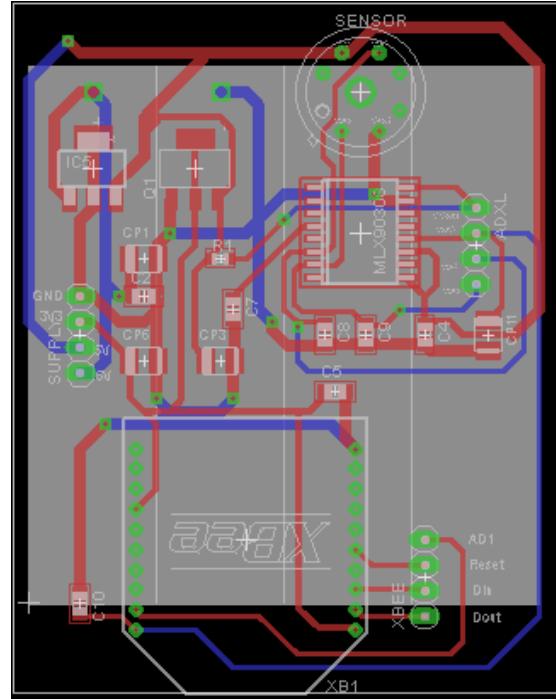


Abbildung 7.6: Komplettiertes Layout des drahtlosen Drucksensorsystems

7.2 Herstellung der Leiterplatte

Die Fertigung der Leiterplatte wurde im Mikrosystem-Labor in Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin umgesetzt, wo alle Fertigungsanlagen zur Leiterplatte zur Verfügung stehen.

Insgesamt wurden zwei Versionen Leiterplatte nacheinander hergestellt. Der Prototyp mit Testpins ist eine beidseitige Leiterplatte ohne Lötstopmaske. Nachdem das Testergebnis verifiziert war, wurde die zweite Version der Leiterplatte entworfen und hergestellt. Diese wurde einseitig und ohne Testpins realisiert.

7.2.1 Herstellung des Prototyps

Vorbereitung der Fertigungsunterlagen

Der Verfahrensabschnitt ist zur Bilderzeugung im Gerber- oder HPGL-Format nötig, die für die Fertigung der Leiterplatte notwendig ist. Es muss folgende Daten enthalten

sein:

1. Die Leiterbildzeichnung der Vorderseite & Rückseite
2. Ausdruck des Bohrbildes, eine Bohrdatei und eine Werkzeugdatei
3. Silk-Screen-Maske der Komponenten-Seite, nämlich der Vorderseite
4. Lötstop-Maske der Vorderseite & Rückseite

Diese Dateien wurden mittels CAM-Prozessor in Eagle erzeugt. Wie Abbildung 7.7 zeigt, die Dateien wurden in Form von GERBER_RS274X ausgegeben.

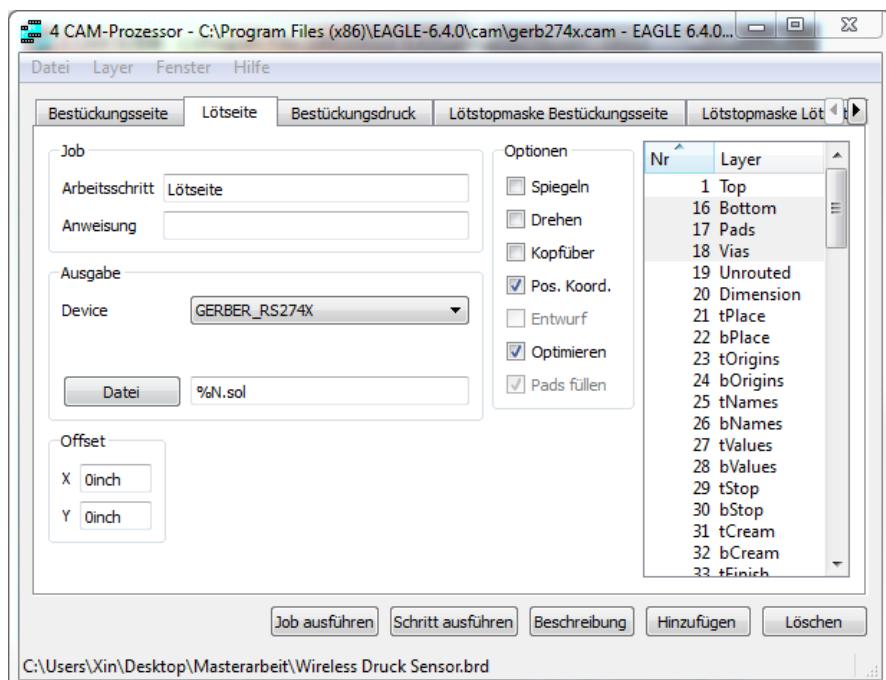


Abbildung 7.7: Erzeugung der Dateien im CAM-Prozessor für die Herstellung der Leiterplatte

Danach wurden die Masken-Dateien mittels Editierprogramm (CAM350) endgültig geprüft und korrigiert. Dabei wurde die Größe der VIAs wegen der erreichbaren Fertigungstechnik verkleinert. Außerdem wurde der Abstand am Platinerand, für die anschließende Verarbeitung, etwas vergrößert. Der restliche Randabstand kann später nach der Fertigung ausgeschnitten werden.

Die Vorderseite und Rückseite der Maske wurden auf dem Lithographiefilm zusammengefasst und verdoppelt. Die zusätzlich hergestellte Leiterplatte ist als der

Ersatzteil und es dauert in aller Schritten keine mehr Zeit.

Mechanische Bearbeitung

Der Verfahrensabschnitt lässt sich in Zuschneiden und Bohren unterteilen. Zuerst wurde das beidseitig kupferkaschierte Basismaterial in die gewünschten Maße geschnitten.

Im Labor der HTW Berlin stehen zwei Standard-Basismaterialen zur Verfügung:

- 1,5mm FR4 (Glasgewebe verklebt mit Epoxidharz) + $18 \mu\text{m}$ Cu beiderseitig
- 1,5mm FR4 (Glasgewebe verklebt mit Epoxidharz) + $35 \mu\text{m}$ Cu beiderseitig

Wegen der besseren Strombelastbarkeit ist das zweite Basismaterial zu verwenden.

Mit Hilfe der Bohrdateien und dem Bohrbild wurden die VIAs in die Rohplatine gebohrt. Bohrer in verschiedener Größe wurden zuvor in der Bohrdatei definiert und werden nun von der Bohrmaschine automatisch ausgewählt und genutzt.

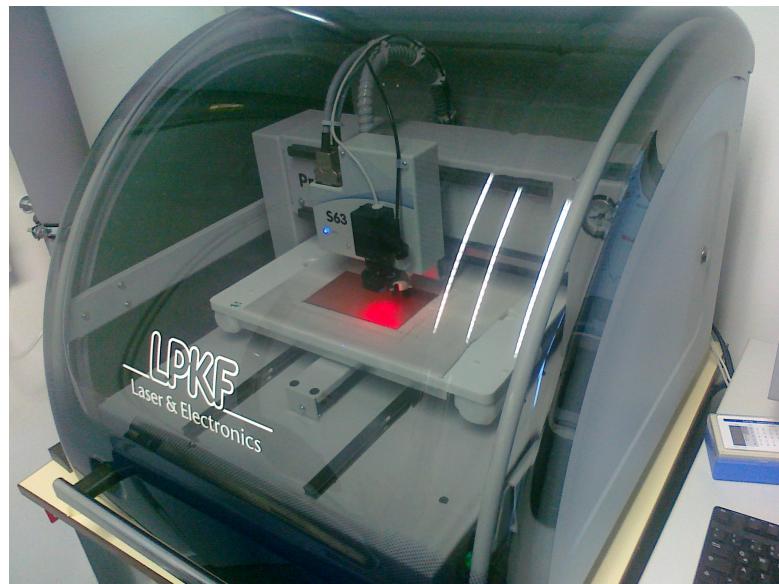


Abbildung 7.8: aktive Leitplattenbohrmaschine

Mittels Druckluft wurde der Bohrstaub aus den Bohrlöchern und von der Oberfläche entfernt. Abbildung 7.9 zeigt das Basismaterial nach der Bohrung.

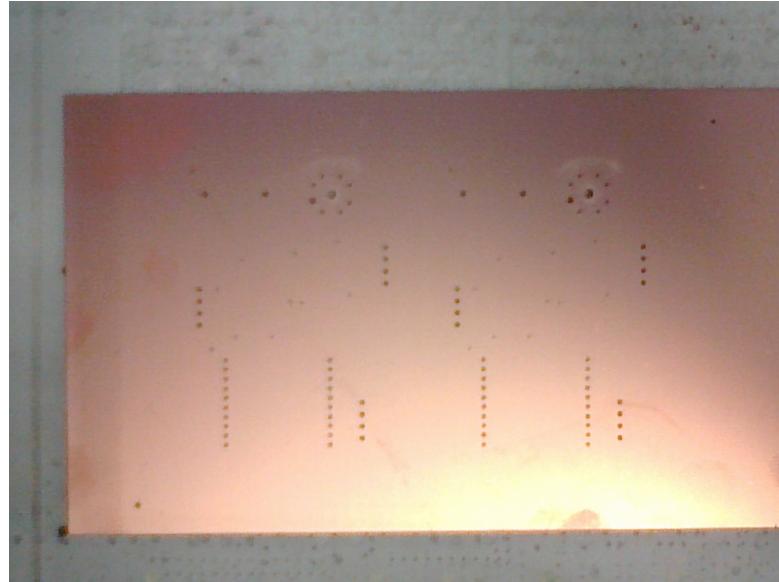


Abbildung 7.9: gebohrte kupferkaschierte Rohplatine

Durchkontakteieren mit Ganzflächenverkupferung

Ziel dieses Verfahrensabschnittes ist es, eine Kupferschicht zur elektrischen Verbindung der oberen und unteren Kupferkaschierung auf den Lochwänden aufzubringen. Da hierdurch die später zuätzenden Kupferflächen unnötigerweise verstärkt werden, wird die Lochwandmetallisierung bei diesem ersten Durchkontakteierungsschnitt nur um $10 \mu\text{m}$ aufgebaut.

Vor der Verkupferung muss die Platine noch maschinell in eine nassarbeitende Bürstmaschine. Hier werden durch gegenläufiges Überkreuzbürsten Aufrauungen der Oberfläche realisiert. Diese nun schwache aufgerauhte Oberfläche ist für die nachfolgende Kupfer-Abscheidung ein guter Haftgrund.

Folgend sind die Sub-Schritte aufgeführt, die nasschemisch oder galvanisch in einer Bädergruppe (Abbildung 7.10) durchgeführt werden. Da diese nicht Schwerpunkt der Arbeit sind, werden sie der Vollständigkeit halber nur aufgezählt.

- Beizen in APS(Ammonium Peroxodi Sulfat)
- Kaltwasser-Fließspülen
- Dekapieren in H_2SO_4

- Kaltwasser-Fließspülen
 - Voraktivieren in HCl
 - Aktivieren in kolloidaler Pd-Lösung
 - Kaltwasser Spar- und Fließspülen
 - Beschleunigen in HCl
 - Kaltwasser-Fließspülen
 - Dekapieren in H_2SO_4
 - Galvanische Ganzflächenverkupferung($10\mu m$)
 - Kaltwasser-Fließspülen
 - Trocknen



Abbildung 7.10: Bädergruppe für die nasschemische und galvanische Bearbeitung der Leiterplatte

Plattiermaskenauflage und Belichten

Dieser Verfahrensabschnitt ist nötig, um den Galvanoresist auf den Oberflächen der Platine aufzubringen. Die nicht beschichtete Kupferbereiche werden später verkupfert und verzinnt.

Es gibt folgende Subschritte in diesem Verfahrensabschritt.

- Reinigen und Aufrauhen
- Mattieren
- Kaltwasser Fließspülen
- Trocknen und Vorwärmung
- Resistauftrag (Laminieren)
- Lithographiefilm vorbereiten
- Lithographiefilm justieren
- Belichten
- Entwickeln
- Kaltwasser Spülen
- Trocknen

Ähnlich wie die Strukturierung des Fotolacks über einen fotolithographischen Prozess in Wafellevel-Bearbeitung wird hierbei eine UV-strahlungsempfindliche Polymerschicht, durch lokale fotochemische Veränderung in seiner Löslichkeit, in bestimmten Lösungsmitteln strukturiert. Ein fotolithographischer Film reicht für die angestrebten Herstellungsdimensionen aus. Außerdem ist die Herstellung eines solchen Films einfacher und billiger als die Herstellung einer kostenintensiven Glasmaske.

Wie Abbildung 7.11 zeigt, wurde der Film im Rasterfotoplotter in einem staubarmen, klimatisierten Raum auf Grundlage des Leiterbildlayouts geplottet.

Die Filmentwicklung ähnelt hierbei sehr stark der standard Fotoentwicklung und



Abbildung 7.11: Rasterfotoplotter im Dunkelkammerlabor

umfasst folgende 4 Schritte:

- Tauchen in temperierter Entwicklerlösung
- Spülen in Stoplösung (2% Essigsäure)
- Tauchen in Fixerlösung
- Wässern und Trocknen

Hier ist zu beachten, dass das Leiterbildlayout sich durch Tauchen in eine spezielle Lösung vollständig oder partiell aufhellen lässt (Braunfärbung). Diese aufgehellten brauen Bildelemente sind weiterhin UV-undurchlässig, jedoch für das Auge durchsichtig. Die behandelten Fotovorlagen sind so visuell optimiert, um die anschließende Justierung des Layouts vornehmen zu können.

Der Film wurde manuell mit Hilfe der Lupe justiert. Dabei müssen die durchsichtigen brauen Bildelemente mit den Bohren in der Leiterplatte übereinstimmen.

Nach beidseitiger UV-Bestrahlung im Belichtungsgerät, wurde die Leiterplatte zur Nachpolymerisation 5 Minuten in einer abgedunkelten Ablage aufbewahrt. Dann

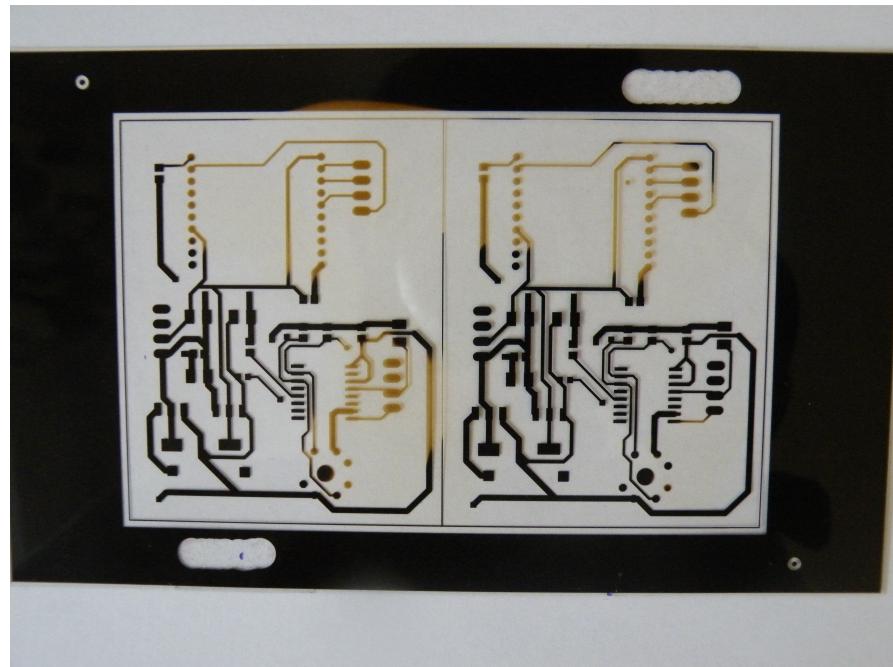


Abbildung 7.12: Vorderseite des fotolithographischen Films

wurde die nicht belichteten Resistflächen von der Kupferoberfläche durch Entwickeln entfernt. Dadurch wird der in Abbildung 7.13. zu erkennende blaue Galvanoresist kreiert.

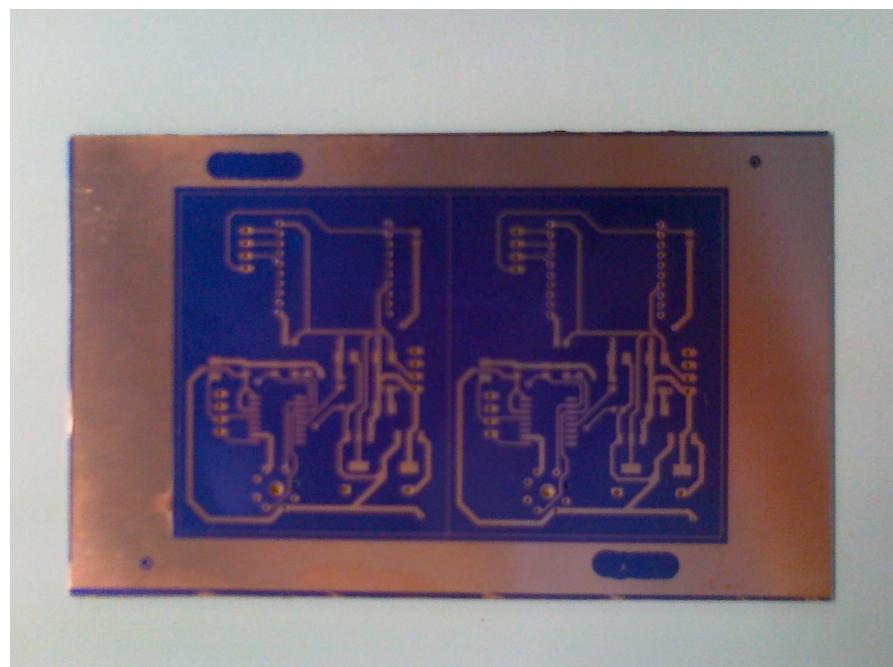


Abbildung 7.13: Galvanoresist der Vorderseite

zweite galvanische Verkupferung

Dieser Verfahrensabschnitt ist nötig, um die Lochwandmetallisierung auf circa $25 \mu m$ zu verstärken. Die Sub-Schritte in diesem Verfahrensabschnitt sind ähnlich wie in der ersten galvanischen Durchkontaktierung und sind folgend gezeigt.

- Beizenfetten
- Kaltwasser-Fließspülen
- Beizen in APS
- Kaltwasser Fließspülen
- Dekapieren in H_2SO_4
- zweite galvanische Verkupferung
- Kaltwasser Fließspülen

Obwohl die diesmal verkupferte Schicht dicker als die erste Verkupferung ist, ist der Strom bei der elektrogalvanischen Abscheidung kleiner. Zusätzlich wurde die Abscheidungszeit, im Gegensatz zur vorherigen Verkupferung, ebenfalls reduziert. Dies geschah, weil die zu verkupfernden Leiterbildbereiche viel kleiner waren, als die in der ersten Verkupferung.

Verzinnen

Auf den freiliegenden Kupferflächen wurde eine $10\mu m$ Sn-Schicht galvanisch abgeschieden. Diese Zinnschicht dient beim Ätzvorgang zum Schutz der darunterliegenden Kupferflächen. Vor dem Verzinnen fehlt nicht dem Dekapieren in der verdünnten H_2SO_4 .

Strippen und Ätzen

Nachdem Verzinnen wurde die nicht mehr benötigte Galvanoresistmaske mit einer 5%tige KOH-Lösung entfernt, siehe Abbildung 7.14.

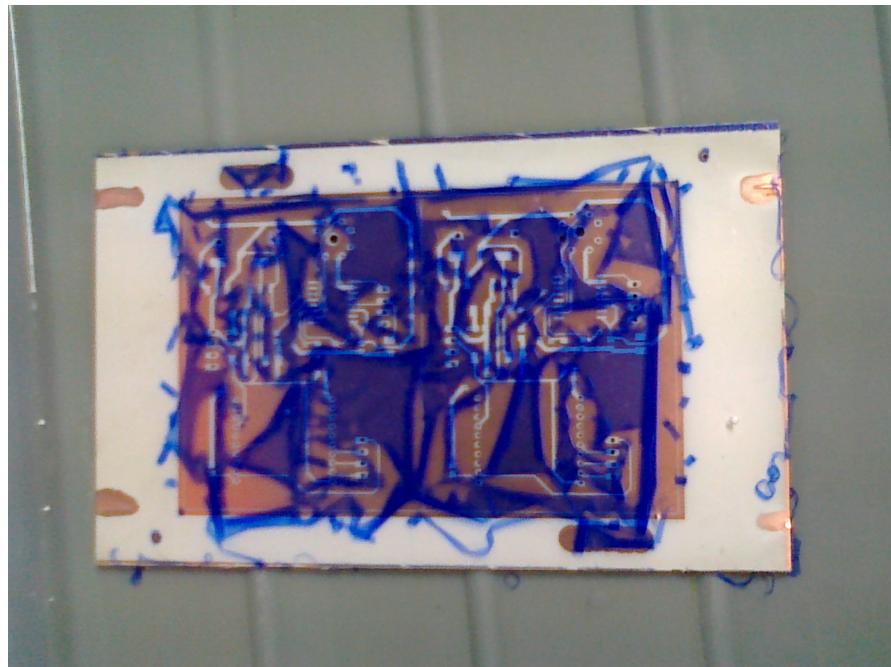


Abbildung 7.14: Entfernen des Resistes mittels KOH-Lösung (Strippen)

Nach Trocknen in der Trockenmaschine wurden die nicht verzinnten Kupferfläche in der ammoniakalischen Kupferchlorid-Lösung geätzt. Der Ätzprozess wurde in einer geschlossenen Ätzmaschine durchgeführt.

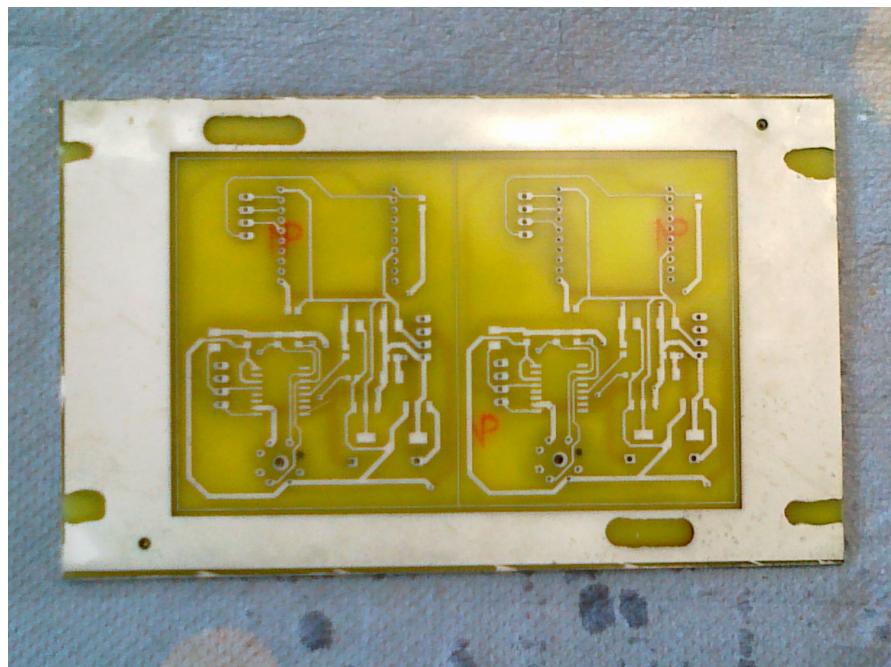


Abbildung 7.15: Leiterplatte nach Ätzen der nicht verzinnten Kupferflächen

Wie Abbildung 7.15 zeigt, wurde die Leiterbildstruktur nach dem Ätzen der freiliegenden Kupferflächen erstellt.

Zinn entfernen und Leiterplatte schneiden

Nach Reinigung der Leiterplatte von der Ätzlösung folgte die Entfernung der Ätzschutzmaske (Zinn) mittels Strip-Lösung. Die Schaltung lag nun in Form des reinen Kupferleiterbildes vor, wie in Abbildung 7.16 gezeigt. Dann wurde die Platine in definierte Maße geschnitten. Die für die Verarbeitung vorbehaltenen Abstände am Platinerand wurden hier ausgeschnitten.

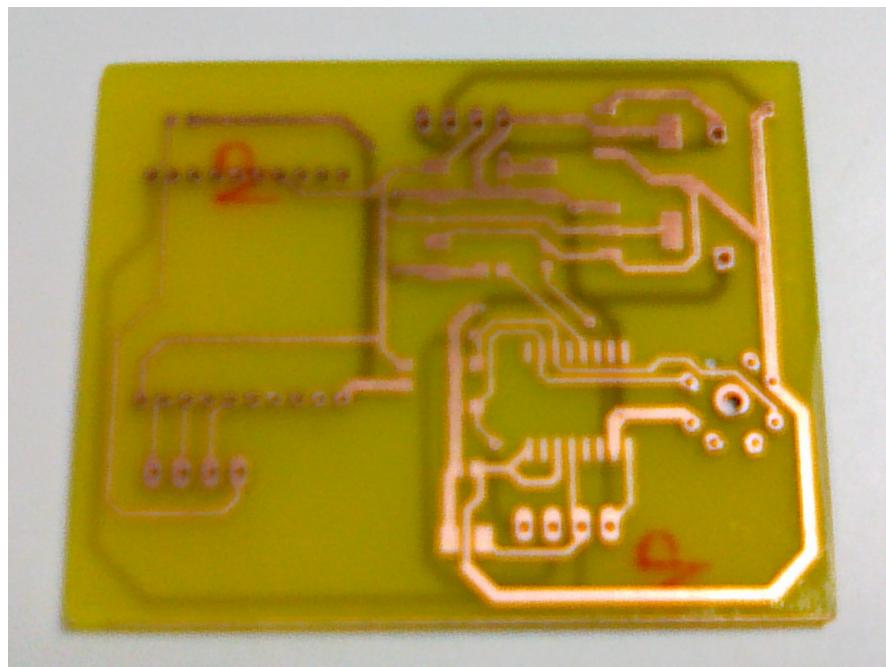


Abbildung 7.16: Platine nach Zinn-Entfernung

Bestückung mit SMD-Elemente und Reflowlöten

Mit Hilfe der Funktion „File-Export-Partlist.“ von „Eagle“ kann genau aufgelistet werden, wie viele Bauelemente von welchem Gehäuse zu löten sind. In diesem System werden hauptsächlich SMD-Bauelemente (Surface-Mounted-Device) eingesetzt, die im Vergleich zu THT-Bauteile (Through-Hole-Technology) eine

extreme Platz und bessere elektrische Eigenschaften bei höheren Frequenzen erzielen. Nach Vorbereitung aller SMD-Bauelemente, wurde zuerst die Lötpaste, mittels Druckluft-Dispenser, auf allen zu lötenden SMD-Pads aufgebracht. Dann wurden die SMD-Bauelemente mit einer Vakuumpinzette entsprechend auf die Lotpaste gesetzt. Die Leiterplatte, zusammen mit den bestückten Elementen, wurden anschließend in der Dampfphasenlötanlage gelötet. Dort wurde sie auf 240 Grad erhitzt.

THT-Bauteile konventionell bestücken und manuell löten

Außer den SMD-Bauteilen sind noch einige THT-Bauteile manuell zu löten. Diese sind unter anderem Testpins, Batteriehalter und der XBee-Chip.

Für den XBee-Chip wurden zuerst Buchsen gelötet, dadurch kann der Chip später variabel oft gesteckt oder entnommen werden. Das erleichtert die Parameteränderung und ermöglicht die wiederholte Verwendung des XBee-Chips. Hierbei ist zu beachten, dass die Buchsenleisten nicht den standardmäßigen 2,54mm Pin-Abstand besitzen, sondern einen Pin-Abstand von 2mm.

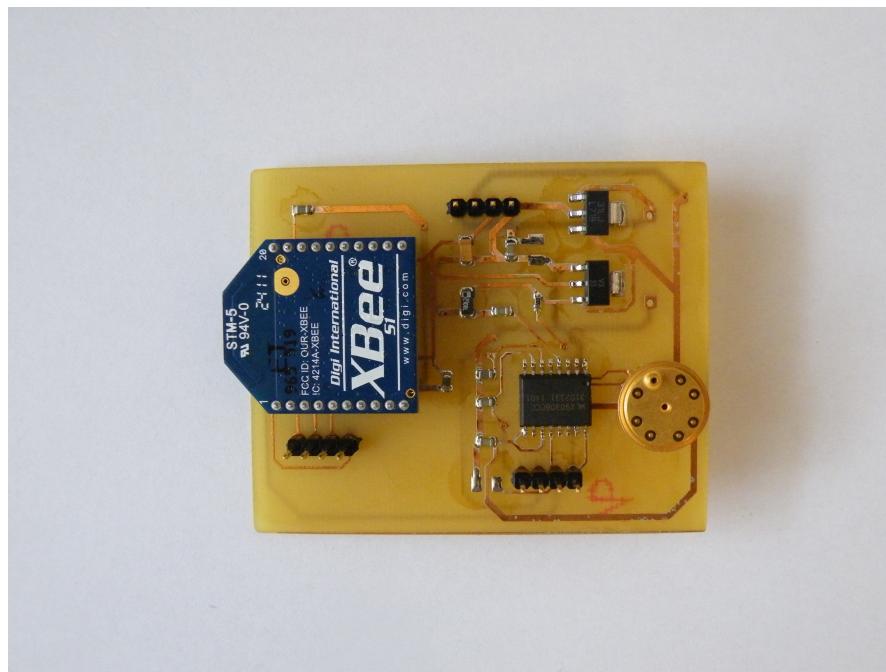


Abbildung 7.17: Testbereiter Prototyp der Leiterplatte

Wie in Abbildung 7.17 gezeigt, ist der Prototyp der Leiterplatte nach der Lötarbeit

fertig zum Testen.

elektronischer Test

Beim Prototyp der Leiterplatte gibt es viele Punkte zu überprüfen. Zuerst ist zu prüfen, ob zwei in Serie geschaltete 3V-Knopfbatterien genügend Strom für das ganze System liefern können. Falls das zutrifft, kann mittels Einsatz von Knopfzellenbatterien mehr Boardplatz in der nächsten Version der Leiterplatte gespart werden. Laut Datenblatt ist der typische Betriebsstrom von XBee beim Senden 45mA. Zusammen mit dem Betriebstrom 5mA von MLX90308, ungefähr 2mA Querstrom vom Drucksensor, bis zu 1mA von den zwei LTOs und Peripherieschaltungen kann der gesamte Arbeitsstrom des Systems ungefähr 53mA erreichen. So einen großen Strom können 2 Knopfzellenbatterien in der Regel nicht liefern. Beim Testen ist diese Vermutung bestätigt worden. Die 6V Versorgungsspannung aus den Batterien war beim Betrieb auf 3,2V gefallen. Die Ausgangsspannung vom LM2937, welche 5V sein sollte, war auf 2,6V reduziert. Die Ausgangsspannung vom TLV1117, die 3,3V sein sollte, war auf 1,7V gefallen. Das ganze System arbeitet unter diesen Umständen nicht im Arbeitsbereich. Statt der Knopfzellenbatterien wurden dann 4 in Serie geschaltete AAA-Batterien eingesetzt. Alle Bauteile erhielten mit diesem Aufbau die gewünschte Versorgung. Es gab nur 2mV bis 5 mV Differenz zwischen der Versorgungsspannungen und den gewünschten Werten, die jedoch im zulässigen Bereich liegt.

Folgende wichtige Zwischensignale mussten nun gemessen werden, z.B. VBP-Pin, VBN-Pin vom MLX90308 und AD0-Pin vom XBee. Die Messungen wurden in demselben Klimaschrank wie bei der Charakterisierung des Drucksensors durchgeführt. Die Messergebnisse waren in den erwarteten Bereichen und werden im Kapitel 7.3 genau beschrieben.

7.2.2 Herstellung der zweiten Version

Der erfolgreiche Betrieb des Prototyps kreiert ein solides Fundament für die zweite Version der Leiterplatte. Wegen der Beseitigung der nun unnötigen Testpins wurde die zweite Version vereinfacht, daher war eine einseitige Verdrahtung möglich. Weil die einseitige Platine keine galvanische Durchkontaktierung braucht, konnte der ganze Herstellungsprozess viel schneller durchgeführt werden. Aber dafür dauert die Layoutverdrahtung ohne Durchkontakte längere.

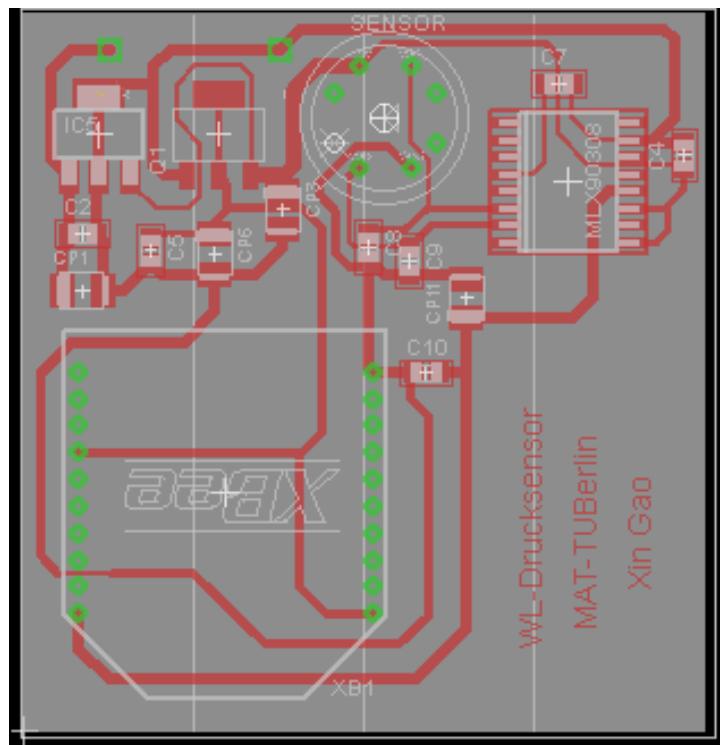


Abbildung 7.18: Layout der 2ten Version der Leiterplatte

Der Entwurfsprozess vom Layout ist ähnlich wie beim Prototyp und wird hier nicht wiederholt. Das fertige Layout der Leiterplatte wird in Abbildung 7.18 gezeigt. Die große weiße quadratische Fläche in der Abbildung ist der Batteriehalter. Der Batteriehalter wird später auf der Rückseite der Platine gelötet und begrenzt zum großen Teil die Dimension der Leiterplatte.

Noch ein großer Unterschied zu dem Prototyp ist, dass die Lötstopmaske bei der zweiten Version hinzugeführt wurde. Die Lötstopmaske ist eine strukturierte

organische Resistorschicht. Sie deckt die für die Bauelementekontaktierung nicht benötigten Oberflächen mit einer Schutzschicht ab. Ähnlich wie der Plattiermaskenauftrag, wird diese auch durch einen fotolithografischen Prozess realisiert. Die dazu benötigte Masken-Datei wurde ebenfalls mittels CAM-Prozessor erzeugt.

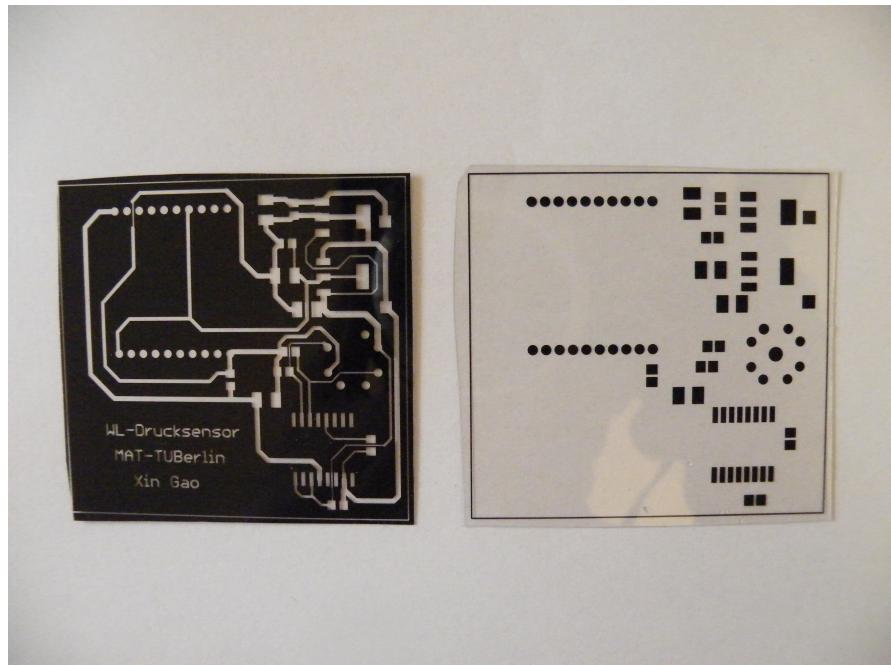


Abbildung 7.19: Lithographisches Filme für die Galvanoresistmaske (links) und Lötstopmaske (rechts)

Weil die Durchkontaktierung und zweite Verkupferung hier nicht gebraucht werden, ist der Verfahrensabschnitt „Verzinnen“ hier überflüssig. Die Polymerschicht dient direkt als Galvanoresistmaske. Der Unterschied zwischen den zwei Filmen wird beim Vergleich von Abbildung 7.12 und Abbildung 7.19 deutlich.

Für das Laminieren einer Lötstopfestresistschicht wird idealweise ein Vakuumlaminator verwendet. Weil hier nur ein Heissrollenlaminator zur Verfügung steht, ist die Laminierqualität besonders zu begutachten. Beim ersten Versuch gab es einige Lufteinschlüsse zwischen der Resistenschicht und Leiterplatte. Deshalb musste die Resistenschicht in einer 1%igen, 40°C erwärmteten Na_2CO_3 Lösung entwickelt werden und die Leiterplatte wurde nochmals laminiert.

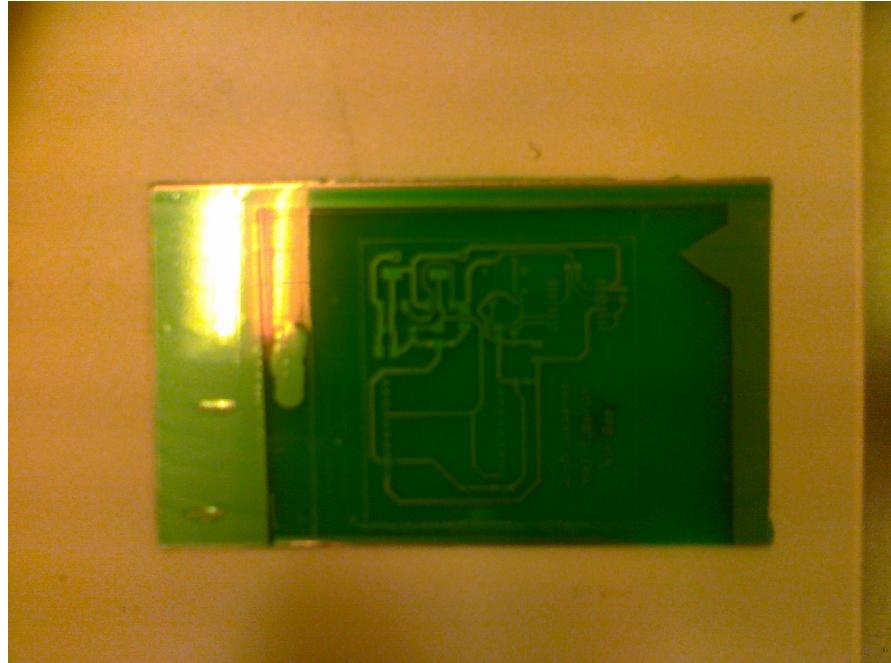


Abbildung 7.20: Laminierte Leiterplatte

Eine festresist-lötstopmaskierte Platine bietet neben einem schöneren Aussehen folgende Vorteile [22]:

- Vermeidung von Lötzackenbildung und Verringerung der Lötverunreinigung beim Reflowlöten.
- Schutz der Platine-Oberfläche gegen Umwelteinflüsse
- Verbesserte elektrische Isolation und definierte dielektrische Verhältnisse an der Oberfläche

Das nachfolgende Bestücken und Löten der Bauteile ist identisch mit der Prototyp-Leiterplatte. Das fertige Produkt des drahtlosen Drucksensorsystems zeigt Abbildung 7.21.

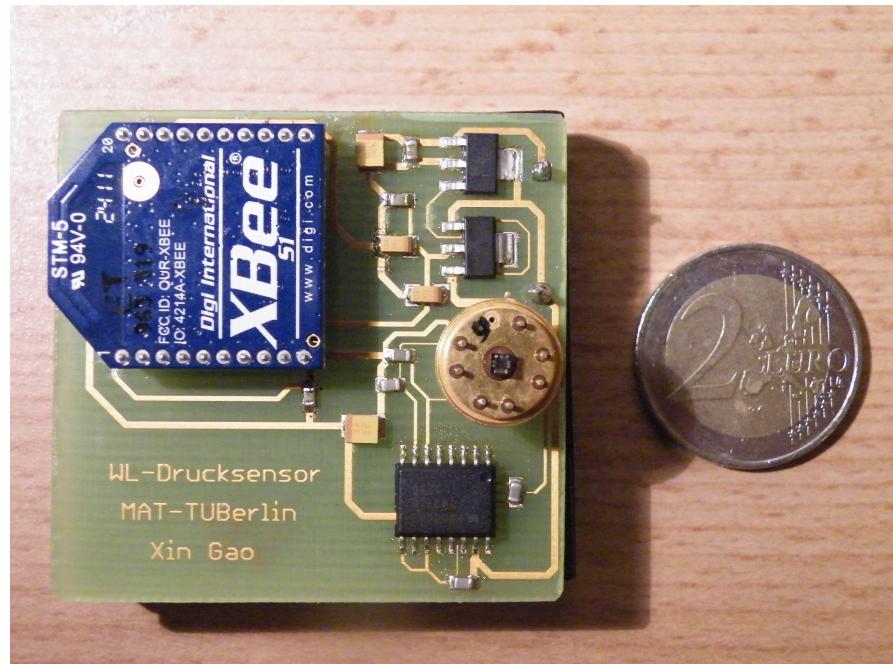


Abbildung 7.21: fertige 2te Version der Leiterplatte

7.3 Testen der Leiterplatte

7.3.1 Lesen, Verarbeitung und Darstellung der empfangenen Daten

Beim Testen der Leiterplatte ist zu beachten, dass die vom XBee-Modul gesendeten Sensorsignale digital in Frame-Format und nicht mehr analog vom Multimeter lesbar sind. Das bedeutet, dass alle vom Sensor gemessenen Druckwerten in HEX-Format im Rahmen enthalten sind. Die genutzte Rahmen-Struktur ist in dieser Aufgabe wie unten gezeigt:

7E 00 12 83 00 00 37 00 05 02 00 02 39 02 39 02 39 02 3A 02 39 16

Die untergestrichenen fünf Gruppen HEX-Daten beschreiben die gemessenen Drucksignale. Jede zwei Bytes formulieren eine 10-bit Datei. Zum Beispiel ist **02 3A** gleich 570 und im Verhältnis zu 1024 (10 bit) entspricht dies 0,56. Weil die Spannungreferenz vom XBee mit 3,3V verbunden ist, ergibt sich mit **02 3A** eine 1,83V-Ausgangsspannung vom MLX90308. Die anderen HEX-Daten lassen sich wie

folgt beschreiben.

- 7E:** Start Delimiter
- 00 12:** Datenlänge
- 83:** API Identifikator Byte für 16bit A/D Daten
- 00 00:** Source-Adresse
- 37:** RSSI Indikator (zeigt die Signalstärke)
- 00:** Option Byte
- 05:** Zahl der gepufferten Daten vor der Sendung
- 02 00:** 00000010 00000000 Kanal Indikator
- 16:** Prüfsumme

Die empfangenen Drucksignale in Frame-Format kann man wie im Kapitel 6.3.1 gezeigt mittels der Software X-CTU lesen. Aber die im Frame eingesetzten HEX-Daten sind schwer zu lesen und aufzunehmen. Deshalb ist es notwendig, eine andere Softwareschnittstelle für Lesen und Transformieren der Daten zu verwenden. Wegen der besseren Datenverarbeitungsfähigkeit wird hier „Matlab“ statt im Drahtlos-Neigungserkennung-System genutzte Software „Processing“ verwendet.

„Matlab“ bietet viele Funktionen für die Unterstützung der Kommunikation durch serielle Schnittstelle (e.g. USB). Als Grundfunktion kann „Matlab“ die Daten aus dem FIFO (first in-first out)-Pufferspeicher der USB-Schnittstelle sequenziell lesen. Es ist einfach für die Programmierung, aber schlecht für die Echtzeit-Signalverarbeitung, weil die serielle Kommunikation damit nicht regelmäßig gesteuert werden kann. Stattdessen wurde der Interrupt-Modus verwendet.

Im Interrupt-Modus kann man das Interrupt-Ereignis „terminator“ oder „byte“ konfigurieren. Im ersten Fall wird der Interrupt beim Einlesen eines bestimmten Byte ausgelöst. Im zweiten Fall wird der Interrupt beim Einlesen der bestimmten Bytezahl ausgelöst. Wegen der besseren Synchronisation für das Anwendungsgebiet in dieser Arbeit, wurde hier „terminator“ als das Interrupt-Ereignis ausgewählt und der Terminator wurde in „7E“ (gleich wie der „Start Delimiter“ im Frame) konfiguriert.

Das heißt wann immer der Terminator „7E“ erschien, wird die USB-Schnittstelle einen Daten-Sequenz einlesen. Gleichzeitig ruft „Matlab“ automatisch die Callback-Funktion auf, diese ist eine Interrupt-Service-Routine für Verarbeitung und Darstellung der eingelesenen Daten.

Die Programmierung für die Konfiguration der serieller Kommunikation und die Callback-Funktion werden in Anhang E und Anhang F beigefügt und hier nicht Schritt für Schritt erklärt.

Abbildung 7.22 zeigt die empfangenen Daten-Sequenzen zusammen mit der transformierten Ausgangsspannung vom Drucksensor. Weil die „Samples Before

```
A BytesAvailable event occurred for Serial-COM4 at 01-Aug-2013 15:07:54.
Rohdaten =7E 0 12 83 0 0 37 0 5 2 0 2 39 2 38 2 39 2 39 2 39 18
Spannung=1.83369 1.83047 1.83369 1.83369 1.83369 Unit:V
Druck=3.02282 3.01745 3.02282 3.02282 3.02282 Unit:Bar
Altitude=180.609 180.129 180.609 180.609 180.609 Unit:m

A BytesAvailable event occurred for Serial-COM4 at 01-Aug-2013 15:07:56.
Rohdaten =7E 0 12 83 0 0 37 0 5 2 0 2 39 2 39 2 39 2 3A 2 39 16
Spannung=1.83369 1.83369 1.83369 1.83691 1.83369 Unit:V
Druck=3.02282 3.02282 3.02282 3.02819 3.02282 Unit:Bar
Altitude=180.609 180.609 180.609 181.088 180.609 Unit:m
```

Abbildung 7.22: Darstellung der Messergebnisse nach Transformation in „Matlab“

Transmission“ in „5“ und die „Sample Rate“ von XBee in „500 ms“ konfiguriert wurden, sendet XBee alle 2,5s einen Daten-Sequenz mit fünf Ausgangssignalen des Drucksensors. Durch die im Kapitel 6.2.3 erwähnte Empfindlichkeit von 0,1212 [V/V · bar] des kompensierten Drucksensors, kann man die Echtzeit-Druckwerte ableiten. Als Erweiterung kann man mit Hilfe der Gleichung 7.1 die Echtzeit-Altitude ermitteln [23].

$$\text{Altitude} = 44330 * \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{5.255}} \right] \quad (7.1)$$

p : Aktueller Druckwert [Unit: bar]

p_0 : Standard-Atmosphäre (1,01325 bar)

Neben dem Darstellung der Messergebnisse wurden die Druckwerte wie in Abbildung

7.23 in Echtzeit graphisch dargestellt. Dazu wurde der Parameter „obj.ValuesSent“ genutzt.

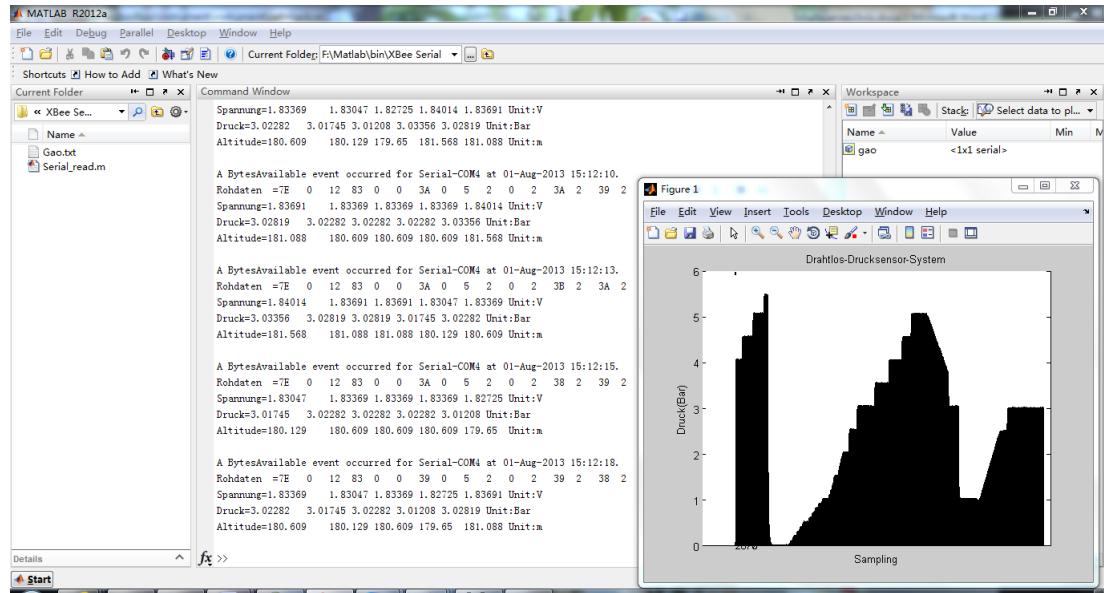


Abbildung 7.23: Messergebnisse und graphischen Darstellung der Druckwerte

7.3.2 Messergebnisse und Auswertung

Die Testumgebung der Leiterplatte ist identisch wie bei der Charakterisierung und Verifikation des Drucksensors und des Kompensationsmoduls im Klimaschrank. Der Unterschied hier ist nun, dass statt einer stationären Spannungsquelle bieten Batterien die Spannungsspeisung für den Drucksensor und Versorgungsspannung für die Chips. Außerdem werden die Ausgangssignale des Systems nicht vom Digitalmultimeter gemessen, sondern direkt auf dem Bildschirm dargestellt. Wie in Tabelle 7.1 und Tabelle 7.1: Ausgangsspannung des Drucksensors nach Verstärkung, Kompensation, A/D Umsetzung und Signalübertragung

	0 bar	0,5 bar	1 bar	1,5 bar	2 bar	2,5 bar	3 bar	3,5 bar	4 bar	4,5 bar	5 bar
0°C	0,01	0,32	0,62	0,93	1,23	1,53	1,83	2,13	2,43	2,73	3,03
25°C	0,01	0,31	0,61	0,92	1,22	1,52	1,82	2,13	2,43	2,73	3,03
50°C	0,01	0,32	0,62	0,91	1,21	1,51	1,81	2,10	2,40	2,70	3,00

Abbildung 7.24 gezeigt, wurden die Messungen jeweils unter 0°C, 25°C und 50°C in

einem Druckbereich von 0 bar bis 5 bar in 0,5 bar-Schritten durchgeführt.

Die Ausgangssignale der Leiterplatte stimmen im Allgemeinen mit den in Block-level Realisierung erhaltenen Ausgangssignalen vom MLX90308 überein. Dabei gibt es Spannungsunterschiede unter 0,02 V, die in einem 3V-Spannungsbereich vernachlässigbar gering sind. Die Kennlinie besitzt wie in der Block-level Realisierung eine konstante $0,1212 \text{ V/V} \cdot \text{bar}$ Empfindlichkeit ohne Nullpunktoffset, TKO und TKS. Das System arbeitet wie gewünscht.

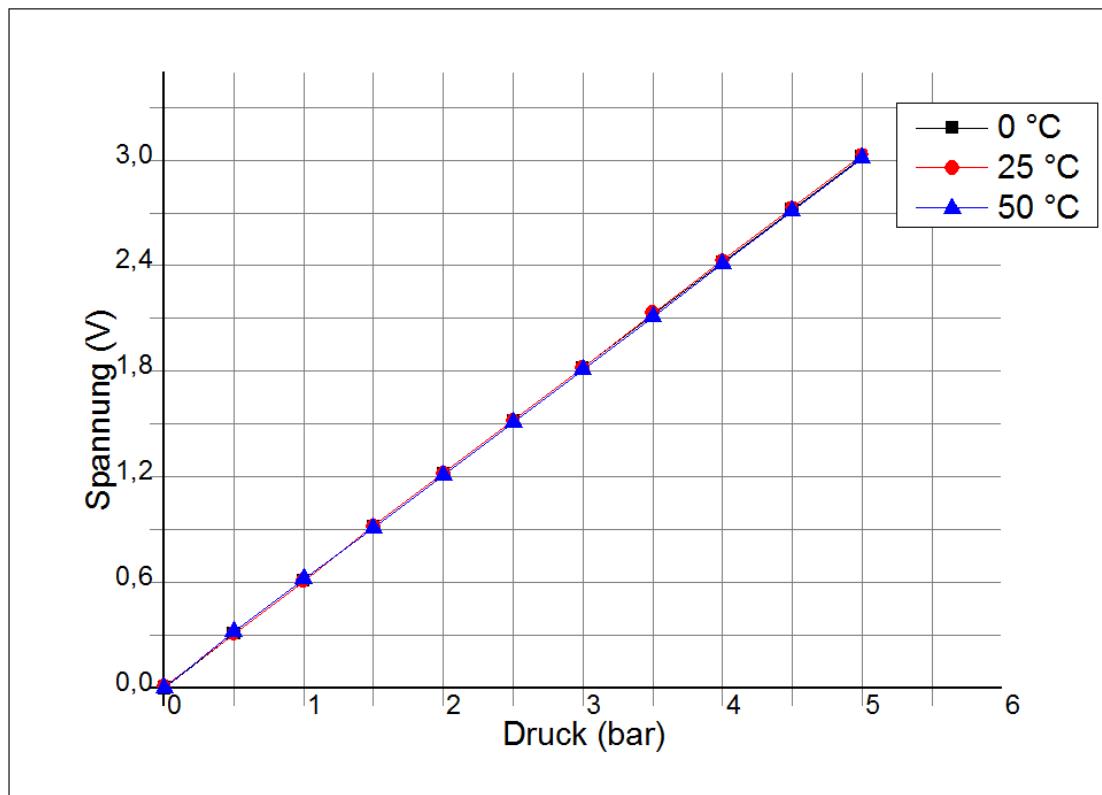


Abbildung 7.24: Ausgangskennlinie des drahtlosen Drucksensorsystems

Die kleinen Spannungsunterschiede der Ergebnisse zwischen Block-level und Board-level sind einerseits aufgrund der Kontaktwiderstände und parasitären Störungen, infolge der vielen Signalleitungen bei der Block-level Realisierung. Andererseits gibt es beim A/D Umsetzer in XBee unvermeidlich Abweichungen. Die Schwankungen auf der GND-Leitung der Leiterplatte können auch durch den Bypass-Kondensator die Referenzspannung von XBee und somit die A/D Umsetzung stören.

Bei der Bewegung des Empfänger-XBee mit dem Laptop wurde die Reichweite des Systems überprüft. Tatsächlich kann der Empfänger-XBee die Signale im Gebäude durch viele geschlossenen Räume bis zu ungefähr 15 m empfangen. Das entspricht der Beschreibung im XBee-Datenblatt.

8 Diskussion und Ausblick

Das drahtlose Drucksensorsystem bietet eine Lösung für die drahtlose Anwendung des vorliegenden piezoresistiven Si-Drucksensors. Durch die Änderung der in MLX90308 gespeicherten Koeffizienten kann das System an andere piezoresistiven Si-Drucksensoren mit unterschiedlichen Druckbereichen, und sogar an andere Typen Sensoren für unterschiedlichen Einsatzgebiete, erweitert werden.

Bei dem System gibt es dennoch viele Punkte zu verbessern. Zuerst ist zuzagen, dass der Drucksensor mit TO8-Sockel ohne Gehäusedeckel hauptsächlich für die forschерische Untersuchung und nicht als Industrieprodukt geeignet ist. Obwohl der TO8-Sockel dem Drucksensor eine Schnittstelle zum Lesen bietet, verbraucht es zu viel Platz. Außerdem begrenzt seine Zerbrechlichkeit die Einsatzgebiete des Systems. Für industrielle Anwendungen ist der TO8-Sockel durch ein kompaktes Gehäuse (z.B LCC-Gehäuse des BOSCH-Drucksensors BMP085) zu ersetzen, das begünstigt auch eine Fließband-Reflow-Löt Produktion.

Zum zweiten ermöglicht das System die Erweiterung von Single-Point-Druckmessung zu Multi-Point-Druckmessung. Da oft in der Praxis mehrere verteilte Messpunkte zu messen sind. Die Messstrecke zum weitesten Messpunkt kann auch mehr als 15m betragen. In diesen Fällen ist das Vernetzen der Messpunkte notwendig. Im Kapitel 5.1.5 wurde vorgestellt, dass Zigbee eine große Netzwerk-Kapazität zur Verfügung stellt. Zigbee unterstützt zwei Netzwerktopologien. In der Stern-Topologie wird die Kommunikation zu jedem Sensorknoten durch den Koordinator bearbeitet. Eine direkte Verbindung zwischen den Endgeräten existiert nicht. Vorteile hiervon sind die

einfache Struktur, Verwaltbarkeit und Realisierbarkeit. Der Nachteil ist die geringe Zuverlässigkeit. Falls der Koordinator ausfällt, funktionieren die damit verbundenen Sensorknoten nicht mehr. Die andere Vernetzungsmethode ist die Mesh-Topologie, hierbei kann jeder Sensorknoten mit seinen Nachbarn kommunizieren. Dies ist ein selbstorganisierendes Netzwerk. Die Übertragung der Signale zwischen Sensorknoten im Netz wird nach dem Prinzip mit minimaler Energie durchgeführt. Wenn ein Signalpfad unterbrochen ist, reorganisiert das Netzwerk automatisch die Daten-Übertragung durch einen neuen Pfad. Im Vergleich zur Stern-Topologie ist die Fehlertoleranz jedoch höher. Die Stern-Topologie oder die Mesh-Topologie sind in ihrem Kommunikationsverhalten im Netzwerk entsprechend über die Zigbee-Protokolle zu definieren.

Zum dritten ist die $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ Leiterplatte für viele Anwendungen noch zu groß. Aus dem Layout der Leiterplatte kann man erkennen, dass die Dimension der Leiterplatte hauptsächlich von dem auf der Rückseite gelöteten Batteriehalter bestimmt wurde. Um die Leiterplatte zu verkleinern, sind die genutzten AAA-Batterien durch kleinere Batterien (z.B. Knopfzelle) zu ersetzen. Dazu müssen einfachere und gezielt ausgewählte Bauteile mit weniger Stromverbrauch verwendet werden. Beispielsweise kann der von Texas Instrument hergestellte Zigbee-Chip „cc2430“ verwendet werden. Mit dem in „cc2430“ integrierten verbesserten 8051-Mikrocontroller, A/D Wandler und Analog-Temperatursensor kann man selbst den Kompensationsalgorithmus programmieren. Der Kompensationsmodul MLX90308 kann daher weggelassen werden. Weil der „cc2430“ ein Basis-Chip ist, wurde nur IEEE802.15.4 Protokoll mit definierter PHY-Schicht und MAC-Schicht darin integriert. Deshalb muss man bei der Anwendung viel extra Programmierungsarbeit, für die Definition der Zigbee-Übertragungseignisse, leisten. Eine effiziente externe Antenne muss zusätzlich entworfen werden. Darüber hinaus ist die Board-level Integration in den spezifischen Einsatzgebieten, mit z.B. hoher Anforderung an Miniaturisierung, nicht klein genug. Stattdessen ist die Integration in die nächste Stufe (z.B. 3D-stacked IC) zu empfehlen.

Literaturverzeichnis

[1] Ha Duong Ngo

Skript zum Praktikum Technologien und Werkstoffe der Mikrosystemtechnik;
TU-Berlin Schwerpunkt Technologien der Mikroperipherie März 2012

[2] *Kurzfassung zur Vorlesung Sensorik*; TU-Berlin 2012

[3] Gerd Wieczorek

*Messtechnische Charakterisierung von piezoresistiven Silizium-Drucksensoren
mit Messbereichen von 250 hPa bis 10 MPa*; TU-Berlin Juni 1999

[4] Melexis Semiconductors

Users Manual MLX90308D & MLX90314B; Mai 2012

[5] Melexis Semiconductors

Datasheet von MLX90308; 02.Okt.2004

[6] Bluetooth Homepage

<http://www.bluetooth.com>

[7] Bundesnetzagentur

UWB, das Kurzstrecken-Kommunikations- und Sensor-Funksystem

[8] Osama Haraz

Why do we need Ultra-wideband?; 19.November.2012

[9] Wi-Fi Alliance homepage

<http://www.wi-fi.org/>

[10] Josef Langer, Michael Roland

Anwendungen und Technik von Near Field Communication (NFC); Springer 2010

[11] Ingenico GmbH

Produktübersicht; 2013

[12] Daniel Apelt, Jörg Pohle

ZigBee A Wireless Personal Area Network; 19. Juli 2006

[13] Bob Heile

Wireless Sensors and Control Networks: Enabling New Opportunities with ZigBee; Dezember 2006

[14] Homepage von ZigBee Alliance

<http://zigbee.org/>

[15] ZigBee Alliance

ZIGBEE SPECIFICATION; 17.Januar.2008

[16] Digi International

Datasheet von XBee/XBee-Pro RF Moduls; 23.September.2009

[17] Mathias Fritz

Studienarbeit Evaluierung und Signalverarbeitung von Drucksensoren; Juli 2011

[18] Stefan Schmitz

Einführungsvortrag Drahtbonden; Fraunhofer IZM

[19] Melexis Semiconductors

Datasheet Evaluation Kit 90308; Januar 2008

[20] Analog Devices

Datasheet ADXL345 Digital Accelerometer; Februar 2013

[21] National Semiconductor

Datasheet LM2937 500 mA Low Dropout Regulator; Juli 2000

[22] Hans Skilandat

Anleitung zur Lötstopmaskierung von Leiterplatten; FHTW Berlin 30.08.2002

[23] Bosch Sensortec

Datasheet BMP085 Digital pressure sensor; 15. Oktober.2009

A Anhang

Programmierung in Arduino für Neigungserkennung-System

```
#define Register_ID 0
#define Register_2D 0x2Db
\mu\nu\vartheta\iota\swarrow\nearrow\hookleftarrow\hookrightarrow,\frac{}{}\sqrt{ }
#define Register_X0 0x32
#define Register_X1 0x33
#define Register_Y0 0x34
#define Register_Y1 0x35
#define Register_Z0 0x36
#define Register_Z1 0x37

#include <Wire.h>
int ADXAddress = 0xA7 >> 1; // the default 7-bit slave address
int X0,X1,X_out;
int Y0,Y1,Y_out;
int Z1,Z0,Z_out;
double Xg,Yg,Zg;

void setup() {
    Wire.begin();
    Serial.begin(9600);
    Serial3.begin(9600);
```

```

Wire.beginTransmission(ADXAddress);

Wire.write(Register_2D);

Wire.write(8); //measuring enable

Wire.endTransmission();

}

void loop() {

//-----X

Wire.beginTransmission(ADXAddress);

Wire.write(Register_X0);

Wire.write(Register_X1);

Wire.endTransmission();

Wire.requestFrom(ADXAddress,2);

if(Wire.available()<=2)

{X0 = Wire.read();

X1 = Wire.read(); }

//-----Y

Wire.beginTransmission(ADXAddress);

Wire.write(Register_Y0);

Wire.write(Register_Y1);

Wire.endTransmission();

Wire.requestFrom(ADXAddress,2);

if(Wire.available()<=2)

{Y0 = Wire.read();

Y1 = Wire.read();

//Y1=Y1<<8;

//Y_out=Y0+Y1; }

//-----Z

Wire.beginTransmission(ADXAddress);

Wire.write(Register_Z0);

```

```
Wire.write(Register_Z1);

Wire.endTransmission();

Wire.requestFrom(ADXAddress,2);

if(Wire.available()<=2)

{Z0 = Wire.read();

Z1 = Wire.read();

Serial3.write(X0);

Serial3.write(X1);

Serial3.write(Y0);

Serial3.write(Y1);

Serial3.write(Z0);

Serial3.write(Z1);
```

B Anhang

Programmierung in „Processing“ für Neigungserkennung-System

```
import saito.objloader.*;
OBJModel model;
import processing.serial.*;
Serial myPort;
int a_X0,a_X1,a_Y0,a_Y1,a_Z0,a_Z1,a_X,a_Y,a_Z;
float Xg,Yg,Zg;
float WX,WY,WZ;

void setup(){
    size(600, 600, P3D);
    model = new OBJModel(this, "cassini.obj", "relative", TRIANGLES);
    model.enableDebug();
    model.scale(8);
    noStroke();
    String portName = Serial.list()[0];
    myPort = new Serial(this, portName, 9600);
}

void draw()
{if ( myPort.available()>0) {
    a_X0 = myPort.read();
    a_X1 = myPort.read();
```

```

a_Y0 = myPort.read();
a_Y1 = myPort.read();
a_Z0 = myPort.read();
a_Z1 = myPort.read(); }

a_X1= a_X1<<8;
a_X=a_X0+a_X1;

if (a_X>32767) {
    a_X=a_X<<16;
    a_X=a_X/65536;
    Xg=a_X/256.0;
    Xg=Xg-0.07;}
else {Xg=a_X/256.0;
    Xg=Xg-0.16; }

if(Xg<-1){Xg=-1;}
if(Xg>1){Xg=1; }

a_Y1= a_Y1<<8;
a_Y=a_Y0+a_Y1;

if (a_Y>32767) {
    a_Y=a_Y<<16;
    a_Y=a_Y/65536;
    Yg=a_Y/256.0;
    Yg=Yg-0.04; }

else{ Yg=a_Y/256.0;
    Yg=Yg-0.15; }

if(Yg<-1){Yg=-1;}
if(Yg>1){Yg=1; }

a_Z1= a_Z1<<8;
a_Z=a_Z0+a_Z1;

if (a_Z>32767) {
    a_Z=a_Z<<16;
}

```

```

a_Z=a_Z/65536;
Zg=a_Z/256.0;
Zg=Zg+0.01; }

else { Zg=a_Z/256.0;
Zg=Zg+0.04; }

if(Zg<-1){Zg=-1; }

if(Zg>1){Zg=1; }

WX=acos(Yg/1);
WY=acos(Xg/1);

print("Xg=");
print(Xg);
print(" ");
print("Yg=");
print(Yg);
print(" ");
print("Zg=");
print(Zg);
println(" ");

background(32);

lights();
fill(255,0,255);
pushMatrix();
translate(width/2, height/2, 0);
rotateX(WY);
rotateY(WX);
model.draw();
popMatrix();
delay(150);
}

```

C Anhang

Textdokument zur Eingabe der Kompensationskoeffiziente in MLX90308

EEPROM

0:0x6	19:0x12
1:0x0	20:0x1
2:0xd3	21:0x21
3:0x91	22:0x13
4:0x0	23:0x0
5:0x1a	24:0xfb
6:0xd4	25:0x3
7:0x3b	26:0x0
8:0x58	27:0x0
9:0x0	28:0x0
10:0x6b	29:0x0
11:0x58	30:0x0
12:0x1d	31:0x0
13:0x9e	32:0x9
14:0x84	33:0x9
15:0x28	34:0x3
16:0x0	35:0x35
17:0x0	36:0x71
18:0x48	37:0x22

38:0x99

39:0x40

40:0x0

41:0x1

42:0x15

43:0x11

44:0xbb

45:0x9

46:0xff

47:0xbd

D Anhang

Graphische Darstellung der in „Eagle Komponent-Editor“ hergestellte Symbole- und Gehäuse-Datei

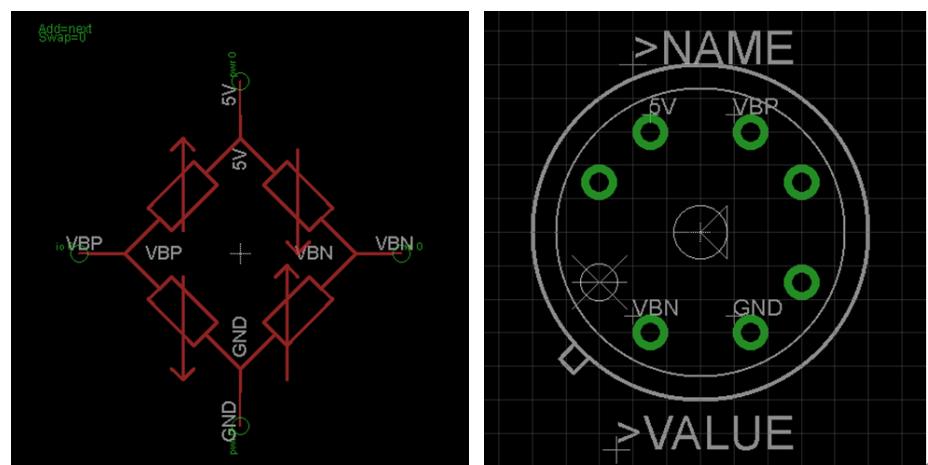


Abbildung D.1: Drucksensor

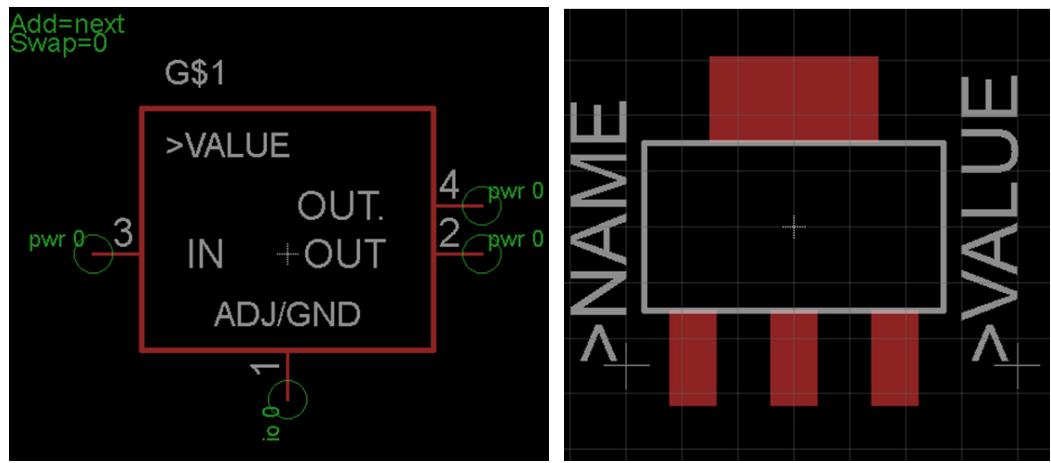


Abbildung D.2: TLV-1117

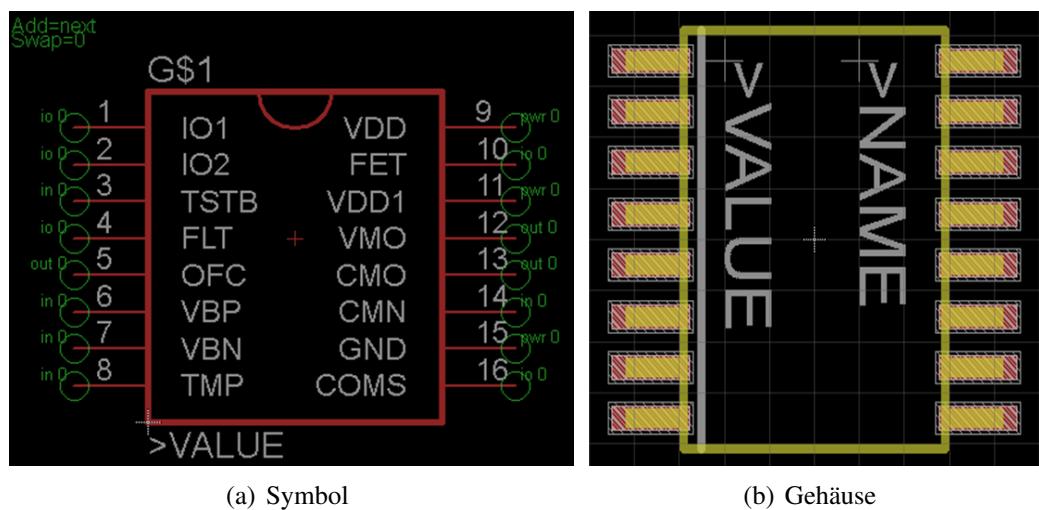


Abbildung D.3: MLX90308

E Anhang

Programmierung in „Matlab“ für die Konfiguration der seriellen Kommunikation

```
gao=serial('com4','BaudRate',9600,'Parity','none','StopBits',1);  
gao.inputbuffersize=4096;  
gao.outputbuffersize=4096;  
gao.terminator=126; % 7E  
gao.BytesAvailableFcn=@callitback;  
gao.timeout=0.5;  
get(gao);  
fopen(gao)
```

F Anhang

Programmierung der Callback-Funktion in „Matlab“ für die Entnahme und Bearbeitung der Sensordaten

```
% Xin Gao MAT-TUBerlin

% Callback function to read and display the
output of the wireless-pressure-sensor-system

% It displays at the beginning a message
containing the type of the event, the name
% of the object that caused the event to occur,
and the time the event occurred.

function bbb=callitback(obj, event)
callbackTime = datestr(datenum(event.Data.AbsTime));
fprintf(['A ' event.Type ' event occurred for
' obj.Name ' at ' callbackTime '\n']);
R=fread(obj,22); % 5 Bytes in Puffer
n=R(9);% einmal n Samples,naemlich der neute Byte
Hex=R(12:(12-1+2*n)); % Daten ausnehmen
for i=1:n;
    Spannung(i)=(Hex(2*i-1)*256+Hex(2*i))/1024*3.3;
    Druck(i)=(Spannung(i)-0.02)*5/3;
    Altitude(i)=(1-((Druck(i)/1.01325).^(1/5.255)))*44330;
end
```

```
fprintf(['Rohdaten =']);  
fprintf(' %X\t', R);  
fprintf('\n');  
fprintf(['Spannung=']);  
fprintf('%g\t', Spannung);fprintf(['Unit:V']);  
fprintf('\n');  
fprintf(['Druck=']);  
fprintf('%g\t', Druck);fprintf(['Unit:Bar']);  
fprintf('\n');  
fprintf(['Altitude=']);  
fprintf('%g\t', Altitude);fprintf(['Unit:m']);  
fprintf('\n');  
fprintf('\n');  
xaxis=(obj.ValuesSent*n:obj.ValuesSent*n+4);  
title('Drahtlos-Drucksensor-System');  
xlabel('Sampling');ylabel('Druck(Bar)');  
bar(xaxis,Druck);hold on;  
fwrite(obj,255);  
end
```
