

Diplomarbeit

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Eingereicht von

Serge Tränkle

Allgemeine Elektrotechnik

Hochschule Esslingen
University of Applied Sciences

Eingereicht bei

Dr.-Ing. Manfred Bäumler

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Heinz Osterwinter

Tag der Abgabe:

28.02.2009

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Eidesstattliche Erklärung

Die von mir verfasste Diplomarbeit für den Studiengang Allgemeine Elektrotechnik
beinhaltet die Ausarbeitung von folgendem Thema:

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife;
Projektname: „Brake Pad Wear Sensor“.

Hiermit versichere ich, dass diese Diplomarbeit von mir ohne unzulässige fremde
Hilfe selbstständig verfasst worden ist und nur die angegebenen Quellen und Hilfs-
mittel benutzt worden sind.

Stuttgart, 28. Februar 2009

Serge Tränkle

Erklärung der Firma GIGATRONIK

Diese Diplomarbeit wurde in der Zeit vom 1. Oktober 2008 bis 28. Februar 2009 bei der Firma GIGATRONIK GmbH in Stuttgart durchgeführt.

Sie ist vom Betrieb nicht freigegeben.

Jede Veröffentlichung, Vervielfältigung oder Weitergabe dieser Arbeit und deren Dateninhalte an Dritte bedarf der Freigabe durch die GIGATRONIK Stuttgart GmbH und des Verfassers.

Teile der Informationen und Darstellungen in diesem Dokument unterliegen nationalen oder internationalen patentrechtlichen Bestimmungen.

Die beigelegte CD enthält vertrauliche Daten und Informationen. Sie kann nur bei der Firma GIGATRONIK GmbH Stuttgart eingesehen werden.

Ausgenommen hiervon ist die Weitergabe ausschließlich zum Zwecke der Beurteilung der Prüfungsleistung durch einen Zweit- bzw. Drittkorrektor aus einer ingenieurwissenschaftlichen Fakultät der Hochschule Esslingen, falls dies erforderlich sein sollte.

Bevollmächtigter

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während meiner Diplomarbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Manfred Bäumler und Herrn Uwe Böker, die das Zustandekommen dieser Diplomarbeit ermöglichten und mir jederzeit als hilfsbereite Ansprechpartner zur Seite standen.

Seitens der Hochschule Esslingen bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Heinz Osterwinter für die Betreuung meiner Arbeit.

Ebenso herzlichen Dank allen Mitarbeitern der GIGATRONIK Stuttgart GmbH, insbesondere der Abteilung Sonderapplikationen, die mich bei meiner Arbeit tatkräftig gefördert haben.

Ein großes Dankeschön gebührt meiner Familie für das Verständnis und die besondere Zuwendung, die sie mir während meiner Studienzeit entgegengebracht hat.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Erklärung der Firma GIGATRONIK	III
Danksagung	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XI
Nomenklatur	XII
Abkürzungen	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation zur Entwicklung des Sensorsystems	1
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung	4
1.3 Stand der Technik	5
2 Sensorsystemaufbau	8
2.1 Physikalische Grundlagen	8
2.2 Mechanischer Aufbau	10
2.3 Funktionsprinzip	12
2.4 Elektronische Bauteile im Kurzüberblick	14
2.5 BPW-Sensor-Stromverbrauch	16
2.6 Elektronische Bauteile	17
2.6.1 FSS-Kraftsensor	17
2.6.2 Instrumentenverstärker	19
2.6.3 PIC-Mikrocontroller	21
2.6.4 I ² C-D/A-Wandler	24
2.6.5 PI-Regler	27
2.6.6 I/U-Wandler	29

2.6.7	Spannungsversorgung	31
2.6.8	Steckverbinder.....	33
2.7	Elektronik-Baugruppe des BPW-Sensors	34
2.7.1	EAGLE-Entwicklungsumgebung	34
2.7.2	BPW-Sensor-Schaltplan.....	38
2.7.3	BPW-Sensor-Leiterplatte	43
3	BPW-Sensor-Testaufbau	46
3.1	Testboard.....	46
3.2	Prüfstand zur Programmierung.....	49
3.3	PIC-Programmiergerät	51
3.4	Prüfstand zur Kalibrierung	54
3.5	Bedienungsanleitung zur Kalibrierung.....	56
3.5.1	Bestandteile des Testaufbaus	56
3.5.2	Vorbereitungen zur Kalibrierung	57
3.5.3	Kalibrierungsablauf.....	60
4	Software	62
4.1	MPLAB-Entwicklungsumgebung	62
4.2	FrameWORK.....	63
4.3	BPW-Sensor-Software.....	66
4.3.1	Programmablaufplan zur BPW-Sensor-Kalibrierung	66
4.3.2	Programmablaufplan für den Prozess-Modus.....	70
4.3.3	Messgenauigkeit des Testboards	72
4.3.4	Messgenauigkeit des BPW-Sensors.....	73
4.3.5	BPW-Sensor-Kalibrierung	74
5	Zusammenfassung	78
6	Ausblick	79
7	Anhang	80
7.1	Datenblatt Druckfeder VD-180K	81
7.2	BPW-Sensor-Schaltplan V 1.3	82

Brake Pad Wear Sensor

7.3	BPW-Sensor-Leiterplatte V 1.3	84
7.4	BPW-Sensor-Stückliste V 1.3	87
7.5	EAGLE-Design-Regeln	89
7.6	Testboard-Schaltplan V 1.5 interim	93
7.7	Testboard-Leiterplatte V 1.5	99
7.8	Testboard-Stückliste V 1.5	100
7.9	Programm-Listing zum Kalibrierungsablauf auf dem Testboard	103
8	Quellenverzeichnis	113

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schaufelradbagger im Tagebau Garzweiler [7].....	1
Abbildung 2: Panoramaaufnahme vom Tagebau Garzweiler [10].....	2
Abbildung 3: Förderbandanlage [8]	2
Abbildung 4: Antriebsbremse an der Förderbandanlage [9]	3
Abbildung 5: Typische 2-Draht-Stromschleife (4 - 20 mA) [6]	5
Abbildung 6: 2-Draht-Stromschleife (4 - 20 mA) mit XTR115 [11]	6
Abbildung 7: 2-Draht-Stromschleife (4 - 20 mA) mit MAX1459 [4]	7
Abbildung 8: Lineare Federkennlinie.....	8
Abbildung 9: Mechanischer Aufbau des Sensorsystems [9]	10
Abbildung 12: Funktionsprinzip des BPW-Sensors	12
Abbildung 13: Umriss der Leiterplatte [9]	14
Abbildung 14: FSS-Kraftsensor [12].....	17
Abbildung 15: DMS-Widerstandsbrücke im FSS-Kraftsensor [13]	17
Abbildung 16: Pinbelegung vom Instrumentenverstärker AD623 [15]	19
Abbildung 17: Pinbelegung vom PIC18F2520 [16]	23
Abbildung 18: QFN- und SOIC-Gehäusen vom PIC18F2520 [9].....	23
Abbildung 19: Pinbelegung vom I ² C-D/A-Wandler MAX5812 [17].....	24
Abbildung 20: Blockschaltbild vom I ² C-D/A-Wandler MAX5812 [17]	24
Abbildung 21: SDA und SCL-Signale vom PIC zu MAX5812 [29].....	25
Abbildung 22: Verbindung zwischen dem PIC und I ² C-D/A-Wandler MAX5812 [17] ...	25
Abbildung 23: Adressenauswahl beim I ² C-D/A-Wandler MAX5812 [17]	26
Abbildung 24: PI-Regler mit einem Operationsverstärker [21]	27
Abbildung 25: Pinbelegung vom OP-Verstärker LMV931 [18]	28
Abbildung 26: Pinbelegung vom I/U-Wandler INA138NA [19].....	29
Abbildung 27: Beschaltung vom I/U-Wandler INA138NA [19]	29

Abbildung 28:	Pinbelegung von der Spannungsversorgung MAX6035 [20]	31
Abbildung 29:	Beschaltung vom MAX6035 [20]	31
Abbildung 30:	Strom-Spannungs-Charakteristik vom MAX6035 [20]	32
Abbildung 31:	Binder-Steckverbinder, Serie 713 [40].....	33
Abbildung 32:	Das GRID-Dialogfenster für den Schaltplan	35
Abbildung 33:	Das GRID-Dialogfenster für das Layout	36
Abbildung 34:	Tastenbelegung im Schaltplan- und Layouteditor	37
Abbildung 35:	FSS-Sensor und Instrumentenverstärker.....	38
Abbildung 36:	Ausgangsspannung des AD623 bei G = 28,8	39
Abbildung 37:	Maximale Ausgangsspannung des AD623 [15].....	40
Abbildung 38:	Standardaufbau 4-Lagen-Multilayer-Leiterplatte [44]	43
Abbildung 39:	Beispiel von Design-Regeln für die Leiterplatte [9].....	43
Abbildung 40:	BPW-Sensor-Leiterplatte von Oben [9].....	44
Abbildung 41:	Musteraufbau eines 4-Lagen-Multilayers mit flexibler Innenlage [45] ...	44
Abbildung 42:	Pads auf der Leiterplatte von Unten [9]	45
Abbildung 43:	Distanzring und Elektronik-Baugruppe [9]	45
Abbildung 45:	Prüfstand zur Programmierung	49
Abbildung 46:	Nadeladapter.....	50
Abbildung 47:	MPLAB ICD 2 Programmierer/Debugger.....	51
Abbildung 48:	Anschlussaufbau mit MPLAB ICD 2.....	52
Abbildung 49:	Pinbelegung zum PIC-Programmieren	52
Abbildung 50:	MPLAB ICD 2 Spannungsversorgung je nach Applikation	53
Abbildung 51:	Prüfstand zur Kalibrierung.....	54
Abbildung 52:	MD-CC4-Adapter und Motorsteuergerät	55
Abbildung 53:	Einstellungen im IMS Terminal	58
Abbildung 54:	Belegung der Funktionstasten im IMS Terminal	59
Abbildung 55:	IMS Terminalfenster	59
Abbildung 56:	Kalibrierungsablauf	61
Abbildung 57:	Verschiedene Handler in der main-Funktion [9]	64

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Abbildung 58: Codebereich für Datenaustausch [9].....	65
Abbildung 59: Programmablaufplan zur BPW-Sensor-Kalibrierung, Teil 2	66
Abbildung 60: Programmablaufplan zur BPW-Sensor-Kalibrierung, Teil 2	67
Abbildung 61: Programmablaufplan zur BPW-Sensor-Kalibrierung, Teil 3	68
Abbildung 62: Programmablaufplan und Signalbearbeitung im PROC Mode	70
Abbildung 63: Multifunktionskalibrator MC3	72
Abbildung 64: Ein- und Ausgangssignale des I/U-Wandlers	72
Abbildung 65: Farbig markierter Stößel.....	75
Abbildung 66: Kraft-Kennlinien je nach Stößelwinkellage, Druckplatte mit Loch.....	75
Abbildung 67: Druckplatte, links: mit Loch, mittig: Metallstift, rechts: ohne Loch.....	76
Abbildung 68: Kraft-Kennlinien je nach Stößelwinkellage, Druckplatte ohne Loch	76
Abbildung 69: Stromverlauf in der Stromschleife eines BPW-Sensors	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Namen und Begriffserklärungen	XII
Tabelle 2: Verzeichnis der gebrauchten Abkürzungen.....	XIV
Tabelle 3: Elektronische Bauteile und deren Bauformen [16], [31] – [40]	15
Tabelle 4: Stromverbrauch von elektronischen Sensorbauteilen [16], [31] – [39].....	16
Tabelle 5: Technische Daten für den FSS-Sensor [31]	18
Tabelle 6: Technische Daten für den AD623 [15]	19
Tabelle 7: Technische Daten von μ Controllern aus der PIC-Familie [16], [22] – [26].....	21
Tabelle 8: Technische Daten für den PIC18F2520 [16]	22
Tabelle 9: Befehle und deren Handlungssequenzen in EAGLE [42]	37
Tabelle 10: Pad-Belegung auf der Leiterplatte.....	41
Tabelle 11: Markierungsfarben und entsprechende Winkel	74

Nomenklatur

Begriff / Name	Erläuterung
A/D-Wandler	Analog-Digital-Wandler
BPW-Sensor	Bremsbelagverschleißsensor
C	Programmiersprache
COMix	Terminalprogramm
GIGATRONIK	Kurzfassung der GIGATRONIK Stuttgart GmbH
I ² C-D/A-Wandler	Digital-Analog-Wandler mit serielllem I ² C-Datenbus
I/U-Wandler	Strom-Spannungs-Wandler
Layer	Schicht einer Leiterplatte
Layout	Leiterbahnanordnung auf der Leiterplatte
Microchip	Microchip Technology Inc.; ein US-amerikanischer Hersteller von Halbleitern
Mikrocontroller, μ Controller	Eine elektronische programmgesteuerte Steuereinrichtung, die mindestens eine CPU, einen RAM, einen ROM und I/O- Ports auf einem Halbleiterchip vereint.
MPLAB, MPLAB IDE	Entwicklungsumgebung für PIC-Mikrocontroller von der Firma Microchip
OP-Verstärker	Operationsverstärker
Offset	Spannungsversatz
Pad	Kontaktfläche auf der Leiterplatte
PI-Regler	Regler mit proportionalem und integralem Verhalten; er vereint ein P-Glied und ein I-Glied.
PIC, PIC- μ C	PIC-Mikrocontroller
Via	Bohrung mit der Durchkontaktierung auf der Leiterplatte

Tabelle 1: Namen und Begriffserklärungen

Abkürzungen

Begriff / Abkürzung	Erläuterung
BOR	Brown-Out Reset Status bit
BPW	Brake Pad Wear; Bremsbelagverschleiß
DAC	Digital to Analog Converter; Digital-Analog-Wandler
DC	Direct Current; Gleichstrom
DMS	Dehnungsmessstreifen; Messeinrichtungen zur Erfassung von dehnenden Verformungen
EAGLE	Einfach Anzuwendender Grafischer Layout Editor
I ² C	Inter-Integrated Circuit, gesprochen I-square-C, ein von Philips Semiconductors entwickelter serieller Datenbus
IC	Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment; integrierte Entwicklungsumgebung
L	leads
LED	Light Emitting Diode, Leuchtdiode
LSB	Least Significant Bit; Bit mit dem niedrigsten Stellenwert
μC	Mikrocontroller
μSOIC	Micro Small Outline IC
MCLR	Master Clear Reset
MCU	Micro Control Unit
mid	middle; mittlere
MSSP	Master Synchronous Serial Port
OEM	Original Equipment Manufacturer; Originalausrüstungshersteller
OPV	Operationsverstärker

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Begriff / Abkürzung	Erläuterung
PDIP	Plastic Dual Inline Package
PC	Personal Computer
PIC	Programmable Interrupt Controller; eine Mikrocontrollerfamilie der Firma Microchip
POR	Power-On Reset Status bit
QFN	Quad Flat No Leads; quadratisches Kunststoffgehäuse mit den Anschlüssen an der Unterseite
RISC	Reduced Instruction Set Computing; Rechnen mit reduziertem Befehlssatz
RWE	Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk
SC	Small Circuit
SCL	Serial CLock; serielle Takteleitung bzw. serielles Taktsignal beim I ² C-Bus
SDA	Serial Data; serielle Datenleitung bzw. serielles Datensignal beim I ² C-Bus
SMD	Surface Mounted Device; oberflächenmontierbares Bauteil
SMT	Surface Mounted Technology; Technologie von oberflächenmontierten Bauelementen
SOIC	Small Outline Integrated Circuit; Plastik-Package für SMT, bei dem die gebogenen Anschlusskontakte an den Längsseiten angebracht sind
SOT	Small Outline Transistor
TQFP	Thin Quad Flat Pack
typ.	typisch
USART	Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter
USB	Universal Serial Bus; ein von Intel entwickeltes Bussystem
WDT	Watchdog Timer

Tabelle 2: Verzeichnis der gebrauchten Abkürzungen

1 Einleitung

1.1 Motivation zur Entwicklung des Sensorsystems

Der Braunkohletagebau Garzweiler ist ein Tagebau der RWE Power AG im Rheinischen Braunkohlerevier in Nordrhein-Westfalen. Im Tagebaugebiet Garzweiler sind mindestens drei der sechs Schaufelradbagger Tag und Nacht im Einsatz, um den riesigen Bedarf an Braunkohle zu decken. Bis zu 240.000 Kubikmeter Kohle kann der größte Schaufelradbagger täglich fördern [14].

Auf der folgenden Abbildung ist ein Schaufelradbagger zum Abbau von Braunkohle mit einer Förderbandanlage (links unten im Bild zu sehen) dargestellt.



Abbildung 1: Schaufelradbagger im Tagebau Garzweiler [7]

Auf Förderbändern gelangen Tonnen von Braunkohle zu den umliegenden Kraftwerken. Die umliegenden Kohlekraftwerke laufen Tag und Nacht auf Hochtouren und müssen kontinuierlich mit Kohle beliefert werden. Sie liefern den Strom für den Ballungsraum Köln, Bonn und Düsseldorf.

Auf der Abbildung 2 ist eine Panoramaaufnahme vom Tagebau Garzweiler mit diversen Baggern im Einsatz und den Kraftwerken im Hintergrund dargestellt.

Im Vordergrund (auf dem Bild links) ist eine Förderbandanlage für Braunkohle zu sehen.

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor



Abbildung 2: Panoramaaufnahme vom Tagebau Garzweiler [10]

Auf der Abbildung 3 ist eine kilometerlange Förderbandanlage dargestellt.



Abbildung 3: Förderbandanlage [8]

Die Förderbandanlage wird von einem Elektromotor angetrieben. Jeder Elektromotor an der Förderbandanlage hat eine Antriebsbremse.

Auf der Abbildung 4 ist der Elektromotor mit der Scheibenbremse dargestellt.

Brake Pad Wear Sensor



Abbildung 4: Antriebsbremse an der Förderbandanlage [9]

Die Antriebsbremse verfügt über Bremsbeläge, die mit der Zeit abgenutzt werden. Um die Produktionsausfälle zu vermeiden, muss die Antriebsbremse regelmäßig gewartet werden.

Störungen und Ausfallzeiten von Industrieanlagen bedeuten für die Betreiber einen Mehraufwand an Kapital. Aus diesem Grund ist auch der industriell betriebene Bergbau daran interessiert, mit geringerem Aufwand für Personal und Instandhaltung ein Höchstmaß an Produktivität zu erzielen.

Ein Faktor, der eine hohe Produktivität gewährleistet ist eine hohe Standzeit der Produktions- bzw. Gewinnungsanlagen. Um die Standzeit einer Anlage zu maximieren, ist eine kontinuierliche Überwachung ihres Betriebszustandes notwendig.

Auch relativ geringe Ausfallzeiten der Gewinnungsanlagen verursachen bei der Förderung von Bodenschätzen bei den Betreibern immense Kosten.

Aus diesem Grund erhielt die GIGATRONIK Stuttgart GmbH von der RWE Systems AG (ein Dienstleistungsunternehmen im RWE-Konzern) den Auftrag ein Sensorsystem zur Ermittlung der Abnutzung der Bremsbeläge an Förderbandanlagen zu entwickeln.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Aufgabe dieser Arbeit ist es, auf Basis eines bereits vorhandenen Controller-gestützten Prototyps eines Wegsensors einen weiteren Prototyp (B-Muster) des Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife zu entwickeln und aufzubauen.

Dazu ist beim Schaltungsentwurf zu beachten, dass der Stromverbrauch unterhalb 4 mA bleibt. Der Sensorhub soll 30 mm betragen. Die maximal zulässige Messabweichung von 5 % soll nicht überschritten werden.

Weiterhin ist darauf zu achten, dass alle Komponenten in dem bereits definierten Bauraum angeordnet werden können. Entsprechend dem Schaltungsentwurf ist ein Entwicklungsprototyp herzustellen, um die Hardware in ihrer Funktionalität zu testen.

In dem zweiten Teil der Arbeit ist die Software für die Steuerung, Datenerfassung und Messsignal-Generierung zu entwerfen. Dabei ist insbesondere auf die eingeschränkten Ressourcen des verwendeten Mikrocontrollers zu achten.

Die Gesamtfunktion der Hardware und Software ist nachzuweisen. Auf Grundlage des B-Muster-Aufbaus soll die Serienproduktion ermöglicht werden.

1.3 Stand der Technik

Datenübertragung mittels einer Stromschleife ist in vielen Umgebungen eine bevorzugte Technik. Meistens wird sie in industriellen Anwendungen eingesetzt.

Die meisten Systeme arbeiten mit der vertrauten, analogen 4 - 20 mA Stromschleife über Zweidraht. Ein verdrilltes, zweiadriges Kabel dient sowohl als Spannungsversorgung für das Modul als auch als Medium für die Übertragung des Ausgangssignals. Weniger populär ist die Dreidraht-Stromschnittstelle, deren primärer Vorteil die Übertragung von zusätzlicher Leistung für die Modulelektronik ist. Bei einer Zweidraht-Stromschleife sind als Versorgung nur 4 mA erlaubt – wohlgemerkt bei der Schnittstellenspannung.

Stromschleifen bieten gegenüber Messumformern mit Spannungsausgang einige Vorteile. Zunächst einmal benötigen sie keine präzise oder stabile Versorgungsspannung. Ihre Unempfindlichkeit gegenüber Ohmschen Verlusten auf der Leitung erlaubt einen Einsatz über lange Distanzen, außerdem bietet das zweiadrige Kabel gute Immunität gegenüber Störungen und Rauschen. Der Strom von 4 mA, der nicht für die Informationsübertragung benötigt wird, erfüllt gleich zwei Zwecke: er liefert Leistung an ein entferntes Modul und unterscheidet zwischen Nulllage (4 mA) und keinem Informationsfluss (gleich kein Stromfluss). In einer zweiadrigen 4 - 20 mA Stromschleife darf der Versorgungsstrom für die Sensorelektronik das Maximum von 4 mA nicht überschreiten, denn die verbleibende Spanne von 16 mA ist für die Signalübertragung reserviert [4].

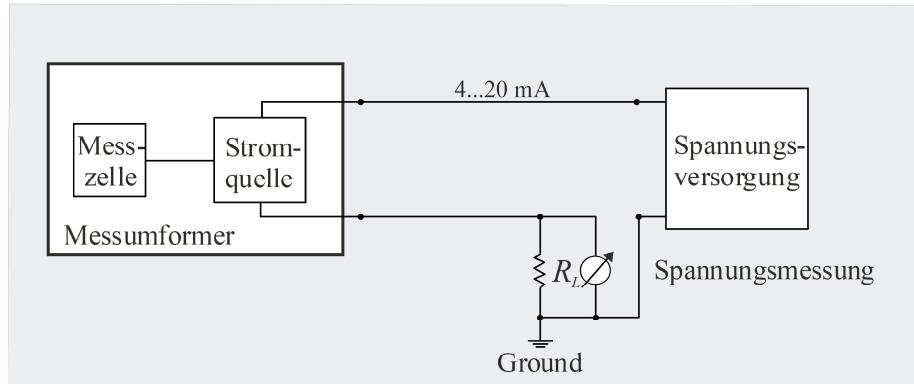


Abbildung 5: Typische 2-Draht-Stromschleife (4 - 20 mA) [6]

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Im Folgenden ist ein Beispiel der Realisierung einer 4 - 20 mA Stromschleifenschaltung dargestellt.

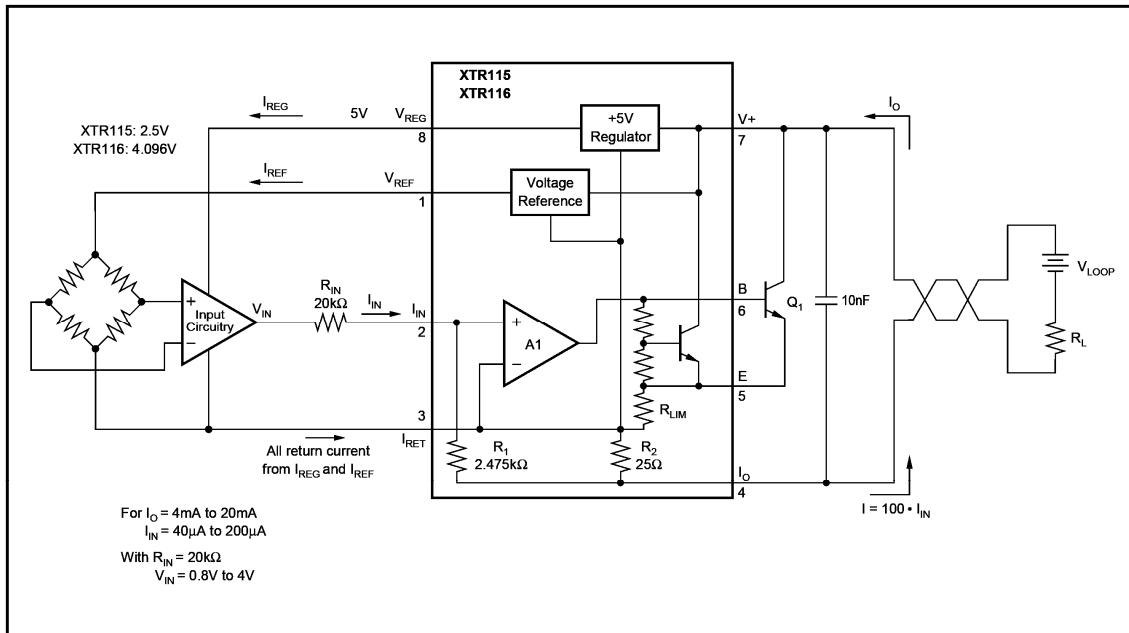


Abbildung 6: 2-Draht-Stromschleife (4 - 20 mA) mit XTR115 [11]

Die Schaltung basiert auf einem Stromschleifen-Messumformer XTR115 bzw. XTR116. Der XTR115 und XTR116 sind präzise Spannungs-Strom-Messumformer, die dafür entworfen sind, Analog-Signale von 4 bis 20 mA über eine Industrie-Standard 2-Draht-Stromschleife zu senden. Sie stellen genaue Strom-Skalierung und Ausgangstrombegrenzungsfunktion zur Verfügung.

Der auf dem Chip befindliche Spannungsregler (5 V) kann dazu verwendet werden externe Schaltkreise einzuspeisen. Eine integrierte Präzisionsspannungsquelle V_{REF} (2,5 V für XTR115 und 4,096 V für XTR116) kann für einen Offset verwendet werden oder um einen Messfühler einzuspeisen. Der XTR115 ist ein Grundbaustein intelligenter Sensoren, die eine 4 - 20 mA Stromübertragung verwenden [11].

Brake Pad Wear Sensor

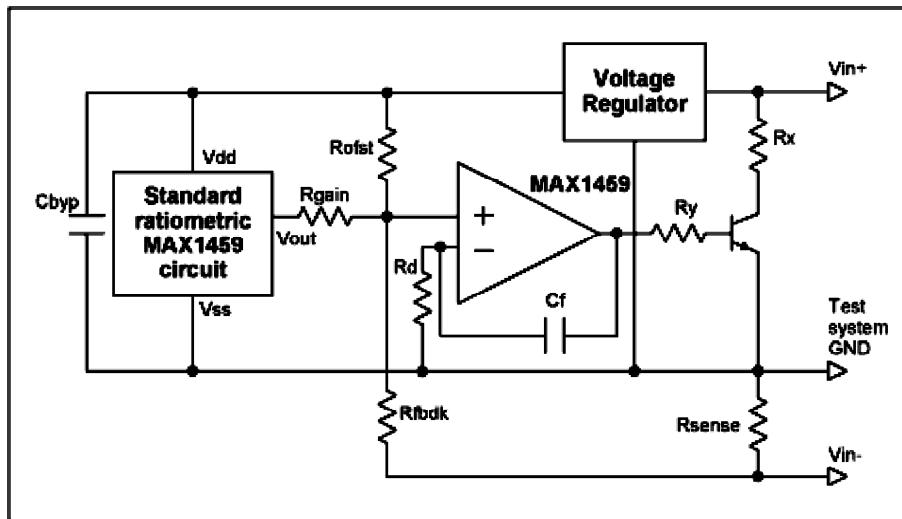


Abbildung 7: 2-Draht-Stromschleife (4 - 20 mA) mit MAX1459 [4]

Die Abbildung 7 zeigt die Schaltung, die mit dem MAX1459 aufgebaut wird. Der Spannungsregler kann irgendein preisgünstiger Baustein sein, dessen Ruhestrom für das 4-mA-Budget ausreichend niedrig ist. Die Widerstände R_X und R_Y sind optional. R_Y limitiert den Basisstrom des Transistors, besonders während des Hochlaufs und bei hohen Schaltspitzen. Der Einsatz von R_X ist schon mehr zu empfehlen, weil er den Transistor vor hohen Stromspitzen während des Einschaltvorgangs und vor Spannungstransienten schützt. R_X stellt auch bei hohen Temperaturen einen zuverlässigen Betrieb sicher. In dem er einen Teil der Leistung aufnimmt, hält er die Betriebstemperatur des Transistors innerhalb des sicheren Bereichs. Der Wert von R_X bestimmt sich aus minimaler Arbeitsspannung (V_{IN}), maximalem Betriebsstrom (20 mA), dem Spannungsabfall über R_{SENSE} und der Sättigungsspannung V_{CE} des Transistors. In Anwendungen mit niedriger minimaler Eingangsspannung V_{IN} kann es notwendig werden, R_X komplett wegzulassen. Der Kondensator C_F wird zur Kompensation des Verstärkers empfohlen.

In unserer Aufgabe wird die Signalaufbereitung zusätzlich mithilfe eines Mikrocontrollers realisiert.

2 Sensorsystemaufbau

2.1 Physikalische Grundlagen

Unsere Aufgabe ist es, der Verschleiß eines Bremsbelags zu ermitteln. Der Verschleiß entspricht einem Weg, der in die entsprechende Kraft umgewandelt wird. Die Funktion des Weg-Kraft-Wandlers erfüllt in unserem Sensorsystem eine Spiraldruckfeder. Die Feder gibt unter Belastung nach und kehrt nach Entlastung in die ursprüngliche Gestalt zurück. Sie verhält sich also elastisch.

Über das Verhalten einer Feder gibt das Federdiagramm oder die Federkennlinie Aufschluss. Die Federkennlinie beschreibt die Abhängigkeit der Federkraft F vom Federweg (Längenveränderung) s .

Für Federelemente gilt im Allgemeinen das Hookesche Gesetz, vorausgesetzt, ein geeignetes Material wird verwendet und der lineare Kraft-Weg-Bereich nicht verlassen [1]. Das Hookesche Gesetz beschreibt das elastische Verhalten von Festkörpern, deren elastische Verformung annähernd proportional zur einwirkenden Belastung ist, durch einen linearen Zusammenhang (linear-elastisches Verhalten).

Für lineare Kennlinien, wie sie die meisten Metallfedern aufweisen, sieht die Abhängigkeit wie folgt aus.

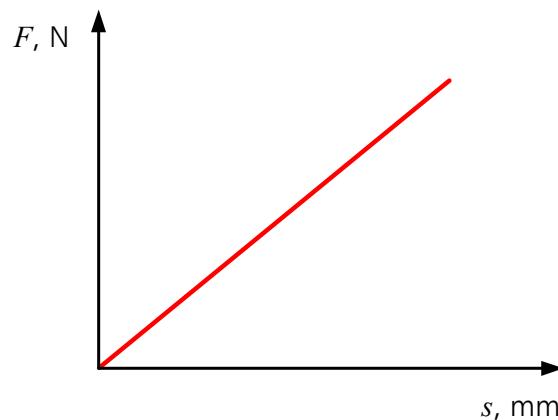


Abbildung 8: Lineare Federkennlinie

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Der lineare Zusammenhang wird durch den Proportionalitätsfaktor, Federkonstante D , beschrieben und der Zusammenhang zwischen der Federkraft F und der Längenänderung s kann dann in der folgenden einfachen Form dargestellt werden [2].

$$F = D \cdot s \quad (1)$$

Dieser Zusammenhang ermöglicht aus der Federkraft auf die Längenänderung der Feder zu schließen und dadurch der Verschleiß des Bremsbelags zu ermitteln.

2.2 Mechanischer Aufbau

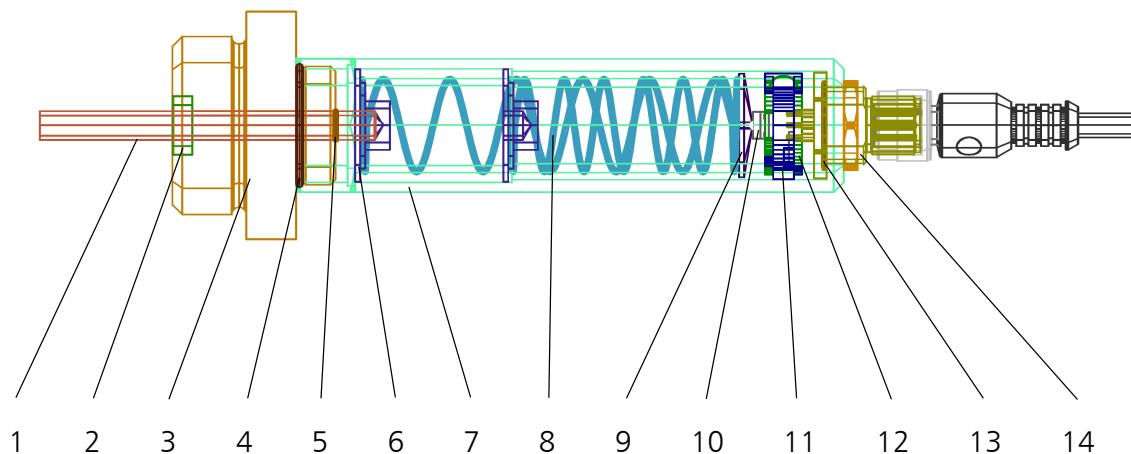


Abbildung 9: Mechanischer Aufbau des Sensorsystems [9]

Das gesamte Sensorsystem besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- | | |
|----------------------|---------------------|
| 1. Stößel | 8. Spiraldruckfeder |
| 2. Schmutzabstreifer | 9. Druckplatte |
| 3. Sensoradapter | 10. Kraftsensor |
| 4. O-Ring | 11. Distanzring |
| 5. Sprengring | 12. Leiterplatte |
| 6. Schieber | 13. O-Ring |
| 7. Sensorgehäuse | 14. Flanschstecker |

Brake Pad Wear Sensor

Der Stößel wird je nach Verschleiß des Bremsbelags verschoben. Die eingebaute Spiraldruckfeder wandelt dadurch ihre Längenänderung in die entsprechende Kraft um und leitet diese Kraft an den Kraftsensor weiter.

Der BPW-Sensor sieht mit den zusammengebauten Teilen folgendermaßen aus.



Abbildung 10: BPW-Sensor im Zusammenbau [9]

In der Abbildung 11 sind die Einzelteile des auseinander gebauten BPW-Sensors von links nach rechts dargestellt: Sensoradapter, Sensorgehäuse, Stößel mit dem Sprengring und Schieber, Druckfeder, Druckplatte und Sensor-Elektronik mit dem Flanschstecker.

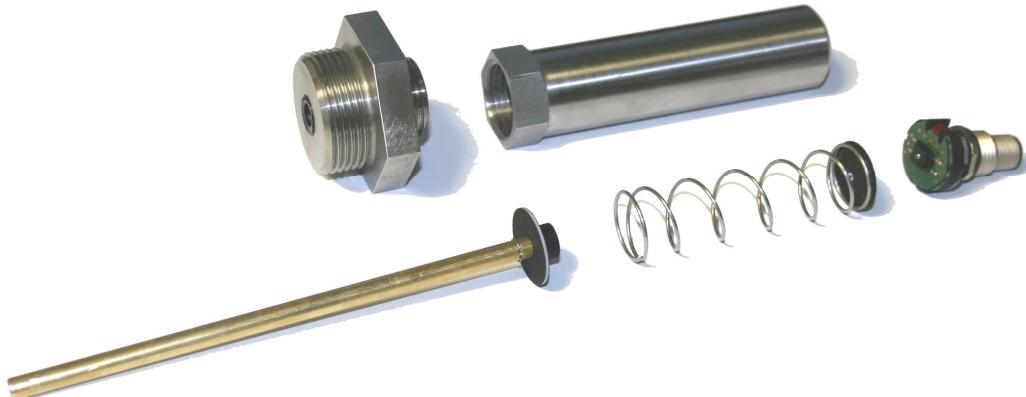


Abbildung 11: BPW-Sensor-Einzelteile mit der Feder VD-180K [9]

Das Datenblatt für die Druckfeder VD-180K befindet sich im Anhang 7.1.

2.3 Funktionsprinzip

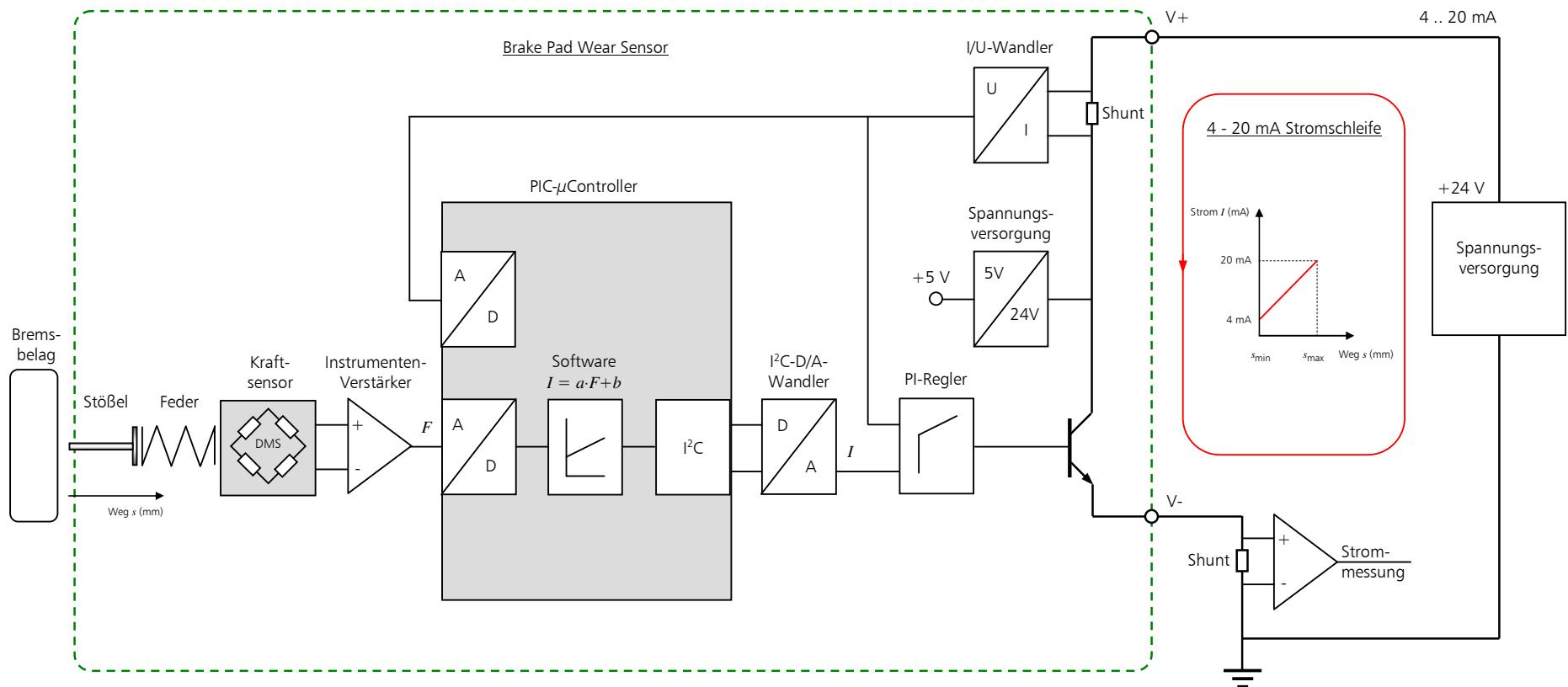


Abbildung 12: Funktionsprinzip des BPW-Sensors

Die Spiraldruckfeder des BPW-Sensors ist vorgespannt. Daher kontaktiert der Stöbel jederzeit mechanisch mit dem Bremsbelag der Förderbandanlage. Durch die Abnutzung des Bremsbelags bewegt sich der Stöbel entlang seiner Symmetriearchse. Der Stöbel übt eine Druckkraft auf die Feder aus. Dadurch verformt sich die Feder elastisch und übt ihrerseits eine Kraft auf den Kraftsensor aus. Der Kraftsensor stellt eine DMS-Widerstandsbrücke dar und wandelt die vorgegebene Kraft in die zugehörige Spannung um. Der Instrumentenverstärker passt die maximale Amplitude der Ausgangsspannung des Kraftsensors an die Referenzspannung des PIC-Mikrocontrollers an (hier +5 V).

Dann geht das Signal auf den Analogeingang des PIC-Mikrocontrollers und wird dort mit dem inneren A/D-Wandler digitalisiert. Die Signalgröße F entspricht der Federdruckkraft und dementsprechend der Position s des Stöbels. In dem PIC wird das Eingangssignal F als Argument für die Funktion einer steigenden Gerade ($I = a \cdot F + b$) verwendet. Das Ausgangssignal I wird mithilfe eines I²C-Interfaces seriell an den speziellen I²C-D/A-Wandler geschickt.

Der I²C-D/A-Wandler wandelt das Digitalsignal I in das Analogsignal I um. Das Signal I wird auf den Eingang von PI-Regler weitergegeben. Mit dem Ausgangssignal des PI-Reglers wird der Transistor gesteuert, der seinerseits den Strom in der Stromschleife vorgibt. Der Strom in der Stromschleife wird mithilfe des Shunts und des I/U-Wandlers gemessen und auf den PI-Regler und Analogeingang des PIC gegeben. Der PI-Regler macht es möglich, die Regeldifferenz zwischen dem Soll- und Ist-Signal zu beseitigen. Und der PIC hat die Möglichkeit zu kontrollieren, ob der Strom in der Stromschleife mit dem Sollvorgabewert übereinstimmt.

Als interne Spannungsquelle besitzt der BPW-Sensor die +5 V Spannungsversorgung, die als Betriebsspannung für alle elektronischen Sensorbauteile zu Verfügung steht.

Die Stromschleife selbst wird von außen an die Spannungsquelle einer SPS-Steuerung angeschlossen (üblicherweise +24 V Spannung). Und mithilfe eines Shunts wird der Strom der Stromschleife und dadurch die Abnutzung des Bremsbelags an der Förderbandanlage ermittelt.

2.4 Elektronische Bauteile im Kurzüberblick

Im Kapitel 1.2 „Aufgabenstellung und Zielsetzung“ wurde erwähnt, dass alle Komponenten des BPW-Sensors in dem bereits definierten Bauraum angeordnet werden müssen.

Der Innendurchmesser vom Sensorgehäuse beträgt 23 mm. Daher wurde für den Durchmesser der Leiterplatte 21 mm definiert. Im folgenden Bild ist der Umriss der Leiterplatte in Maßstab 1:1 dargestellt.

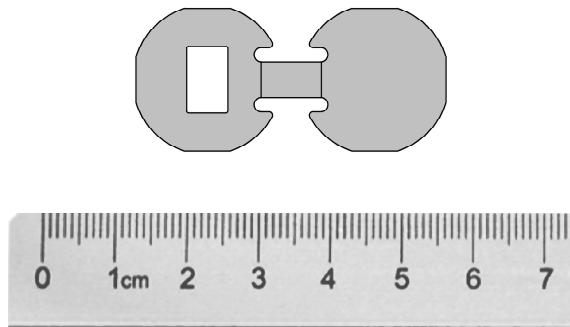


Abbildung 13: Umriss der Leiterplatte [9]

Die Leiterplatte besteht aus zwei Teilen, die durch eine flexible Leiterplatte miteinander verbunden sind.

Mit dem Programm EAGLE Version 4.16r2 wurde der Schaltungsentwurf realisiert und die Leiterplatte in 4-Layer-Technik entworfen. Die Platine wurde bei dem Leiterplattenhersteller GMS Electronic Vertriebs GmbH angefertigt. Die Leiterplatte wurde mit den SMD-Bauteilen und mit dem Steckverbinder bestückt.

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

In der folgenden Tabelle sind die verwendeten Bauteile aufgelistet.

Bauteil / Funktion	Bezeichnung	Bauform
Kraftsensor	FSS1500NSB	L/B/H: 9/6/3 mm
Instrumentenverstärker	AD623ARM	μ SOIC, 8L
PIC-Mikrocontroller	PIC18F2520	QFN, 28L
I ² C-D/A-Wandler	MAX5812	SOT-23, 6L
PI-Regler	LMV931	SC-70, 5L
I/U-Wandler	INA138NA	SOT-23, 5L
Spannungsversorgung	MAX6035	SOT-23, 3L
Transistor	FMMT491	SOT-23, 3L
Kondensatoren	SMD 0402, 0603, SMCA	0402, 0603, SMCA
Diode	MCL4148	MicroMELF
Widerstände	SMD 0402	0402
Steckverbinder	Sensor Steckverbinder Serie 713 (M12 x 1)	Flanschstecker, von vorn verschraubbar, tauchlöten, 5-polig

Tabelle 3: Elektronische Bauteile und deren Bauformen [16], [31] – [40]

2.5 BPW-Sensor-Stromverbrauch

In der folgenden Tabelle werden die maximal möglichen Ruhestöme bei der Versorgungsspannung 5 V und der Taktfrequenz des PIC-Mikrocontrollers 1 MHz dargestellt.

Bauteil / Funktion	Bezeichnung	Max. Stromverbrauch
Kraftsensor	FSS1500NSB	1,25 mA
Instrumentenverstärker	AD623ARM	575 μ A
PIC-Mikrocontroller	PIC18F2520	2,3 mA, $F_{osc} = 1$ MHz, RC_RUN mode, INTOSC source
I ² C-D/A-Wandler	MAX5812	130 μ A
PI-Regler	LMV931	230 μ A pro Kanal
I/U-Wandler	INA138NA	60 μ A
Spannungsversorgung	MAX6035	95 μ A
Widerstände	SMD 0402	660 μ A
Gesamtstrom:		ca. 5,3 mA

Tabelle 4: Stromverbrauch von elektronischen Sensorbauteilen [16], [31] – [39]

In der Summe beläuft sich der Stromverbrauch maximal auf 5,3 mA. Nach der Vorgabe soll der Gesamtstrom aber die 4 mA Stromgrenze nicht überschreiten. Dieser Fall stellt jedoch einen Worst-Case-Szenario dar. In der Praxis wird diese Stromgrenze aber nicht überschritten.

Sollte die 4 mA Stromgrenze dennoch überschritten werden, so ist es immer noch möglich den Sensorstromverbrauch zu reduzieren. Die Taktfrequenz des PIC hängt mit den Umschaltverlusten und daher mit dem Stromverbrauch proportional zusammen. Deshalb ist es möglich, z. B. den PIC auf 500 kHz herunter zu takten, um den Stromverbrauch des PIC zu senken. Somit bleibt das Nutzsignal des BPW-Sensors von 4 mA bis 20 mA nicht beeinträchtigt.

2.6 Elektronische Bauteile

2.6.1 FSS-Kraftsensor

Die FSS-Kraftsensoren verbinden ein hohes Maß an Genauigkeit mit robusten Leistungseigenschaften. Zu den typischen Anwendungsbereichen zählen medizinische Geräte sowie eine Vielzahl von industriellen Bereichen. Die Eckdaten der Sensoren für OEM-Anwender sind: Kraftmessbereich von 0 bis 1500 g, Einsatzbereich von – 40 bis +70 °C, eine Überlastfestigkeit von 4500 g und ein SMT-Gehäuse mit den Maßen 9 x 6 x 3 mm.

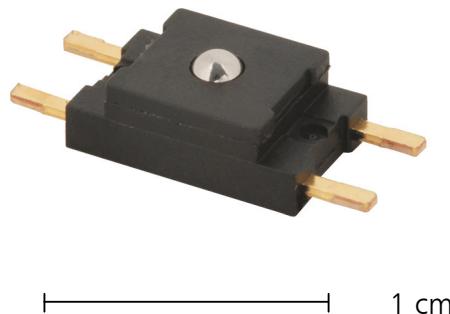


Abbildung 14: FSS-Kraftsensor [12]

Der Kraftsensor stellt eine Widerstandsbrücke (Wheatstone-Messbrücke mit DMS) dar.

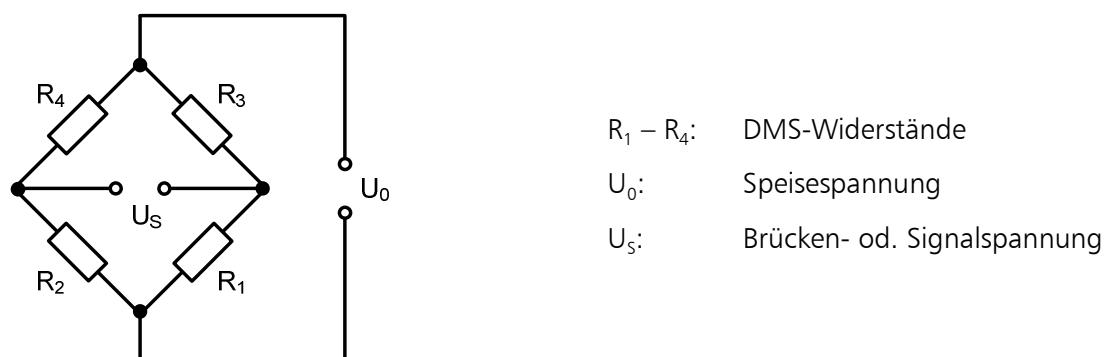


Abbildung 15: DMS-Widerstandsbrücke im FSS-Kraftsensor [13]

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

In der folgenden Tabelle sind die technischen Daten für den FSS-Sensor FSS1500NSB der Firma Honeywell dargestellt.

Eigenschaft	Wert
Empfindlichkeit	0,10 mV/g min., 0,12 mV/g typ., 0,14 mV/g max.
Betriebskraft	0 – 1500 g
Betriebsspannung	5,0 V _{DC} typ., 6,0 V _{DC} max.
Null-Offset	±15 mV
Linearität	±1,5 % Spannweite
Null-Verschiebung, max. Temperatur	±0,5 mV typ.
Empfindlichkeits- Änderung, max. Temperatur	±5,5 mV typ.
Eingangswiderstand	4,0 kOhm min., 5,0 kOhm typ., 6,0 kOhm max.
Ausgangswiderstand	4,0 kOhm min., 5,0 kOhm typ., 6,0 kOhm max.
Überlastfestigkeit	4500 g
elektrostatische Entladung	8 kV
Betriebstemperaturbereich	– 40 °C bis 85 °C [– 40 °F bis 185 °F]
Vibration	10 Hz bis 2 kHz, 20 g, Sinus
mechanischer Schock	150 g, 6 ms, Halbsinus

Tabelle 5: Technische Daten für den FSS-Sensor [31]

2.6.2 Instrumentenverstärker

Der AD623 ist ein integrierter Instrumentenverstärker, der die Rail-To-Rail-Eingänge besitzt und bei der unipolaren Betriebsspannung zwischen +3 V und +12 V arbeiten kann. Die Instrumentenverstärker mit Rail-To-Rail-Eingängen können die Eingangsspannungen bis zur Versorgungsspannung verzerrungsfrei verarbeiten.

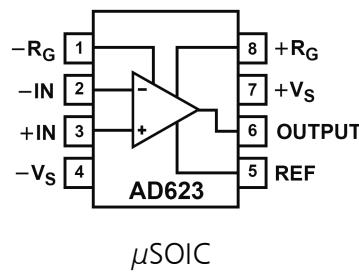


Abbildung 16: Pinbelegung vom Instrumentenverstärker AD623 [15]

In der folgenden Tabelle sind die technischen Daten für den AD623 dargestellt.

Eigenschaft	Wert
Bipolare Betriebsspannung	$\pm 6,0 \text{ V}$
Interne Verlustleistung	650 mW
Differentiale Eingangsspannung	$\pm 6,0 \text{ V}$
Betriebstemperaturbereich (A)	-40 °C bis 85 °C [-40 °F bis 185 °F]

Tabelle 6: Technische Daten für den AD623 [15]

Der AD623 erlaubt den Verstärkungsfaktor mit dem externen Widerstand R_G zu setzen. Ohne Außenwiderstand wird der AD623 für den Verstärkungsfaktor $G = 1$ konfiguriert und mit einem Außenwiderstand kann der AD623 für Verstärkungsfaktoren G bis zu 1000 programmiert werden.

Das Differenzsignal am Ausgang des AD623 ist

$$V_o = \left(1 + \frac{100k\Omega}{R_G}\right) \cdot V_c \quad (2)$$

V_c : Differenzsignal am Eingang

V_o : Differenzsignal am Ausgang

R_G : externer Widerstand zum Setzen des Verstärkungsfaktors G

Die 100 kOhm in der Formel kommen wegen innerer Beschaltung des AD623 vor.
Der Verstärkungsfaktor G nach der Formel 2 ist

$$G = \frac{V_o}{V_c} = \left(1 + \frac{100k\Omega}{R_G}\right) \quad (3)$$

und wird durch den externen Widerstand R_G definiert. Wenn R_G nicht angeschlossen ist, dann ist der Verstärkungsfaktor $R_G = \infty$, dann ist Verstärkungsfaktor $G = 1$.

Je nach Verstärkungsfaktor G kann der externe Widerstand R_G aus der Formel 3 ausge-rechnet werden.

$$R_G = \frac{100k\Omega}{G-1} \quad (4)$$

2.6.3 PIC-Mikrocontroller

Die PIC-Mikrocontroller sind robuste Mikrocontroller mit geringem Befehlssatz (RISC). Sie sind dafür gedacht, einfache digitale und logische Signale, die an ihren Pins angelegt werden, zu verarbeiten. Die dazu nötigen Komponenten sind integriert (10-Bit A/D-Wandler, Timer, I²C-Port, BOR).

Es existieren verschiedene PIC-Familien wie z. B. PIC10Fxxx, PIC16xxx, PIC18Fxxxx, dsPIC30Fxxx. Es soll auf dem PIC ein FrameWORK laufen und das Bauteil in den bereits definierten Bauraum passen. Außerdem soll es möglich sein, die Kalibrierparameter ins EEPROM zu speichern.

Daher sind die wesentlichen Merkmale in erster Linie die Programmspeichergröße, EEPROM und Gehäusegröße.

PIC- μController	Flash, words/ bytes	RAM, bytes	EEPROM, bytes	Bauform	Maße, L/ B/ H, mm
PIC10F206	512 x 12 words	24	–	SOT-23, 6L	3/ 3/ 1
PIC16F59	2048 x 14 words	134	–	TQFP, 44L	12/ 12/ 1
PIC18F2420	16 kByte	768	256	QFN, 28L	6/ 6/ 1
PIC18F2520	32 kByte	1536	256	QFN, 28L	6/ 6/ 1
PIC18F2585	48 kByte	3328	1024	SOIC, 28L	18/ 10/ 2
dsPIC30F3014	24 kByte	2048	1024	QFN, 44L	8/ 8/ 1
dsPIC30F6014	144 kByte	8192	4096	TQFP, 64L	12/ 12/ 1

Tabelle 7: Technische Daten von μControllern aus der PIC-Familie [16], [22] – [26]

Das EEPROM ist erst ab der PIC18Fxxxx-Familie vorhanden. Daher bleiben die beiden PIC-Familien PIC10Fxxx und PIC16xxx ganz außer Betracht. Das FrameWORK in dem Projekt nimmt knapp 32 kByte des Programmspeichers (Flash) und knapp 1536 Byte des Datenspeichers (RAM) in Anspruch (ca. 99 %). Da der PIC18F2420 nur 16 kByte Flash besitzt, ist er von daher ungeeignet. Aufgrund der Speichergröße entfällt der dsPIC30F3014 auch. Wegen der Gehäusegröße L/B/H: 12/12/1 mm ist der dsPIC30F6014 ebenso nicht verwendbar. Der dsPIC30F3014 reicht wegen seinem zu geringen Flash-Speicher nicht aus.

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Der PIC18F2585 passt zwar von dem Speicherplatz her, hat aber die Bauform SOIC, 28L und lässt sich dadurch auf der Sensorleiterplatte nicht einbauen. Es wird der PIC18F2520 für das Projekt gewählt.

In der folgenden Tabelle sind einige wichtige Eigenschaften des PIC18F2520 dargestellt.

Eigenschaft	Wert
Programmspeicher; Flash	32 kByte
Programmspeicher; Befehle	16384
Datenspeicher; SRAM	1536 Byte
Datenspeicher; EEPROM	256 Byte
Betriebsspannungsbereich	2,0 V bis 5,5 V
Programmierspannung V_{PP}	12 V
Betriebsfrequenz	Bis 40 MHz
Interrupt-Quellen	19
Timer	4
Serielle Kommunikation	MSSP, USART
10-Bit A/D-Module	10 Eingangskanäle
Resets	MCLR, POR, BOR, WDT, RESET-Instruktion, Stack Full, Stack Underflow
Gehäusen	28-Pin-PDIP, 28-Pin-SOIC, 28-Pin-QFN

Tabelle 8: Technische Daten für den PIC18F2520 [16]

Für den Einbau auf der Leiterplatte kommt der PIC18F2520 mit dem kleinsten Gehäuse 28-Pin-QFN in Frage.

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

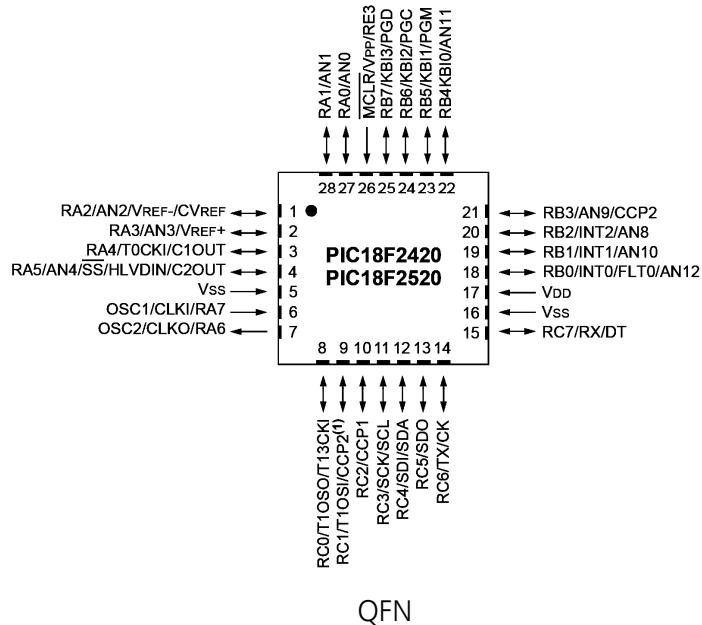


Abbildung 17: Pinbelegung vom PIC18F2520 [16]

In der folgenden Abbildung sind die QFN- und SOIC-Gehäusen von dem PIC18F2520 zu sehen. Die 5-Cent-Münze ist zur Relation dargestellt und hat den Durchmesser 21 mm; genau so wie die Sensorleiterplatte.

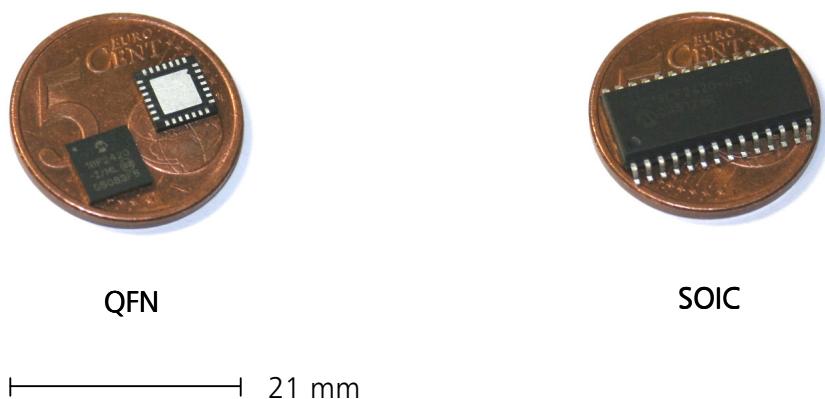
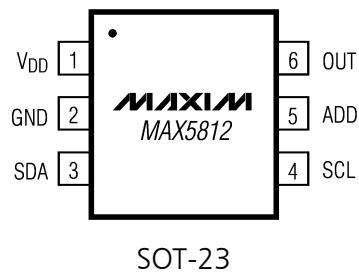


Abbildung 18: QFN- und SOIC-Gehäusen vom PIC18F2520 [9]

2.6.4 I²C-D/A-Wandler

Der MAX5812 ist ein Digital-Analog-Wandler (DAC) mit 12-Bit-Spannungsausgang. Der DAC verfügt über eine I²C-Bus kompatible 2-Draht-Schnittstelle, die bis zu 400 kHz betrieben werden kann. Der MAX5812 verfügt über Rail-to-Rail Ausgänge. Daher kann der Bereich der Ausgangsspannung von 0 V bis zu Referenz- bzw. Versorgungsspannung sein.



SOT-23

Abbildung 19: Pinbelegung vom I²C-D/A-Wandler MAX5812 [17]

In der folgenden Abbildung ist der prinzipielle Aufbau des I²C-D/A-Wandlers dargestellt.

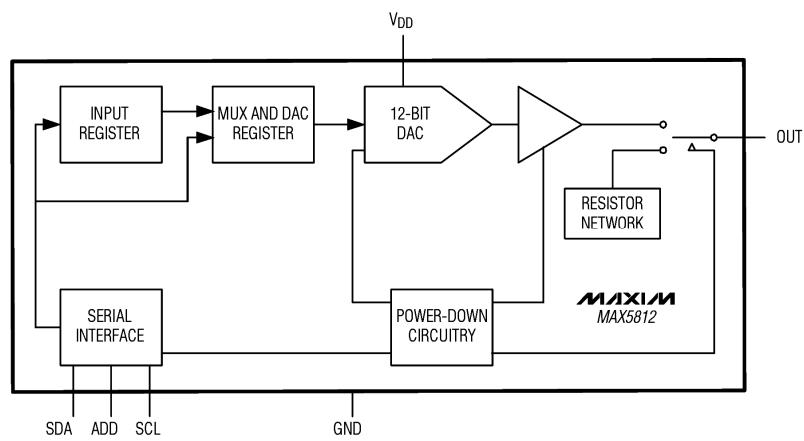


Abbildung 20: Blockschaltbild vom I²C-D/A-Wandler MAX5812 [17]

Brake Pad Wear Sensor

Beim I²C-Bus handelt es sich um eine synchrone serielle 2-Drahtverbindung zwischen einem Master und einer beliebigen Anzahl Slaves. Auf der einen Leitung (SCL) wird der Takt übertragen, die andere Leitung (SDA) dient der Übertragung der Daten. Die Daten können vom Controller zum Slave (schreiben) laufen, oder aber auch vom Slave zum Master (lesen). Der Takt wird dabei aber immer vom Master erzeugt [29].

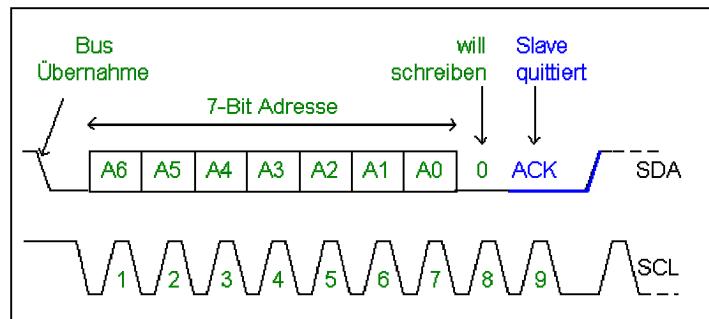


Abbildung 21: SDA und SCL-Signale vom PIC zu MAX5812 [29]

Der PIC18F2520 besitzt eine MSSP-Schnittstelle, die sich als I²C-Interface betreiben lässt. Die MSSP-Hardware unterstützt Master- und Slave-Funktionen.

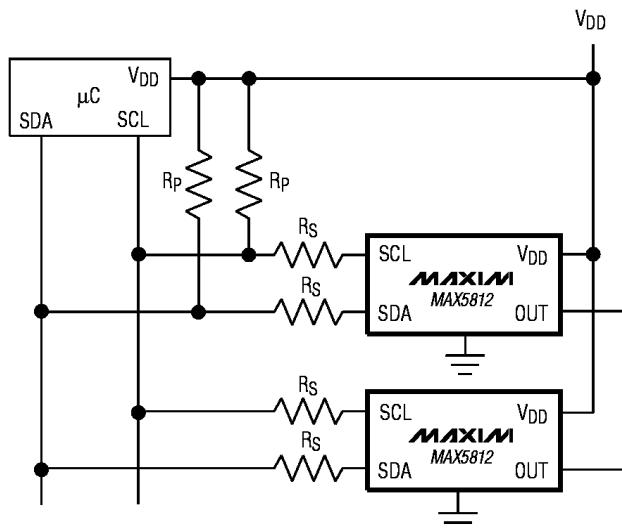


Abbildung 22: Verbindung zwischen dem PIC und I²C-D/A-Wandler MAX5812 [17]

Jeder Datentransfer wird mit der Adressierung eingeleitet, damit geklärt ist, welcher Slave für die Kommunikation mit dem Master bestimmt wurde. Der MAX5812 hat eine 7-Bit Adressierung (7-Bit lange Adresse).

Woher kennt der MAX5812 als Slave seine Adresse? Jeder I²C-Schaltkreis-Typ hat eine feste Adresse, in der aber einige Bits in der Regel über Schaltkreispins festgelegt werden, indem diese Pins fest mit Masse oder Betriebsspannung verbunden werden. Der MAX5812 hat z.B. die Adresse 001000x wobei der Wert von x durch die Pegel an dem Pin 5 (ADD) festgelegt wird.

PART	ADDRESS
MAX5812LEUT	0010 00X
MAX5812MEUT	0010 01X
MAX5812NEUT	0110 10X
MAX5812PEUT	1010 10X

Abbildung 23: Adressenauswahl beim I²C-D/A-Wandler MAX5812 [17]

Ist der Pin 5 mit der Masse verbunden, dann hat der MAX5812 die Adresse 0010000. Ist der Pin 5 mit der Versorgungsspannung verbunden, so hat der MAX5812 die Adresse 0010001.

Die Ausgangsspannung des I²C-D/A-Wandlers setzt sich folgendermaßen zusammen.

$$V_{OUT} = \frac{V_{REF}}{2^N} \cdot D \quad (5)$$

V_{REF} Versorgungsspannung, $V_{REF} = V_{DD} = 5 \text{ V}$

N Bitauflösung, $N = 12 \text{ Bit}$

D Dezimaler Wert des Eingangscodes, $D = (0 \dots 4095)$

V_{OUT} Ausgangsspannung, $V_{OUT} = (0 \dots V_{REF})$

2.6.5 PI-Regler

Ein PI-Regler lässt sich mit einem Operationsverstärker realisieren. Die Widerstände R_1 und R_2 bestimmen die Verstärkung des P-Anteils, der Widerstand R_2 und der Kondensator C_2 bestimmen die Grenzfrequenz des Integrators.

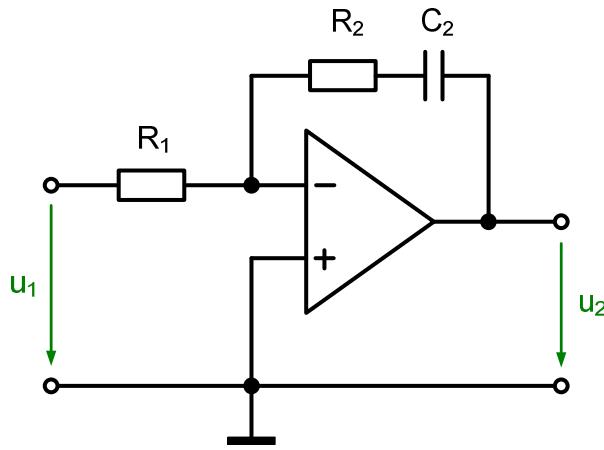


Abbildung 24: PI-Regler mit einem Operationsverstärker [21]

Dieser Regler hat keine bleibende Regelabweichung, da der Restfehler des P-Anteils am Kondensator C_2 integriert wird und nach hinreichender Zeit zu einer Ausregelung führt [30], [41].

Die Übertragungsfunktion des PI-Reglers lautet:

$$G_R(s) = K_{PR} \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_N} \right) = K_{PR} \cdot \left(\frac{1 + sT_N}{sT_N} \right) \quad (6)$$

K_{PR} Proportionalbeiwert des P-Anteils

T_N Nachstellzeit

Die Nachstellzeit T_N ist ein Produkt von Integrierzzeit T_I und Proportionalbeiwert K_{PR} .

$$T_N = T_I \cdot K_{PR} \quad (7)$$

Der Frequenzgang der Übertragungsfunktion lautet:

$$F_R(j\omega) = \frac{u_2(j\omega)}{u_1(j\omega)} = K_{PR} \cdot \left(1 + \frac{1}{j\omega T_N}\right) = K_{PR} \cdot \left(\frac{1 + j\omega T_N}{j\omega T_N}\right) \quad (8)$$

Der Frequenzgang der Schaltung in der Abbildung 24:

$$F_R(j\omega) = \frac{u_2(j\omega)}{u_1(j\omega)} = -\frac{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}}{R_1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{j\omega C_2 R_2} \quad (9)$$

Reglerparameter:

Proportionalverstärkung: $K_{PR} = \frac{R_2}{R_1}$ (10)

Nachstellzeit: $T_N = C_2 \cdot R_2$ (11)

Die Einstellung der Proportionalverstärkung K_{PR} ist von der Nachstellzeit T_N abhängig.

Hier ist die Pin-Belegung von dem OPV dargestellt.

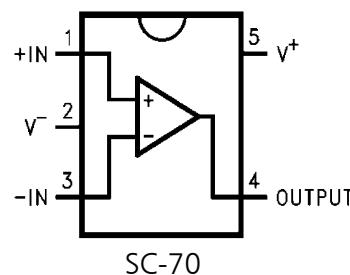


Abbildung 25: Pinbelegung vom OP-Verstärker LMV931 [18]

Brake Pad Wear Sensor

2.6.6 I/U-Wandler

Der INA138NA ist ein Strom-Spannungs-Wandler mit dem niedrigen Ruhestrom in kleinem SOT-23-Gehäuse. Die Betriebsspannung darf im Bereich von 2,7 V bis 36 V liegen. Der Ruhestrom beträgt nur 25 μ A.

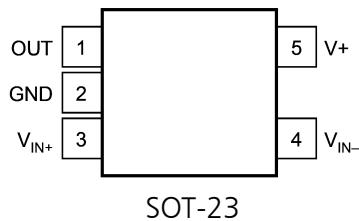


Abbildung 26: Pinbelegung vom I/U-Wandler INA138NA [19]

In der Abbildung 27 wird die Beschaltung vom INA138NA gezeigt. Das Bauelement wandelt erst eine Differenzialeingangsspannung des Shunts zu einem Strom um. Dieser Strom wird danach wieder zu einer Spannung auf einem Außenwiderstand umgewandelt. Mit dem Außenwiderstand kann jede Verstärkung von 1 bis mehr als 100 vorgegeben werdenen.

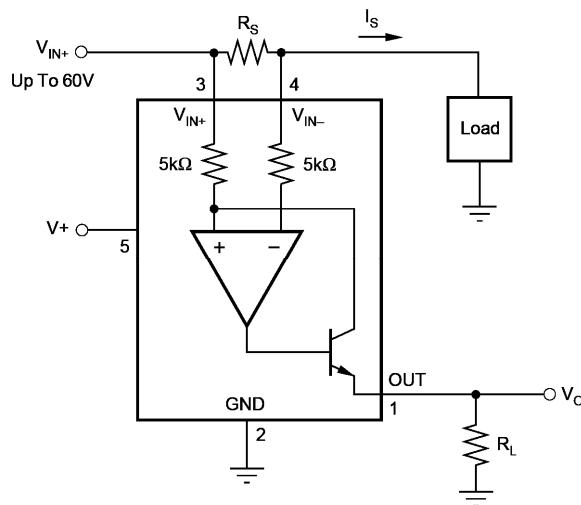


Abbildung 27: Beschaltung vom I/U-Wandler INA138NA [19]

Brake Pad Wear Sensor

Die zwei externen Widerstände R_S und R_L bestimmen den Wandlerfaktor, der das Verhältnis zwischen dem Strom I_S und der Ausgangsspannung V_0 definiert.

$$V_0 = \frac{R_S \cdot R_L}{5k\Omega} \cdot I_S \quad (12)$$

Die 5 kOhm in der Formel kommen wegen innerer Beschaltung des I/U-Wandlers vor.

Die Betriebstemperatur liegt im Bereich von – 40 °C bis + 125 °C.

2.6.7 Spannungsversorgung

Der MAX6035 ist eine Präzisionsspannungsquelle. Der MAX6035 wird oft in seinen Anwendungen mit der Industrie-Standard-Stromschleife eingesetzt. Dieses Bauteil ist im SOT-23-Gehäuse mit Ausgangsspannungsoptionen 2,5 V, 3,0 V, und 5,0 V verfügbar.

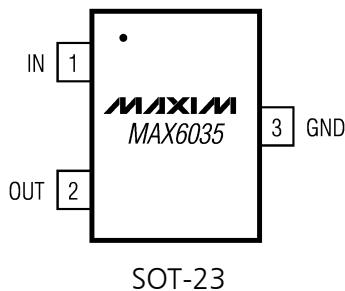


Abbildung 28: Pinbelegung von der Spannungsversorgung MAX6035 [20]

Die Betriebsspannung darf bis 33 V sein. Der Ruhestrom beträgt nur 95 μ A. Der Temperaturkoeffizient beträgt maximal 25 ppm/ $^{\circ}$ C. Somit beläuft sich die Abweichung der Ausgangsspannung maximal auf $\pm 0,2\%$.

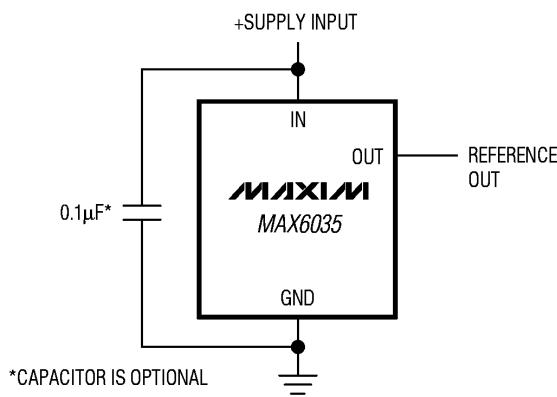


Abbildung 29: Beschaltung vom MAX6035 [20]

Brake Pad Wear Sensor

Der Kondensator am Eingang des Bauelements ist optional.

In der Abbildung 30 sind die Strom-Spannungs-Kennlinien bei verschiedenen Temperaturen zu sehen.

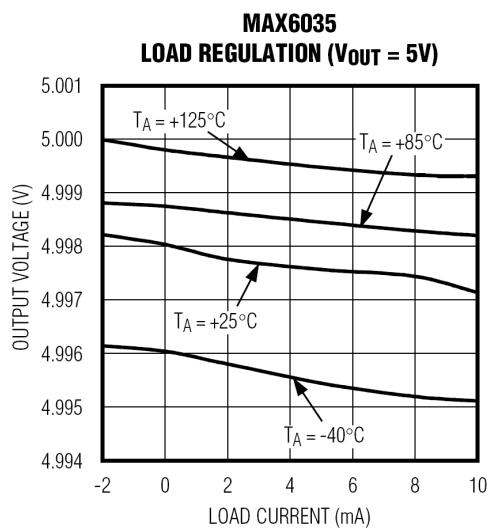


Abbildung 30: Strom-Spannungs-Charakteristik vom MAX6035 [20]

Bei der Temperatur $+25^\circ C$ ohne Last beträgt die Ausgangsspannung 4,998 V. Beim Strom von 4 mA gibt das Bauelement die Ausgangsspannung 4,9956 V aus. Somit beläuft sich die Abweichung auf 0,048 %, aufgerundet 0,1 %, der Leerlaufspannung.

Die Betriebstemperatur liegt im Bereich von $-40^\circ C$ bis $+85^\circ C$.

2.6.8 Steckverbinder

Der BPW-Sensor braucht mindestens zwei Drähte der Stromschleife, zwei Leitungen RX/TX für die serielle Kommunikation und eine Ground-Leitung. Durch die zwei Drähte der Stromschleife findet sowohl die Signalübertragung als auch die Spannungsversorgung statt. Mithilfe der seriellen Schnittstelle wird die PIC-Parametereingabe bzw. -ausgabe ermöglicht.

Als Steckverbinder für den BPW-Sensor wurde ein 5-poliger Flanschstecker mit der M12-Verschraubung des Herstellers Franz Binder GmbH ausgewählt.



Abbildung 31: Binder-Steckverbinder, Serie 713 [40]

Der Stecker wird auf der Sensor-Leiterplatte eingelötet und somit mit dieser fest mechanisch verbunden. Der eingelötete Stecker stellt mit der Sensorelektronik eine Baugruppe dar. Da der Stecker von vorn verschraubar ist, kann der Einbau der Sensorelektronik mit dem darauf eingelöteten Stecker in das Sensorgehäuse in einem Arbeitsschritt erfolgen.

2.7 Elektronik-Baugruppe des BPW-Sensors

2.7.1 EAGLE-Entwicklungsumgebung

Der EAGLE Schaltplan- und Layout-Editor ist ein einfach zu benutzendes, aber dennoch leistungsfähiges Werkzeug für die Entwicklung von Leiterplatten. Der Name EAGLE ist ein Akronym und steht für Einfach Anzuwendender Grafischer Layout Editor [3].

Das Programm besteht aus drei Haupt-Modulen:

- Layout-Editor
- Schaltplan-Editor
- Autorouter

die unter einer einheitlichen Benutzeroberfläche zusammengefügt sind. Daher ist es nicht notwendig, Netzlisten zwischen Schaltplan und Layout zu konvertieren.

Layout-Editor

- maximale Zeichenfläche 1,6 x 1,6 m (64 x 64 Zoll)
- Auflösung 1/10000 mm (0,1 Mikron)
- bis zu 16 Signallagen
- bedrahtete und SMD-Bauteile
- umfangreiche Bauteil-Bibliotheken im Lieferumfang
- einfaches Erstellen eigener Bauteile mit dem integrierten Bibliotheks-Editor
- Undo/Redo-Funktion für jedes Editor-Kommando (beliebig tief)
- Script-Dateien für die Ausführung von Befehls-Sequenzen
- Kupferflächen füllen
- Cut- und Paste-Funktion zum Kopieren ganzer Zeichnungsteile
- Design Rule Check

Schaltplan-Editor

- bis zu 999 Blätter pro Schaltplan
- Electrical Rule Check
- Gatter- und Pin-Tausch
- mit einem Befehl kann aus einem Schaltplan eine Platine erzeugt werden

Autorouter

- Ripup&Retry Router
- bis zu 16 Signallagen
- Routing-Strategie durch benutzerdefinierte Kostenfaktoren steuerbar

CAM-Prozessor

- Postscript
- Stift-Plotter
- Gerber-Plotter
- Excellon und Sieb&Meyer Bohrdateien
- über eine ASCII-Datei können eigene Ausgabegeräte konfiguriert werden

In dem Schaltplan soll folgendes Raster eingestellt werden.



Abbildung 32: Das GRID-Dialogfenster für den Schaltplan

Brake Pad Wear Sensor

In dem Layouteditor soll folgendes Raster eingestellt werden.



Abbildung 33: Das GRID-Dialogfenster für das Layout

Im Layout-Editor sind die Design-Regeln in der Menüleiste unter *Bearbeiten → Design-Regeln...* zu definieren. Die Einstellungen für dieses Projekt sind im Anhang 7.4 aufgelistet.

Der Schaltplan und das Layout müssen in EAGLE immer beide geöffnet sein. Sonst bringt EAGLE die Meldung „Schaltung ist nicht mehr mit dem Layout konsistent“.

In EAGLE gelten solche Windows-Tastenkombinationen wie STRG+C für das Kopieren oder STRG+V für das Einfügen nicht. Um die Arbeit mit dem Schaltplan und dem Layout-Editor zu erleichtern bzw. zu beschleunigen, ist es jedoch möglich, eigene Tastenkombinationen für sich zu generieren [42], [43].

Das dazugehörige Fenster ist in der Menüleiste unter *Optionen → Tastenbelegung...* des jeweiligen Editors zu finden. Die Tastenkombinationen sind für den Schaltplan-Editor und für den Layout-Editor zu erstellen.

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

In folgenden zwei Abbildungen sind mögliche Tastenkombinationen für am häufigsten benutzte Befehle dargestellt.

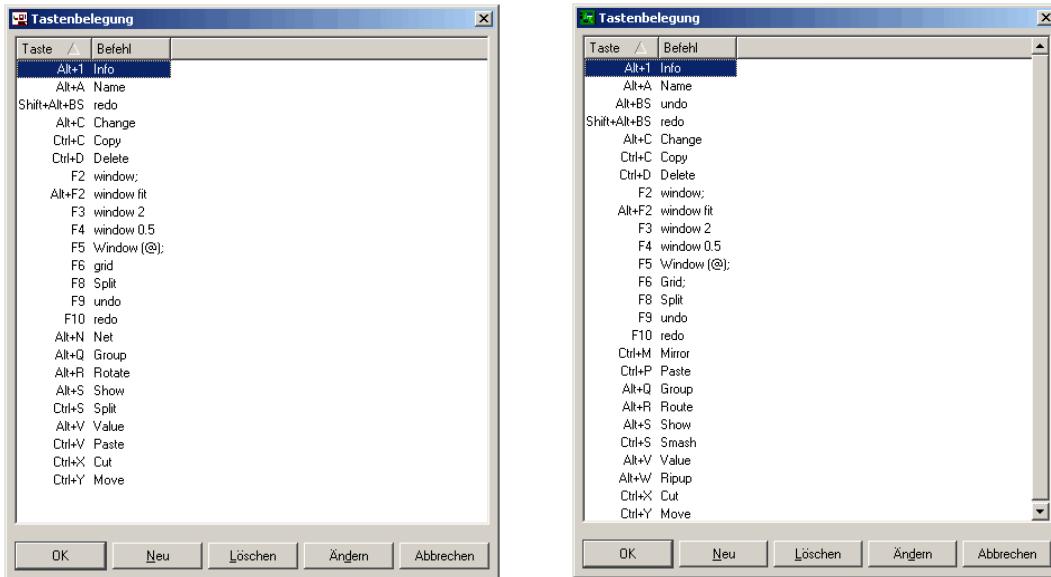


Abbildung 34: Tastenbelegung im Schaltplan- und Layouteditor

Hier sind die Befehle aufgeführt, die am häufigsten gebraucht werden.

Befehl	Handlungssequenz
Kopieren Bauteil	Copy, LM
Kopieren Baugruppe	Group, Cut, LM , Paste
Löschen Bauteil	Delete, LM
Löschen Baugruppe	Group, Delete, RM
Schieben Bauteil	Move, LM
Schieben Baugruppe	Group, Move, RM

LM: Linke Maustaste, RM: Rechte Maustaste

Tabelle 9: Befehle und deren Handlungssequenzen in EAGLE [42]

2.7.2 BPW-Sensor-Schaltplan

Der Kraftsensor IC400 im Schaltplan (siehe Abbildung 35 bzw. Anhang 7.2, Blatt 1) stellt eine Widerstandsbrücke (Wheatstone-Messbrücke mit DMS) dar.

Der Kondensator C400 ist ein Entstörungskondensator, der eventuelle Störeinwirkungen auf das Nutzsignal entfernt. Darüber hinaus werden an alle IC-Spannungsversorgungspins zusätzliche Entstörungskondensatoren angebracht. Dadurch können die Störeinwirkungen stark reduziert werden.

Der Verstärkungsfaktor des Instrumentenverstärkers IC401 G wird durch den Widerstand R400 (6,2 kOhm) definiert und beläuft sich auf 17.

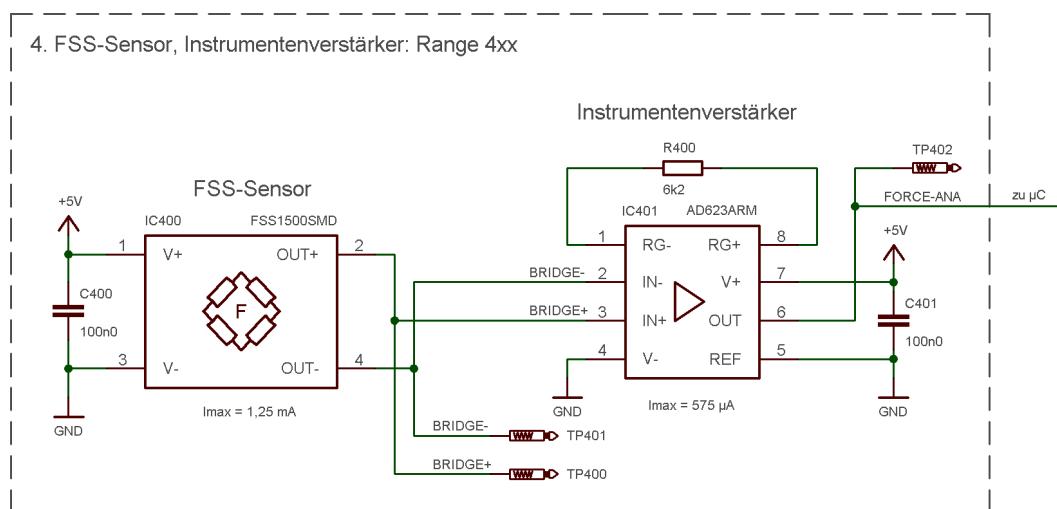


Abbildung 35: FSS-Sensor und Instrumentenverstärker

In der Schaltung für das A-Muster war der Instrumentenverstärker mit dem externer Widerstand 3,6 kOhm vorgesehen. Nach der Formel 3 entspricht das dem Verstärkungsfaktors $G = 28,8$. Bei diesem Verstärkungsfaktor geht der AD623 schon bei der Position 18 mm frühzeitig in die Sättigung.

Brake Pad Wear Sensor

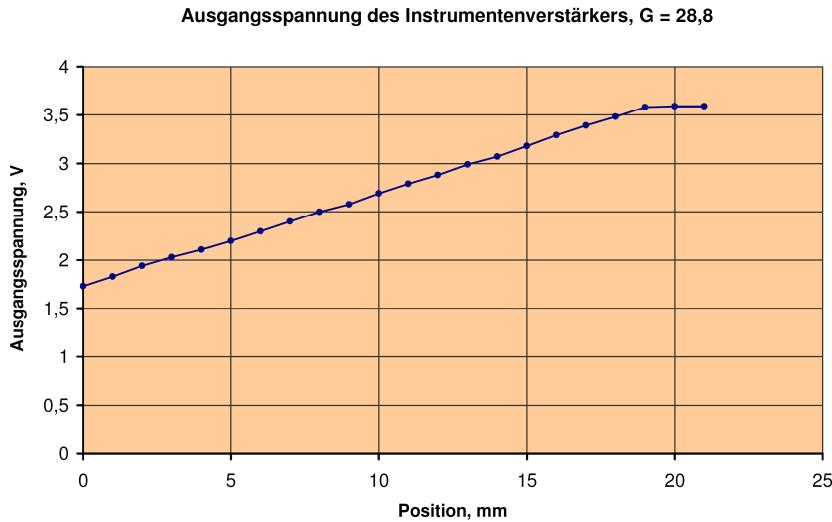


Abbildung 36: Ausgangsspannung des AD623 bei G = 28,8

Die neue Berechnung ergibt Folgendes. Die maximal zulässige Spannung am FSS-Sensor $U_{\max \text{ FSS}}$ berechnet sich als Produkt der maximalen Empfindlichkeit und maximalen Betriebskraft (siehe Tabelle 5).

$$U_{\max \text{ FSS}} = 0,14mV/g \cdot 1500g = 0,21V$$

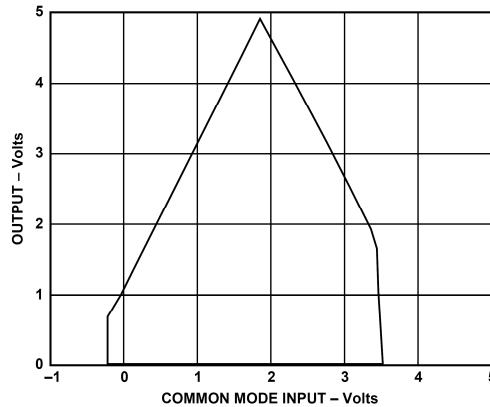
Die maximale Ausgangsspannung des AD623 ist von dem sog. Common Mode abhängig. Common Mode wird im Datenblatt vom AD623 [15, S. 15] wie folgt definiert.

$$U_{CM} = \frac{U_{IN}^- + U_{IN}^+}{2} \quad (13)$$

Die Spannungen U_{IN}^- und U_{IN}^+ sind auf die Masse bezogene Potentiale an dem invertierenden und nicht invertierenden Eingang des Instrumentenverstärkers. Die Common Mode Spannung U_{CM} bei der unipolaren Betriebsspannung $V_S = 5V$ beträgt 2,5 V.

Brake Pad Wear Sensor

Hier ist die Ausgangsspannung des AD623 in seiner Abhängigkeit von der Common Mode Spannung grafisch dargestellt.



$$G \geq 10, V_s = 5 \text{ V}, R_L = 100 \text{ k}\Omega$$

Abbildung 37: Maximale Ausgangsspannung des AD623 [15]

Aus der Grafik in der Abbildung 37 ist zu entnehmen, dass die maximale Spannung für den AD623 $U_{\max AD} = 3,6V$ ist.

Die maximal zulässige Verstärkung des AD623 beträgt:

$$G_{\max} = \frac{U_{\max AD}}{U_{\max FSS}} = \frac{3,6V}{0,21V} = 17$$

Der externe Widerstand wird nach der Formel 4 wie folgt berechnet:

$$R_G = \frac{100k\Omega}{G_{\max} - 1} = \frac{100k\Omega}{17 - 1} = 6,25k\Omega$$

Aus der E-Reihe E24 wurde der nächst liegende Widerstand mit 6,2 kOhm gewählt.

Brake Pad Wear Sensor

Somit wird das amplitudenmäßig angepasste Signal auf den Analogeingang des PIC- μ Controllers IC500 weitergegeben. Der Analogeingang des PIC hat einen 10-Bit-A/D-Wandler, der das Signal mit einer 2^{10} -Auflösung digitalisiert. Der PIC- μ Controller schickt dem DAC IC200 per I²C-Schnittstelle einen Spannungswert. Der DAC wandelt ihn um und gibt mit seiner Ausgangsspannung schließlich den Strom in der Stromschleife vor. Die DAC-Ausgangsspannung geht auf den Spannungsteiler R202 – R203 und dann auf den PI-Regler (Baugruppe IC201, R204, R205, C202).

Der Strom in der Stromschleife ist auch von dem Stromverbrauch der gesamten Schaltung abhängig. Der Stromverbrauch der Schaltung ist seinerseits nicht konstant. Vor allem ist er von der Temperatur der ICs und Taktfrequenz des Mikrocontrollers abhängig. Je höher die PIC-Taktfrequenz ist, desto höher ist der PIC-Stromverbrauch. Genauso, je höher die Temperatur ist, desto höher ist der Stromverbrauch der ICs.

Der PI-Regler hat die Aufgabe die Signaldifferenz zwischen dem vorgegebenen Soll-Strom und dem Ist-Strom zu beseitigen. Der Ist-Strom wird mit dem U/I-Wandler (Baugruppe IC202, R297, R208) gemessen und auf den PI-Regler weiter gegeben.

In der Schaltung sind verschiedene Pads vorgesehen, die für das Programmieren, serielle Kommunikation und für Testzwecke gedacht sind. In der folgenden Tabelle sind alle in der Schaltung vorhandene Pads beschrieben.

Pad	Belegung / Funktion
TP401, TP400	differentielle Ausgangsspannung am Kraftsensor IC400 (+, -)
TP402	Ausgangsspannung des Instrumentenverstärkers IC401
TP500 - TP503	Testpins an den PIC-Ausgängen 18 - 21
TP504, TP505	I ² C-Bus-Kommunikation (SCL, SDA)
TP601, TP600	RX und TX Leitungen vom UART
TP200	Spannung an dem Spannungsteiler R202 - R203
TP201	Invertierender Eingang des OP-Verstärkers IC201 des PI-Reglers
TP202	Ausgangsspannung des PI-Reglers
TP203	Ausgangsspannung des I/U-Wandlers IC201
TP700 - TP704	PIC-Programmierung (V _{PP} , +5 V, GND, PGC, PGD)

Tabelle 10: Pad-Belegung auf der Leiterplatte

Brake Pad Wear Sensor

Das RC-Glied R500 - C502 generiert für den PIC das Reset-Signal beim Anlegen der Betriebsspannung. Die Diode D500 verhindert den Kurzschluss während an dem Pin 26 die Programmierspannung V_{PP} anliegt.

Die Diode D200 schützt die Schaltung gegen Verpolung beim Anlegen der Betriebsspannung. Der Kondensator C201 dient der Entstörung.

Der IC300 dient der Spannungsversorgung der Schaltung mit +5 V.

Die Stückliste der Bauelemente lässt sich mithilfe eines ULP-Scripts von EAGLE erstellen. Der Script-Dateiname heißt bom.ulp und ist durch die Menüleiste unter *Datei → ULP ausführen...* zu finden. Die Stückliste für den BPW-Sensor befindet sich im Anhang 7.4.

Brake Pad Wear Sensor

2.7.3 BPW-Sensor-Leiterplatte

Die Schaltung wird auf eine Multilayer-Leiterplatte mit der Lagenzahl 4 und der Pressdicke 1,6 mm realisiert. Sie wird folgendermaßen aufgebaut.

Standardaufbau 4-Lagen-ML, Pressdicke ca. 1,55mm

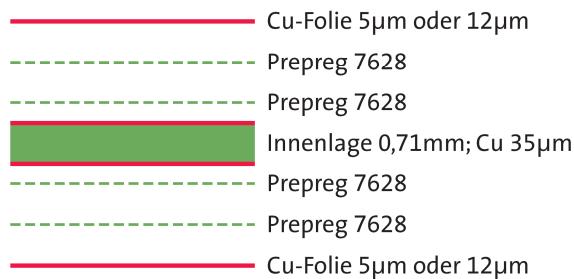


Abbildung 38: Standardaufbau 4-Lagen-Multilayer-Leiterplatte [44]

Damit man mit der Layout-Erstellung anfangen kann, müssen Design-Regeln definiert werden. Es muss die Auswahl getroffen werden, wie viele Layers und welche Dicke die Leiterplatte haben soll, welche Abstände sind zwischen den Leiterbahnen zu setzen sind, Größe der Bohrungen mit der Durchkontaktierungen (Vias), Abstand der Leiterbahnen von dem Leiterplattenrand usw.

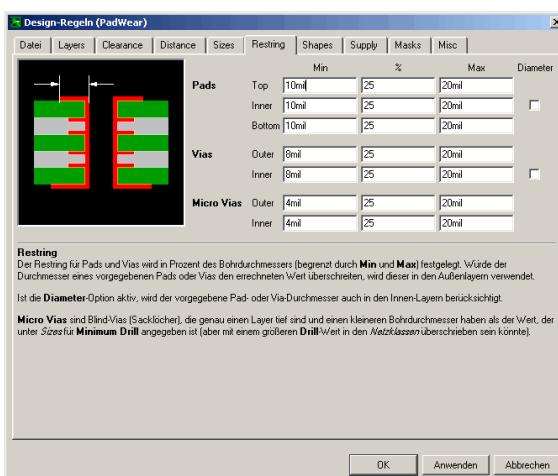


Abbildung 39: Beispiel von Design-Regeln für die Leiterplatte [9]

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Die weiteren Design-Regeln sind im Anhang 7.5 aufgelistet.

Da die Kontakte des FSS-Sensors und seine Unterseite nicht auf einer Ebene liegen (siehe Kapitel 2.6.1, Abbildung 14), wurde in der linken Leiterplatte eine rechteckige Öffnung speziell dafür vorgesehen.

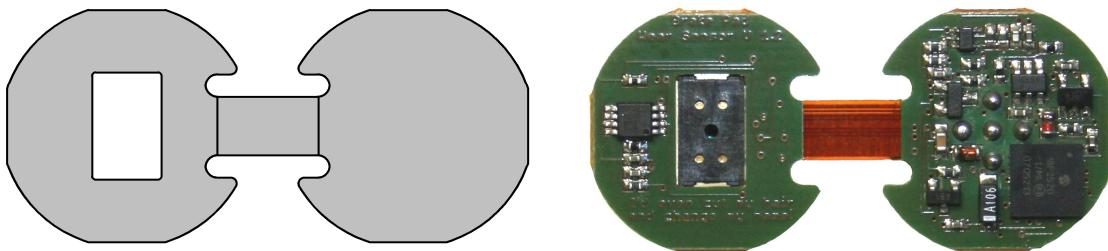


Abbildung 40: BPW-Sensor-Leiterplatte von Oben [9]

Somit kann der FSS-Sensor ohne zusätzlichen Montageaufwand als SMD-Bauteil mit dem Bestückungsautomaten auf der Leiterplatte platziert werden.

Weiterhin ist es notwendig, sowohl den Stecker in der Mitte der Leiterplatte als auch den Mikrocontroller zu platzieren. Da es auf der linken Leiterplatte keinen Platz dafür gibt, kommt die zweite (rechte) Leiterplatte zum Einsatz, verbunden mit der linken mit einer flexiblen Leiterplatte.

Demzufolge besteht die Leiterplatte in unserer Aufgabe aus zwei Teilen, die durch die flexible Leiterplatte miteinander verbunden sind.

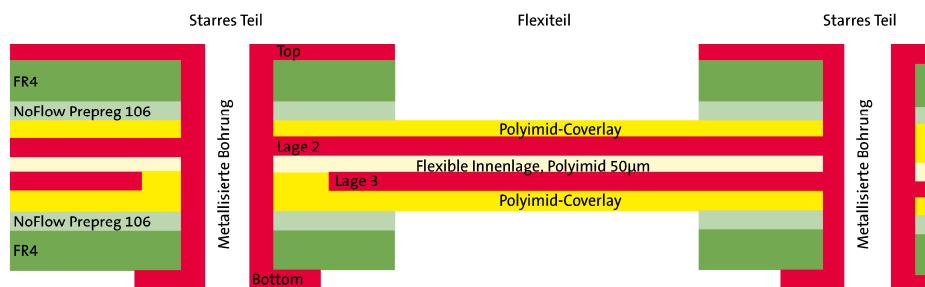


Abbildung 41: Musteraufbau eines 4-Lagen-Multilayers mit flexibler Innenlage [45]

Brake Pad Wear Sensor

Um den BPW-Sensor flashen, parametrieren und eventuell seine Schaltungsfunktionalität prüfen zu können, wurden mehrere Testpunkte vorgesehen. Die Testpunkte sind als sogenannte Pads auf dem Layout realisiert.

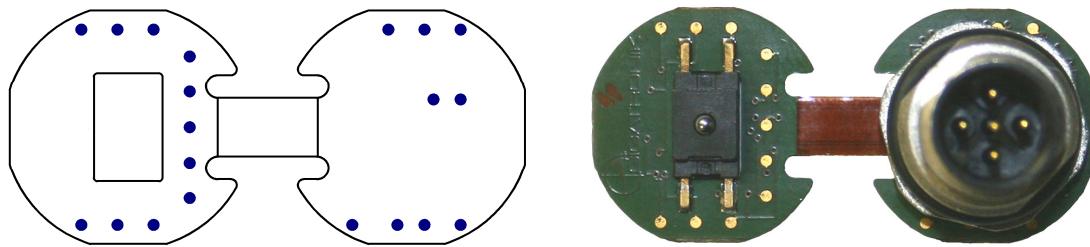


Abbildung 42: Pads auf der Leiterplatte von Unten [9]

Die beiden Platinenhälften werden mittels eines Distanzrings parallel voreinander gehalten.

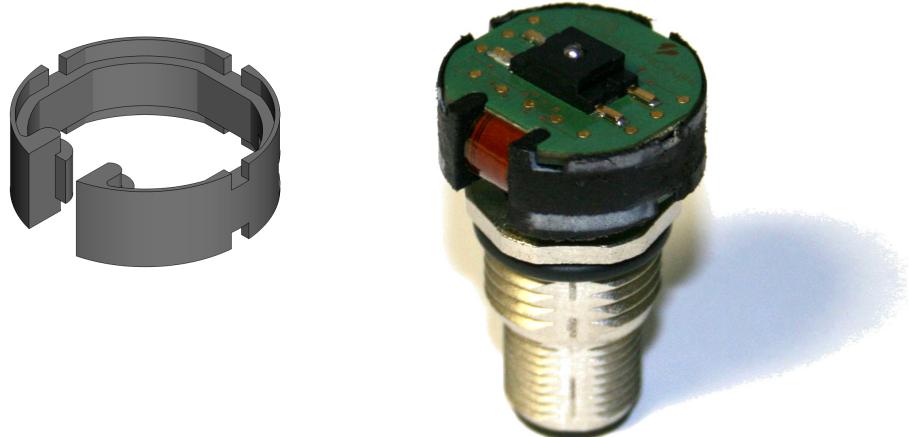


Abbildung 43: Distanzring und Elektronik-Baugruppe [9]

Im Anhang 7.3 sind weitere Layouts und Bestückungspläne zu sehen.

3 BPW-Sensor-Testaufbau

3.1 Testboard

Das Testboard stellt eine Mikrocontroller-gesteuerte elektronische Einheit dar, die verschiedene Test- und Kommunikationsmöglichkeiten anbietet.

Auf dem Testboard sind folgende Funktionalitäten integriert (siehe Abbildung 44):

- Spannungsversorgung +5 V
- Strommessung für den BPW-Sensor
- Strommessung für den LubriSENSor
- Digitale Anzeige der Messergebnisse und Modi (AUTO- oder PROG-Modus)
- USB-Schnittstelle des Testboard- μ Controllers zum PC
- USB-Schnittstelle des BPW-Sensor- μ Controllers zum PC
- Serielle Kommunikation mit dem BPW-Sensor
- One-Wire-Kommunikation mit dem LubriSENSor
- Spannungsversorgung +24 V für den BPW-Sensor und +5 V für den LubriSENSor
- Programmierung des BPW-Sensor- μ Controllers
- Programmierung des Testboard- μ Controllers
- Testpins vom Kraftsensor und Instrumentenverstärker des BPW-Sensors
- Schwarze Funktionstaste:
 - Display-Kontrast –
 - Kalibrierung: lower ledge / upper ledge
- Graue Funktionstaste:
 - Modusumschaltung: AUTO / PROG
 - Display- Kontrast +
- Reset-Taste für den Testboard- μ Controller

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

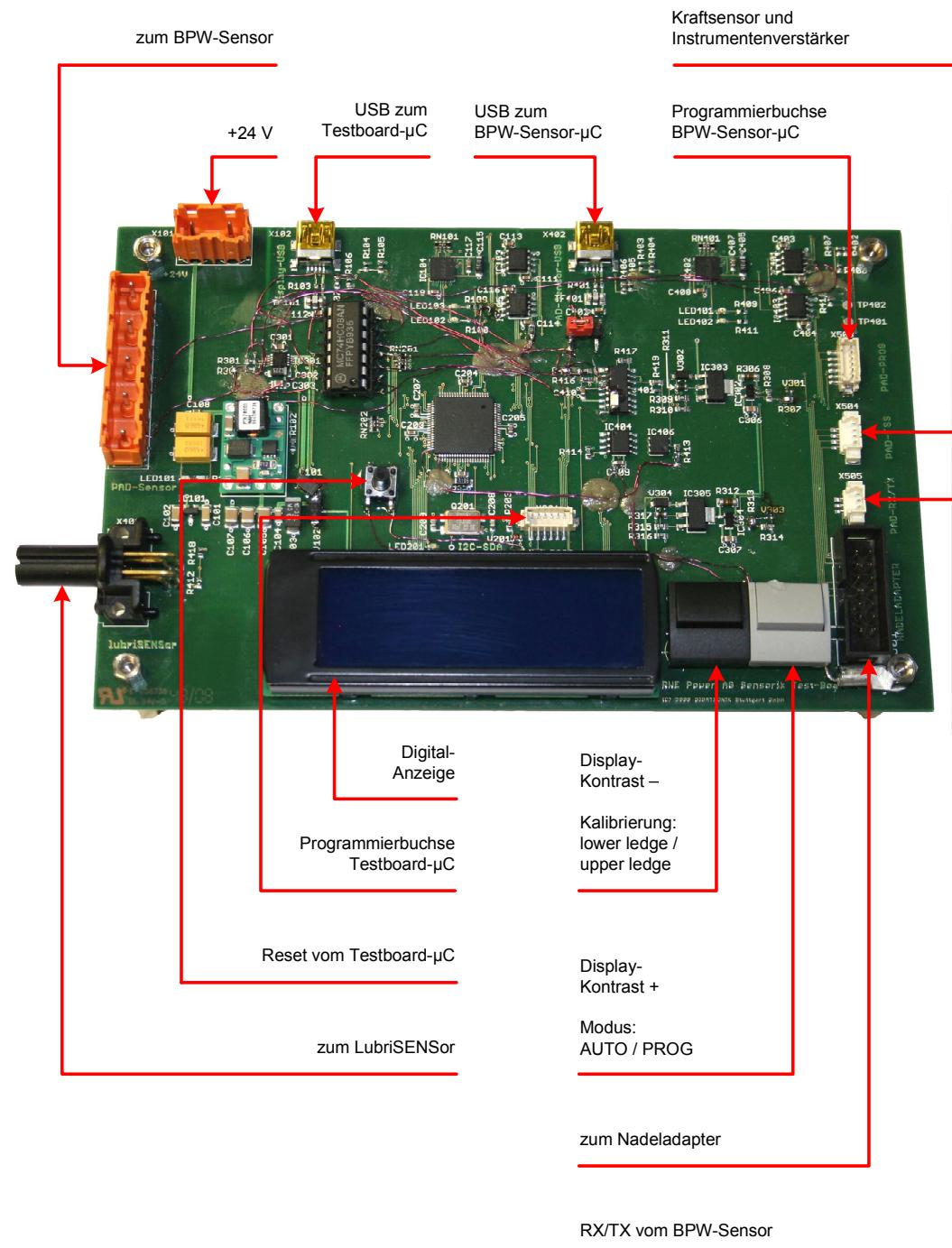


Abbildung 44: Testboard Sensorik V 1.5 interim

Brake Pad Wear Sensor

Mit dem Testboard können zwei Arten von Sensoren aus zwei verschiedenen Projekten geprüft werden: Brake Pad Wear Sensor und LubriSENSor. Sie werden jeweils mit Hilfe von der Steckleiste X401 bzw. der Steckbuchse X403 eingeschlossen (siehe den Schaltplan im Anhang 7.6, Blatt 1 bis 5). Die Buchse X101 ist für die +24 V Spannungsversorgung in Gebrauch. Zur Ausgabe ist die Digitalanzeige LCD301 enthalten.

Zum einen ist auf dem Testboard die USB-Schnittstelle vorhanden, welche für die Kommunikation zwischen dem PC und Testboard zuständig ist, und zum anderen die USB-Schnittstelle für die Kommunikation zwischen dem PC und BPW-Sensor. Mit der Buchse X401 wird für den BPW-Sensor die +24 V Spannungsversorgung zugeführt und serielle Kommunikation (RX/TX-Signale) gewährleistet. Die Steckleisten X201 und X503 sind zum Programmieren bzw. Debuggen jeweils vom Testboard- und BPW-Sensor- μ Controller vorgesehen.

Es gibt auf dem Testboard insgesamt sechs Leuchtdioden. Beim Einschalten leuchtet die blaue LED101, die das Vorhandensein der +5 V Spannung anzeigt. Die rote LED201 blinkt, wenn das Programm auf dem Testboard- μ Controller zyklisch abläuft und nicht hängt. Zusätzlich gibt es noch Leuchtdioden LED108 (grün) und LED103 (rot), die signalisieren, ob gerade Daten auf den Testboard- μ Controller geschrieben bzw. von diesem gelesen werden. Dieselbe Funktion haben die LED401 (grün) und LED402 (rot) für die Kommunikation zwischen dem PC und BPW-Sensor- μ Controller.

Zur Unterbrechung der Kommunikation zwischen dem Testboard- μ Controller und PC kann der Jumper JP2 verwendet werden. Das kann notwendig sein, wenn man per Terminalprogramm nur mit dem BPW-Sensor- μ Controller kommunizieren möchte.

Mit dem Reset-Schalter wird der Testboard- μ Controller zurückgesetzt.

Für Testzwecke kann an der Buchse X504 die Ausgangsspannung vom Kraftsensor und Instrumentenverstärker abgegriffen werden. Durch die Steckbuchse X403 werden für den LubriSENSor die Spannungsversorgung und Kommunikationssignale geleitet.

Mit der Buchse X501 zu dem Nadeladapter X501, verbunden durch das Flachbandkabel, lässt sich den BPW-Sensor- μ Controller programmieren bzw. debuggen.

3.2 Prüfstand zur Programmierung

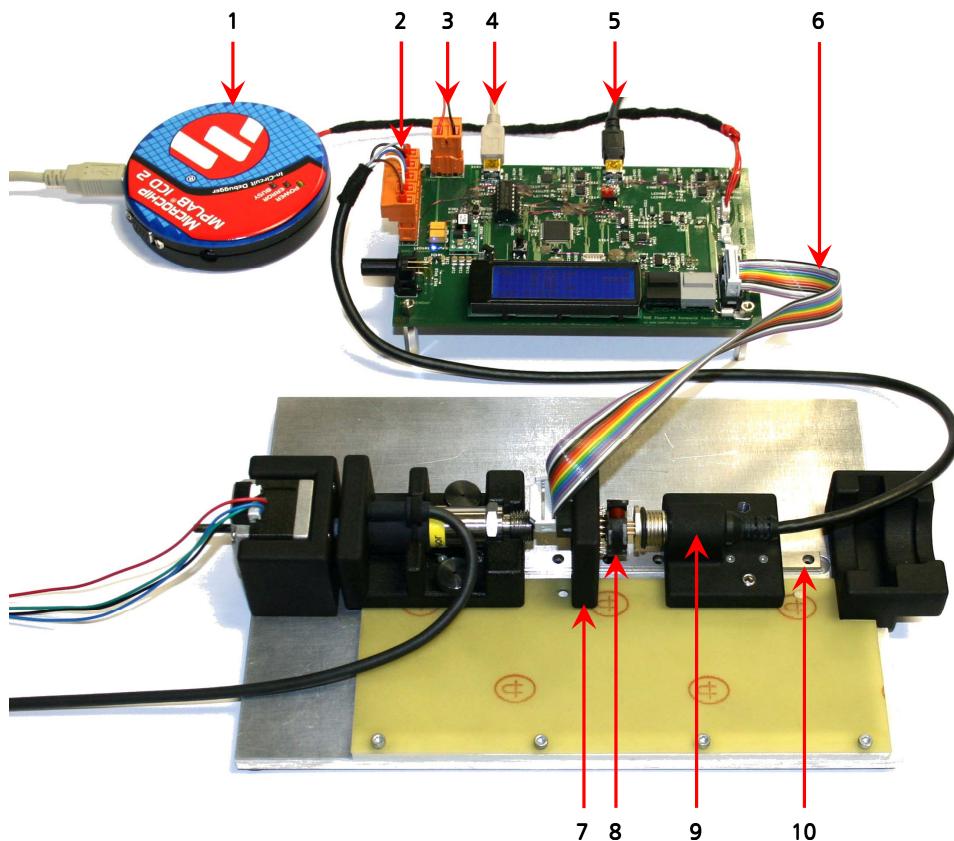


Abbildung 45: Prüfstand zur Programmierung

- | | |
|---|-------------------------|
| 1. PIC-Programmiergerät | 6. Flachbandkablel |
| 2. Steckleiste für den BPW-Sensor | 7. Nadeladapter |
| 3. Buchse für die +24 V Spannungsversorgung | 8. Elektronik-Baugruppe |
| 4. USB-Anschluss für das Testboard | 9. Buchsenhalter |
| 5. USB-Anschluss für den BPW-Sensor | 10. Laufschiene |

Brake Pad Wear Sensor

Der Nadeladapter besitzt elf Nadeln, die die Programmierung (das Flashen) von dem BPW-Sensor- μ Controller und das Abgreifen der anderen Signale (siehe Tabelle 10) ermöglichen.

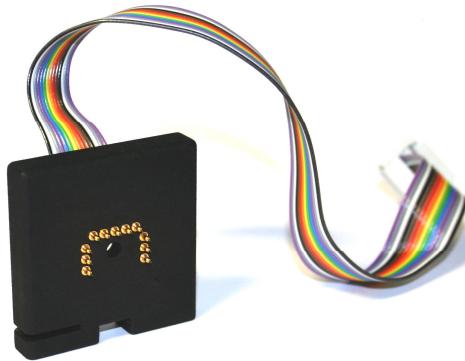


Abbildung 46: Nadeladapter

Der Prüfstand zur Programmierung ist auf einer Grundplatte aufgebaut. Die Grundplatte hat eine Laufschiene. Es gibt zwei Schlitten, welche auf der Laufschiene entlang fahren können. Ein Schlitten ist mit dem Buchsenhalter verbunden. Folglich bewegt sich der Buchsenhalter der Laufschiene entlang. Dadurch ermöglicht der Buchsenhalter ein schnelles und präzises Andocken der Elektronik-Baugruppe an den Nadeladapter.

Die Elektronik-Baugruppe wird in die Buchse des Buchsenhalters eingesteckt und gegen den Nadeladapter gefahren.

Die Nadeln sind gefedert und sichern demzufolge einen guten Kontakt. Wenn der Kontakt hergestellt ist, rastet der Buchsenhalter mit der Elektronik-Baugruppe mithilfe einer Fixationsschraube in eine dafür bestimmte Öffnung ein.

Das Flashen der Software erfolgt aus der MPLAB-Entwicklungsumgebung. Die Datenübertragung auf den Mikrocontroller erfolgt mithilfe des PIC-Programmiergeräts.

3.3 PIC-Programmiergerät

Das PIC-Programmiergerät (kurz MPLAB ICD 2 oder In-Circuit Debugger 2) erlaubt Debugging und Programmierung der PIC- und dsPIC-Mikrocontroller von Microchip. Die ICD (In-Circuit Debug) Technologie vom Hersteller Microchip ermöglicht es, mit dem MPLAB ICD2 geschriebene Programme in die PIC- und dsPIC- μ Controller zu laden, das Programm in Echtzeit auszuführen und die zur Verfügung stehenden Debug-Funktionen von MPLAB zu nutzen: Variablen zu überwachen und Breakpoints (Programmunterbrechungen) im Programm zu definieren (in C oder Assembler Quellcode). Programme können an Unterbrechungspunkten Schritt für Schritt durchlaufen werden. Der MPLAB ICD2 kann ebenso als Programmiergerät für die Programmierung ohne Debug-Funktionen genutzt werden.



Abbildung 47: MPLAB ICD 2 Programmierer/Debugger

Grundsätzlich kann man zwei große Vorteile diesem Gerät und der Technologie nachsagen. Der erste ist das Programmieren des μ Controllers während dieser auf dem Testboard sitzt. Er muss also nicht mehr, wie noch bei vielen Projekten üblich und bekannt, immer vom Sockel geholt und auf ein entsprechendes Programmiergerät gesteckt werden. Der zweite große Vorteil ist das In-Circuit Debuggen. Es ist möglich die Werte von ausgewählten Variablen zur Laufzeit zu beobachten oder Breakpoints zu setzen. Zudem kann man noch jede Codezeile einzeln in Schritten durchgehen. Das Gerät und die Technologie in Zusammenhang mit der Software MPLAB IDE bringen komfortable Vorteile mit in die Entwicklung von Embedded Systems.

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Der MPLAB ICD 2 wird dem PC des Entwicklers und dem Testboard verbunden. Die Kommunikation läuft per USB- oder RS-232-Schnittstelle.



Abbildung 48: Anschlussaufbau mit MPLAB ICD 2

Der MPLAB ICD 2 arbeitet mit der komfortablen Entwicklungsumgebung MPLAB IDE von Microchip zusammen.

Das PIC-Programmiergerät kann mit dem Testboard über einen ICD-Stecker verbunden werden. Der Stecker besitzt zwei Eingabe/Ausgabe-Pins (PGC/PGD), die sowohl für das Debugging als auch für die Programmierung verwendet werden.

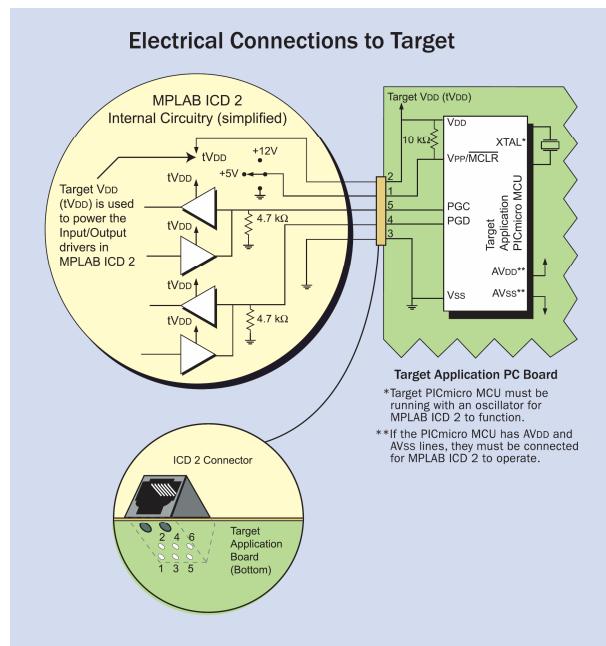


Abbildung 49: Pinbelegung zum PIC-Programmieren

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Der MPLAB ICD 2 braucht 9,0 V Energieversorgung bei einem Strom von 750 mA.

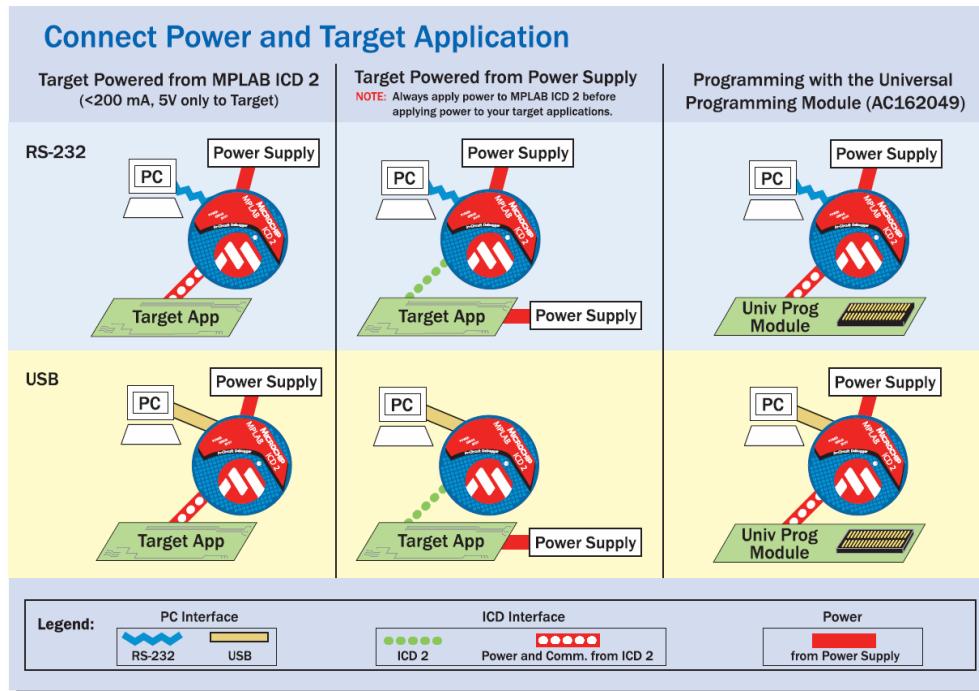


Abbildung 50: MPLAB ICD 2 Spannungsversorgung je nach Applikation

Für die Anwendung mit dem USB-Anschluss und der dem Testboard eigenem Spannungsversorgung ist das Netzgerät nicht notwendig.

3.4 Prüfstand zur Kalibrierung

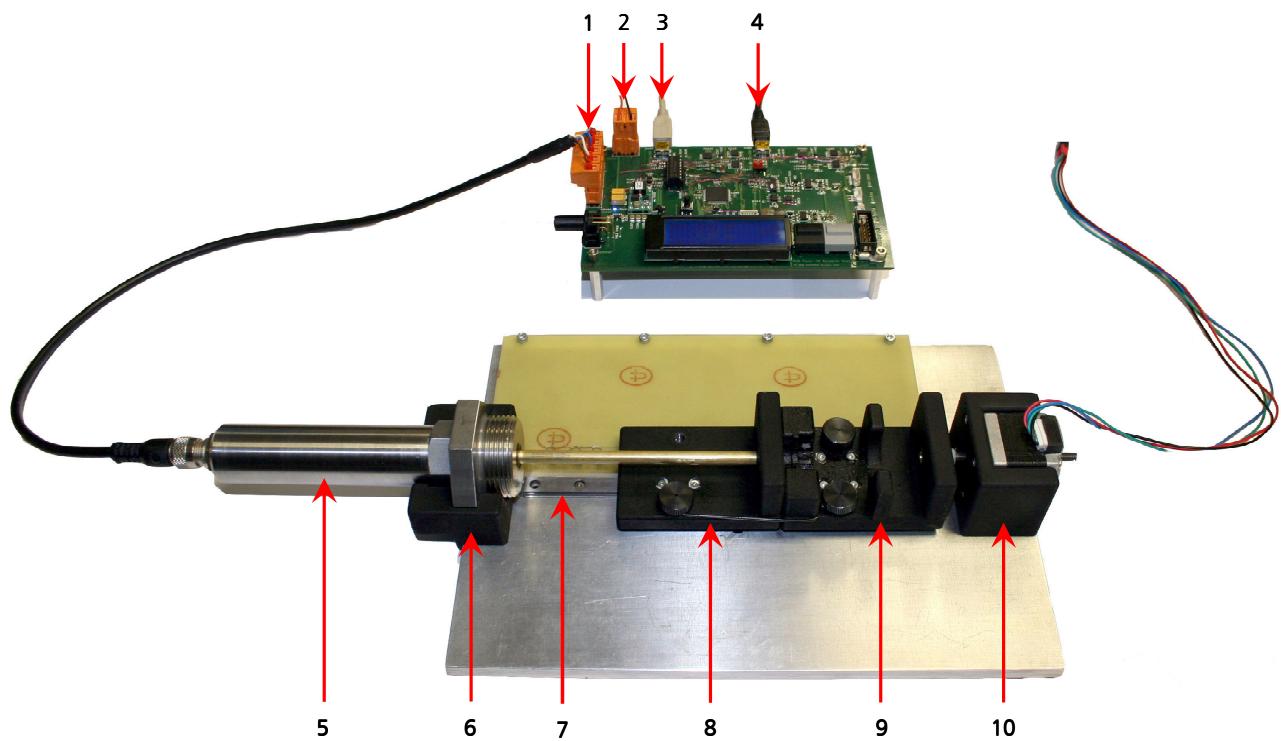


Abbildung 51: Prüfstand zur Kalibrierung

- | | |
|---|-------------------|
| 1. Steckleiste für den BPW-Sensor | 6. Sensorhalter |
| 2. Buchse für die +24 V Spannungsversorgung | 7. Laufschiene |
| 3. USB-Anschluss für das Testboard | 8. Stößelschieber |
| 4. USB-Anschluss für den BPW-Sensor | 9. Weggeber |
| 5. BPW-Sensor | 10. Schrittmotor |

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Der Schrittmotor wird mit einem Motorsteuergerät durch einen MD-CC4-Adapter und das IMS Terminal der Firma Intelligent Motion Systems, Inc. angesteuert.

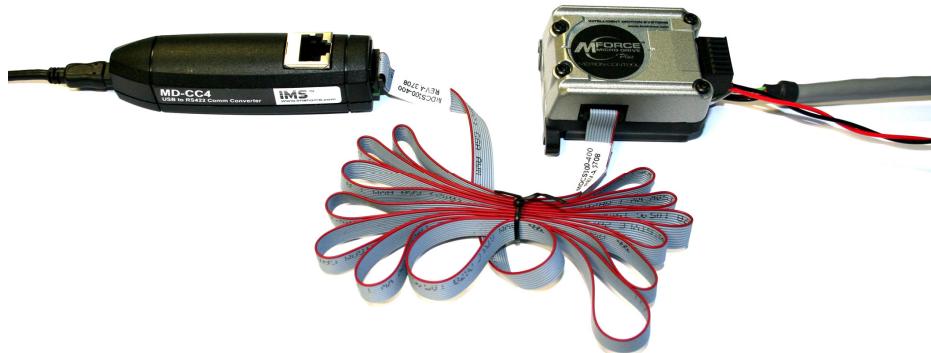


Abbildung 52: MD-CC4-Adapter und Motorsteuergerät

Der Prüfstand zur Kalibrierung ist auf derselben Grundplatte mit der Laufschiene und zwei Schlitten aufgebaut. Der Weggeber ist mit dem Stößelschieber verbunden. Beide können entlang der Laufschiene mit dem Schrittmotor nach links oder rechts gefahren werden. Dadurch ermöglicht die ganze Konstruktion eine schnelle und präzise Wegvorgabe für den BPW-Sensor.

Der BPW-Sensor wird in den Sensorhalter eingelegt. Nach der Vorbereitung, die im Kapitel 3.5 „Bedienungsanleitung zur Kalibrierung“ beschrieben ist, erfolgt die eigentliche Kalibrierung des BPW-Sensors, indem man erst in die Anfangsposition und dann bis zum Anschlag des BPW-Sensor-Stößels fährt.

3.5 Bedienungsanleitung zur Kalibrierung

3.5.1 Bestandteile des Testaufbaus

Es sind folgende mechanischen, elektronischen und softwaretechnischen Bestandteile des Testaufbaus für die Durchführung der Kalibrierung notwendig:

Hardware:

- Prüfstand zur Kalibrierung von BPW-Sensor
- Testboard RWE Power AG Sensorik V1.5 oder höher
- Steuergerät für den Prüfstands-Schrittmotor (Motion Control MForce MicroDrive)
- USB zu RS-422/485 Adapter (MD-CC4)
- BPW-Sensor
- PC

Anschlusskabel:

- Kabel Spannungsversorgung zu Testboard
- Kabel Testboard zu BPW-Sensor
- Kabel Motorsteuergerät zu Schrittmotor
- Kabel Spannungsversorgung zu Motorsteuergerät
- Flachbandkabel Motorsteuergerät zu MD-CC4-Adapter
- Kabel USB zu Mikro-USB für die Kommunikation mit dem Testboard
- Kabel USB zu Mikro-USB für die Kommunikation mit dem BPW-Sensor
- Kabel USB zu Mikro-USB für den MD-CC4-Adapter

Spannungsversorgung:

- Betriebsspannung Testboard: +24 V (Betriebsspannungsbereich: +12 V .. +36 V)
- Betriebsspannungsbereich Motorsteuergerät +12 V .. +48 V

Software:

- Terminalprogramm COMix für das Testboard
- Terminalprogramm COMix für den BPW-Sensor
- Terminalprogramm IMS Terminal für den Prüfstands-Schrittmotor

3.5.2 Vorbereitungen zur Kalibrierung

1. Hardware mit den entsprechenden Kabeln nach der Abbildung 51 anschließen.
2. Spannungsversorgung und PC einschalten.
3. Terminalprogramme starten.
4. Im Geräte-Manager COM-Port-Nummer nachsehen bzw. festlegen. Der Pfad lautet:
Start → Einstellungen → Systemsteuerung → System → Hardware → Anschlüsse (COM und LPT). Durch das Aus- und Einsticken von den USB-Kabeln kann man prüfen welches Gerät an welchem COM-Port angeschlossen ist. Die Festlegung der Port-Nummer erfolgt mit der rechten Maustaste. Der Pfad lautet: *Eigenschaften → Port Setting → Advanced ...*
5. COMix-Einstellungen für das Testboard festlegen:
 - COMix starten
 - Login-Fenster mit OK bestätigen
 - Im Navogationsfenster links den Pfad *Terminal → New* nehmen
 - Fenster „COMix: Select COM port properties“ öffnet sich
 - Port laut Geräte-Manager wählen
 - Transferrate 1250000 baud wählen
 - Echo Off
 - Set & Open
 - DoneIn der Kommandozeile erscheint „RWE TB>“.
6. COMix-Einstellungen für den BPW-Sensor festlegen:
 - COMix starten
 - Login-Fenster mit OK bestätigen
 - Im Explorerfenster links den Pfad *Terminal → New* nehmen
 - Fenster „COMix: Select COM port properties“ öffnet sich
 - Port laut Geräte-Manager wählen
 - Transferrate 9600 baud wählen
 - Echo On
 - Set & Open
 - Done

Brake Pad Wear Sensor

In der Kommandozeile erscheint nichts, weil der Kommandoprompt unterdrückt wurde.

7. IMS Terminal starten
8. Das Fenster „Comm Settings“ öffnen.

Der Pfad lautet: *Edit → Preferences → Comm Settings*.

- COM-Port wählen
- Baud Rate 9600 wählen
- Function Keys auf Enable setzen
- Device uLynx wählen

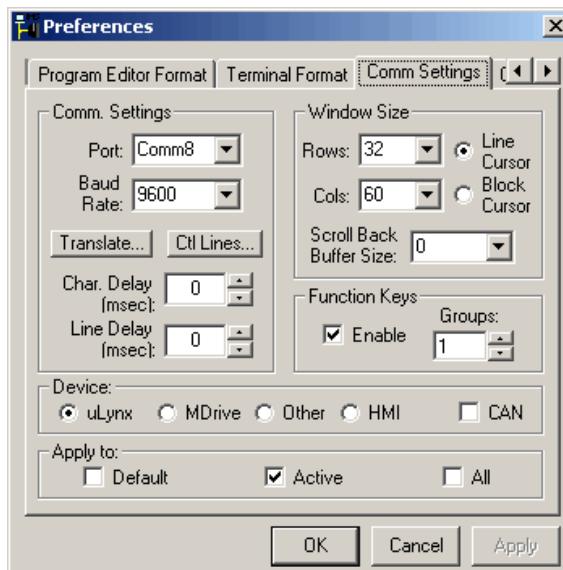


Abbildung 53: Einstellungen im IMS Terminal

9. Verbindung mit dem Motorsteuergerät mit dem Button „Connect Comm. Port“ herstellen.
10. Wenn das Terminalfenster ohne belegte Funktionstasten erscheint, dann folgende Einstellungen zusätzlich durchführen, indem man mit der rechten Maustaste auf eine beliebige Funktionstaste klickt:

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

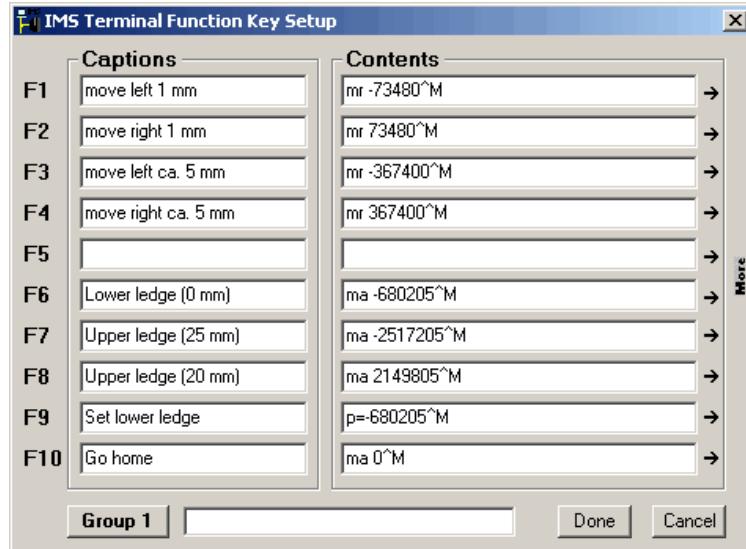


Abbildung 54: Belegung der Funktionstasten im IMS Terminal

11. Nach der Eingabe den Button „Done“ betätigen, dann erscheint folgendes Terminalfenster.

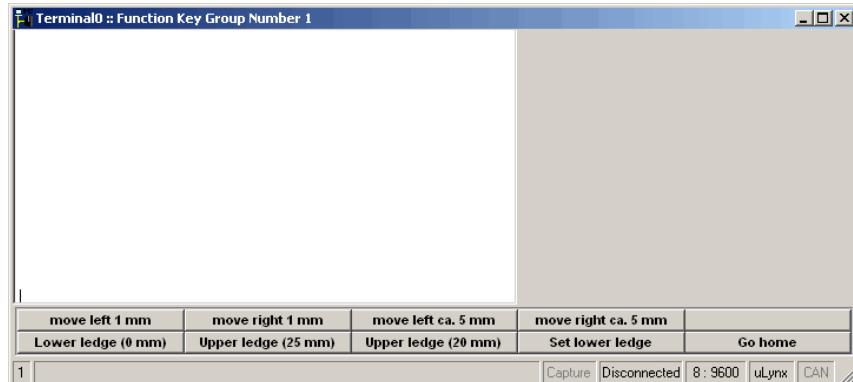


Abbildung 55: IMS Terminalfenster

Die Einstellungen für die Funktionstasten unter dem Pfad *Edit → Save Preferences* speichern. Jetzt ist alles für die Kalibrierung der BPW-Sensoren vorbereitet.

3.5.3 Kalibrierungsablauf

Vor der Kalibrierung muss einmal die „Lower ledge (0 mm)“-Position festgelegt werden. Es wird in diese Position gefahren, indem man in dem IMS Terminal für den Schrittmotor die Buttons „move left 1mm“ oder „move right 1mm“ betätigt. Sobald die Position erreicht ist, legt man sie als „Lower ledge (0 mm)“-Position mit dem Button „Set lower ledge“ fest. Danach können mehrere BPW-Sensoren ohne diesen Schritt kalibriert werden.

Das Testboard muss sich im PROG-Modus befinden. Der PROG-Modus wird mit der grauen Taste aktiviert und ist auf der Digitalanzeige zu sehen.

Hier sind die weiteren notwendigen Schritte vorgeführt:

1. In dem IMS Terminal den Button „Lower ledge (0 mm)“ betätigen. Der Schrittmotor fährt den Weggeber in die Anfangsposition.
2. In dem COMix-Terminal für das Testboard in der Kommandozeile den Befehl „PWS AUTO“ eingeben und auf die Meldung „Please press [BLACK] button when at lower ledge“ warten.
3. Die schwarze Taste auf dem Testboard betätigen und auf die Meldung „Please press [BLACK] button when at upper ledge“ warten.
4. In dem IMS Terminal den Button „Upper ledge (25 mm)“ betätigen. Der Schrittmotor fährt den Weggeber wieder in die Anschlagposition.
5. Die schwarze Taste auf dem Testboard nochmals betätigen.
6. In dem IMS Terminal für das Testboard den Button „Lower ledge (0 mm)“ betätigen. Der Schrittmotor fährt den Weggeber in die Anfangsposition.
7. Den BPW-Sensor aus dem Sensorhalter herausnehmen. Die Kalibrierung ist beendet.

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Folgende Meldungen sind während der Kalibrierung in dem COMix-Terminal zu sehen.

The screenshot shows a terminal window titled "COMix terminal window linked to COM2". On the left, there is a sidebar with three icons: "Behaviour", "Commands", and "Info". The "Info" icon is highlighted. The main window displays the following text:

```
RWE TB>pws auto
PWS auto-calibration started.

+-----+
! Calibrating current loop !
+-----+

Measuring low current...
Measuring high current...

Slope calculated as: 1.000
Offset calculated as: -0.054
Saving parameters...

Checking calibration: successful.

+-----+
! Calibrating position sensor !
+-----+

Please press [BLACK] button
when at lower ledge.

Measuring lower ledge value...

Please press [BLACK] button
when at upper ledge.

Measuring upper ledge value...

Calculating...
Saving values...
Enabling process mode...

Finished.
RWE TB>
```

At the bottom of the window, there is a status bar with the following information:

1250000,n,8,1	0x0A, 10	Tx: 12	Rx: 735	"."	<CR>/<LF>
---------------	----------	--------	---------	-----	-----------

Abbildung 56: Kalibrierungsablauf

4 Software

4.1 MPLAB-Entwicklungsumgebung

Die 32-Bit-MPLAB-Entwicklungsumgebung bietet die Möglichkeiten des Editierens, Kompilierens, der Fehlersuche und Emulation von Embedded-Designs. Sie ist kostenfrei erhältlich und gestattet eine effiziente Code-Bearbeitung, hat eine intuitive grafische Oberfläche und bietet eine einfache Anbindung von Werkzeugen von Drittanbietern.

Die MPLAB IDE arbeitet unter MS Windows und bietet Quellcode-Editierung, Projektmanagement, Maschinencode-Erzeugung aus Assembler oder C, schnelle Simulation, Emulation und Programmierung. Die MPLAB IDE unterstützt gegenwärtig Microchips PIC12-Familie, PIC16-Midrange-Familie und die PIC18-Familie der PICmicro-MCUs ebenso wie die digitalen Signalcontroller dsPIC. Unterstützung für weitere Bausteine ist für zukünftige Versionen geplant.

Bevor mit der IDE Programme kompiliert werden können müssen noch einige Einstellungen vorgenommen werden. Unter dem Menü-Punkt *Configure → Select Device* ist der richtige Microchip auszuwählen. In unserem Fall ist das der PIC18F2520 für den BPW-Sensor bzw. PIC18F8722 für das Testboard.

Des Weiteren muss unter dem Menü-Punkt *Project → Select Language Tool Locations...* der richtige Compiler angebunden werden. Hier wählt man die *Hi-Tech PICC-18* und kontrolliert die Pfade der *Executables*. Danach kann man mit der MPLAB IDE Programme erstellen. Die Einstellungen müssen bei jedem neuen Projekt nochmals vorgenommen werden.

Um ein neues Programm zu erstellen bzw. auf den Micro-Controller zu laden, muss man zunächst ein neues Projekt anlegen. Dies geschieht z.B. mit Hilfe des Assistenten. Diesen erreicht man durch die Menü-Struktur *Project → Project Wizard...*

Will man das Programm auf den Microchip schreiben, muss man es erst kompilieren. Dies geschieht indem man auf *Project → Make* klickt. Dann wählt man unter *Programmer → Select Programmer* das *MPLAB ICD 2*. Danach drückt man auf den Button „*Program target device*“. Das Programm wird jetzt auf den Baustein geschrieben. Nach Beendigung des Schreib-Vorganges ist die Platine für die programmierten Einsatzzwecke gerüstet.

4.2 FrameWORK

Ein Framework (engl. für „Rahmenstruktur, Fachwerk“) ist ein Programmiergerüst, welches in der Softwaretechnik, insbesondere im Rahmen der objektorientierten Softwareentwicklung sowie bei komponentenbasierten Entwicklungsansätzen, verwendet wird. Ein Framework gibt somit in der Regel die Anwendungsarchitektur vor.

Ein Framework ist selbst noch kein fertiges Programm, sondern stellt den Rahmen, innerhalb dessen der Programmierer eine Anwendung erstellt, zur Verfügung, wobei u. a. durch die in dem Framework verwendeten Entwurfsmuster auch die Struktur der individuellen Anwendung beeinflusst wird.

Ein Framework definiert insbesondere den Kontrollfluss der Anwendung und die Schnittstellen für die konkreten Klassen, die vom Programmierer erstellt und registriert werden müssen. Frameworks werden also im Allgemeinen mit dem Ziel einer Wiederverwendung „architektonischer Muster“ entwickelt und genutzt [27].

Das FrameWORK für Mikrocontroller wurde bei der Firma GIGATRONIK Stuttgart entwickelt und besteht zum großen Teil aus einer Sammlung von nützlichen Treiberprogrammen. Diese Treiberprogramme befinden sich auf dem Rechner des Anwenders lokal auf <D:\Software\FrameWORK>. Diese Treiberprogramme dürfen nicht geändert werden. Zurzeit beläuft sich die Dateiengröße aller „.h“- und „.c“-Dateien von FrameWORK auf 5,9 MB.

Das eigentliche Projekt hingegen befindet sich auf dem RAP Server im Ordner <R:\Projekte\RWE Power AG\Pad Wear Sensor>.

Dort befindet sich die eigentliche Applikation, die den Namen des Projektes trägt. Die Applikation kommuniziert zyklisch über die entsprechenden Handler mit den Treibern.

```
// Here we go with the application ...
void main(void)
{
// Init the application
ApplicationInit();

// Loop till done...
while(tApp.enAppState & appRUN)
{
// If µPIC framework commands are available, eat'em up
// DefaultCommandHandler(tApp.hCH4printf);
DefaultCommandHandler();
// if errors occurred, do error handling
DefaultErrorHandler();
// if timer events are available, eat'em up
DefaultTimerHandler();
} // end while()
// Done
OnExit();
} // main()
```

Abbildung 57: Verschiedene Handler in der main-Funktion [9]

Einer der essentiellen Handler von FrameWORK ist der Timerhandler. Die Aufgabe des Timerhandlers ist das Auslösen von timergesteuerten Ereignissen durch Aufrufen der entsprechenden Callback-Funktionen.

Die Abbildung 58 zeigt den C-Quellcode des DefaultTimerHandlers aus dem Projekt „Brake Pad Wear Sensor“. Hier werden Funktionen periodisch aufgerufen, die für den Datenaustausch zuständig sind.

Brake Pad Wear Sensor

```
//  
// Default timer handler  
//  
static BOOL DefaultTimerHandler(void)  
{  
// Internal  
// Get all needed data from the outer world. 40 ms in this application!!!!!!  
    if ( TimerGetAlarm(HTIMER(timerDATA)) ) //  
    {  
// WDOG  
        ServeWDOG(); //  
// Analog channels done?  
        if ( AnalogConversionReady() ) //  
        {  
// As quick as possible  
            AnalogChannelGetDirectAndCheck(); //  
// Restart the conversion  
            AnalogStartConversion(); //  
        } //  
    } //  
// Update timer  
    if ( TimerGetAlarm(HTIMER(timerUPDATE)) ) //  
    {  
        if ( tApp.bPINGReceived ) //  
        {  
            printf("SYS F %6.3f\r\n", tApp.tAnalogValues[voltFORCE].fValue); //  
        } //  
// PROCESS activated, if PWS PROC  
        if (tApp.bPADProcess)  
        {  
            SetOutputCurrent( (tApp.fCurrentPosition/ (defPOSITION_RIGHT-defPOSITION_LEFT)) *  
                            (defDAC_OUTPUT_HIGH - defDAC_OUTPUT_LOW) +  
                            defDAC_OUTPUT_LOW );  
        } //  
    } //  
// Back to caller  
    return TRUE; //  
} // DefaultTimerHandler()
```

Abbildung 58: Codebereich für Datenaustausch [9]

Die Initialisierung und Konfigurierung der benötigten Treiber findet in den Dateien Application.c und Application.h statt. In der Funktion ApplicationInit() werden Funktionen aufgerufen, die zum Beispiel Datenkanäle öffnen. Die für die Applikation spezifische Konfiguration, wie zum Beispiel die Pin-Konfiguration, wird in der Datei Application.h beschrieben [28].

4.3 BPW-Sensor-Software

4.3.1 Programmablaufplan zur BPW-Sensor-Kalibrierung

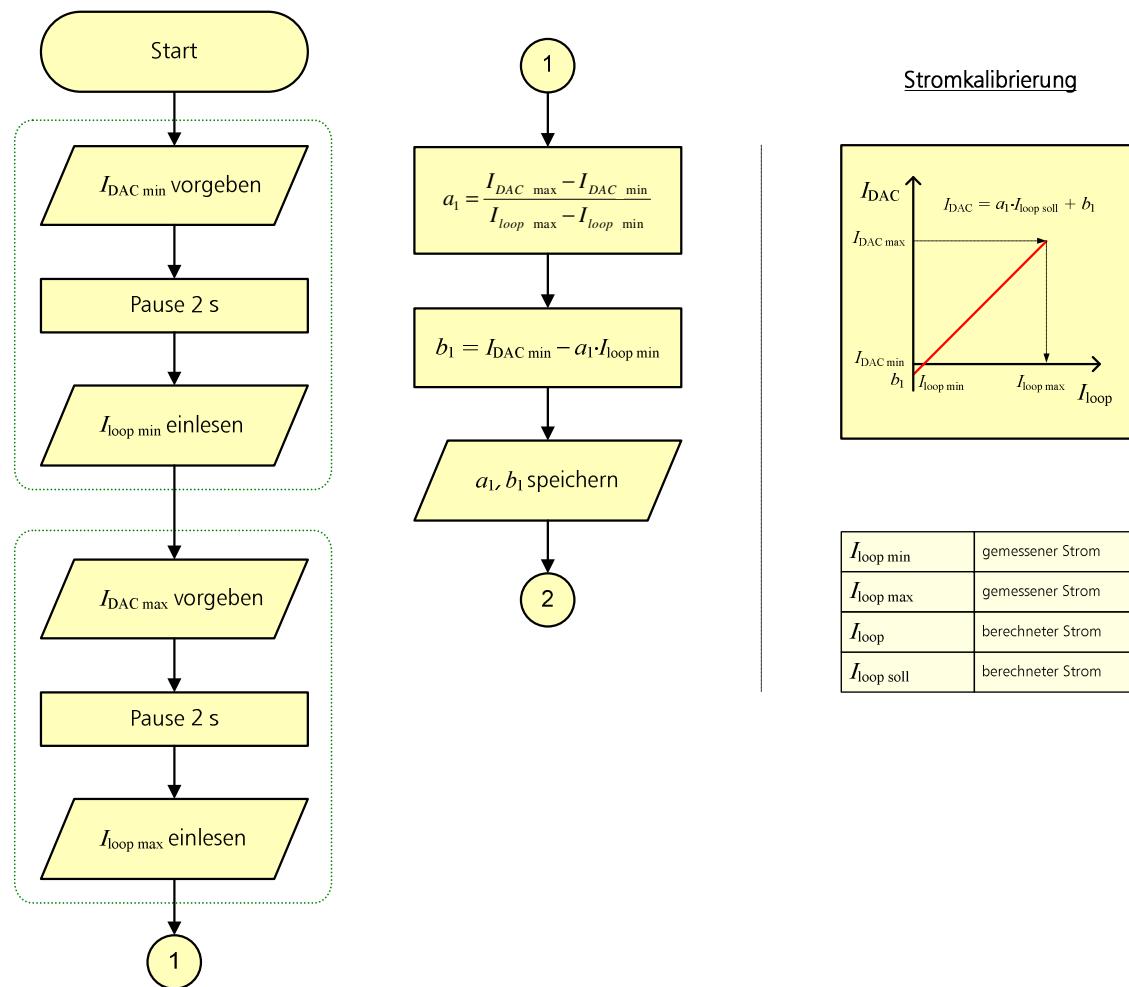


Abbildung 59: Programmablaufplan zur BPW-Sensor-Kalibrierung, Teil 2

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

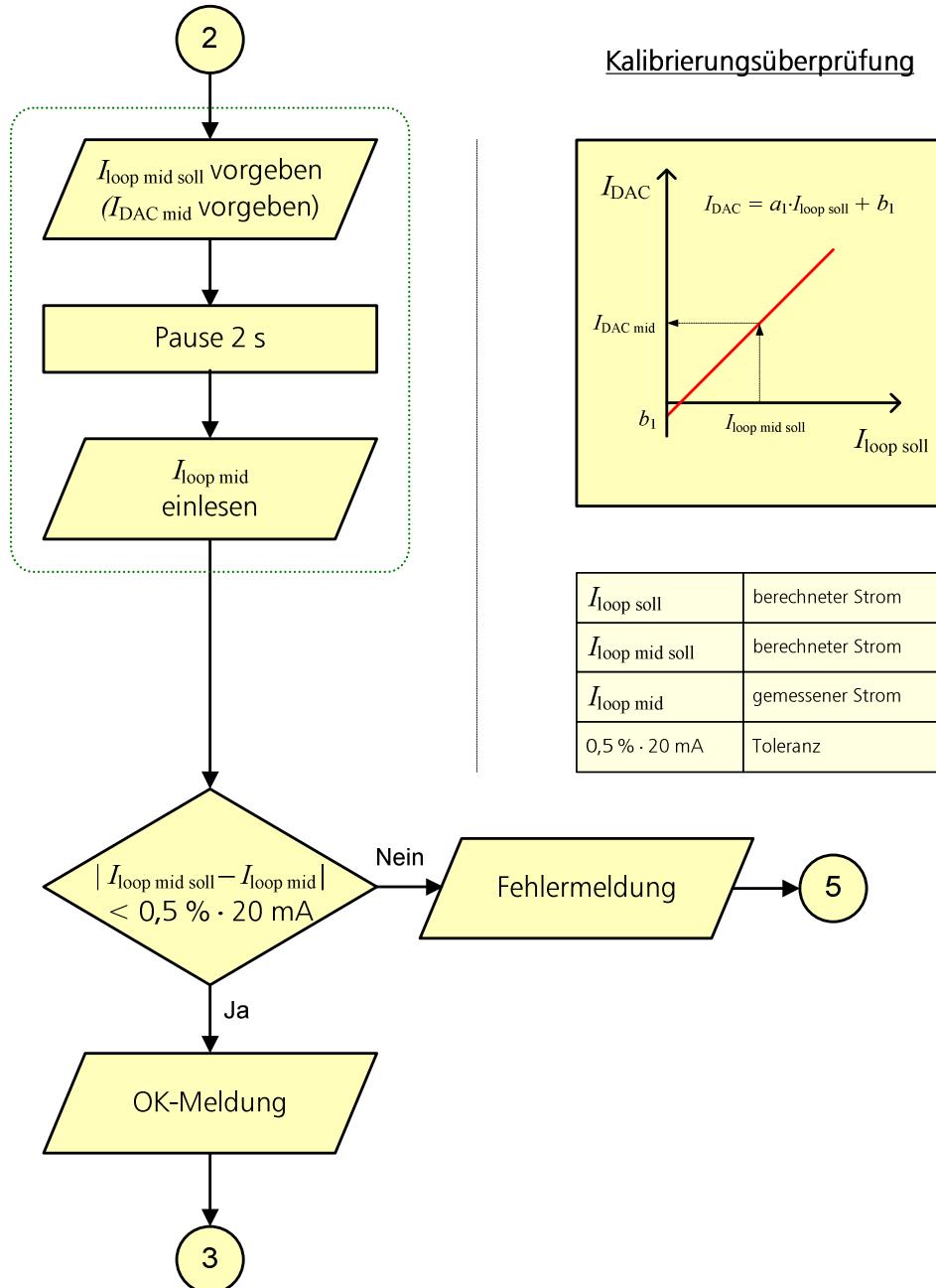


Abbildung 60: Programmablaufplan zur BPW-Sensor-Kalibrierung, Teil 2

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

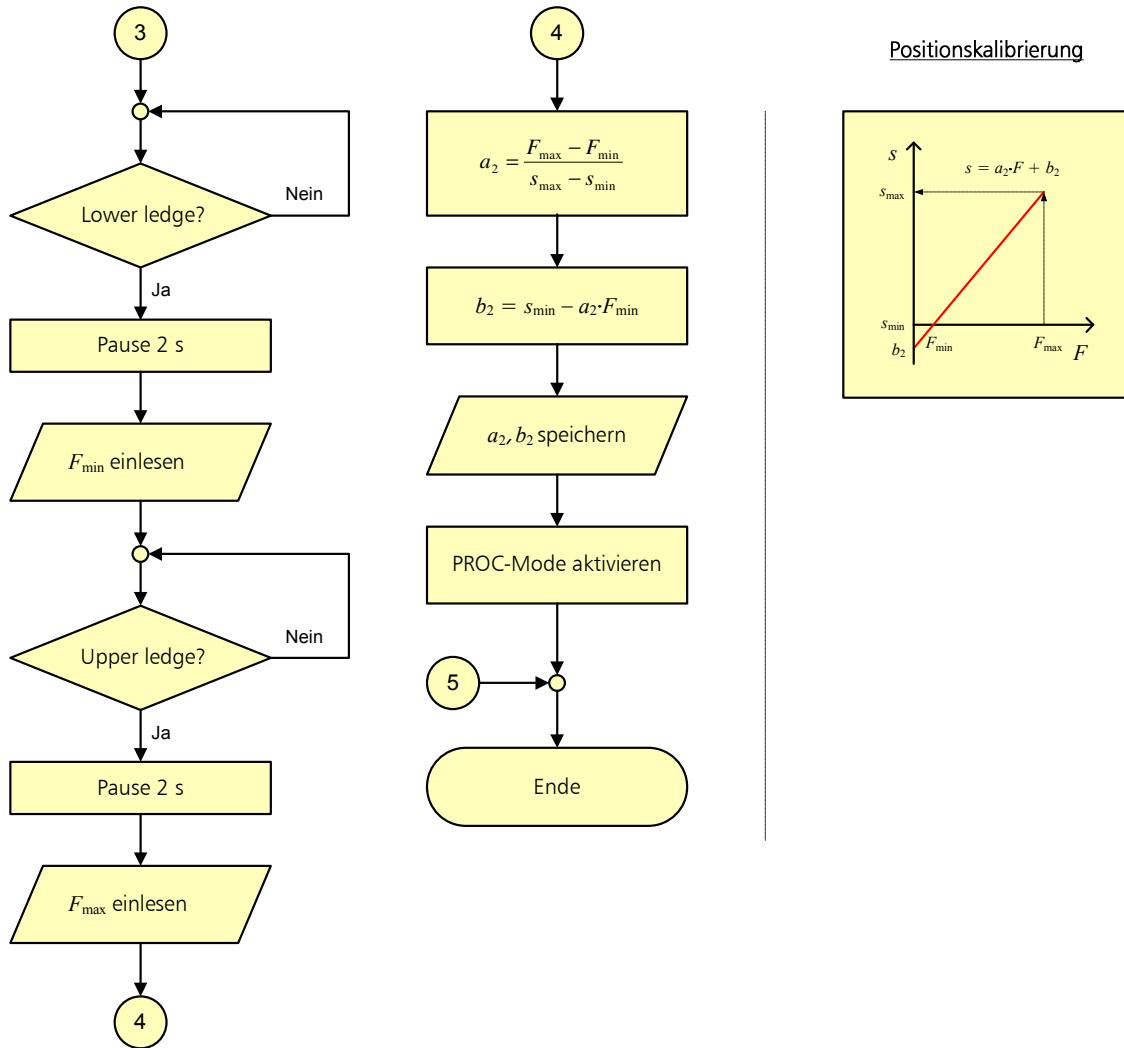


Abbildung 61: Programmablaufplan zur BPW-Sensor-Kalibrierung, Teil 3

Die Kalibrierung des BPW-Sensors wird mit dem Befehl „PWS AUTO“ im COMiX-Terminalprogramm für das Testboard gestartet (Näheres dazu siehe im Kapitel 3.5.3 „Kalibrierungsablauf“). Der BPW-Sensor befindet sich dann automatisch im CALIBRATE-Modus.

Bei der Kalibrierung des BPW-Sensors erfolgt zuerst den Abgleich der Stromschleife. Sprich, es wird der Zusammenhang zwischen dem an dem DAC vorgegebenen Strom I_{DAC} und dem tatsächlich eingestelltem Strom in der Stromschleife I_{loop} festgestellt.

Der Strom in der Stromschleife wird mit dem Testboard gemessen. Dann werden die Parameter (Steigung und Offset) für die Kennlinie $s = a_2 \cdot F + b_2$ ausgerechnet und in das EEPROM des BPW-Sensors gespeichert.

Dann wird überprüft, ob der Kalibrierungsschritt erfolgreich war. Dafür wird der Mittelwert des Stroms I_{DAC} aus dem Bereich zwischen 4 mA und 20 mA vorgegeben und der Strom $I_{loop\ soll}$ mit zuvor bestimmten Parametern a_1 und b_1 ausgerechnet. Es wird dabei überprüft, ob er sich im 0,5 % Toleranzband befindet. Dann wird je nach Ergebnis eine entsprechende Meldung ausgegeben.

Danach beginnt die Feststellung des Zusammenhangs zwischen der eingelesenen Kraft F und der Position s . Der Vorgang ist dem ersten analog, mit dem Unterschied, dass hier der „untere“ und „obere“ Anschlag „Lower ledge“ und „Upper ledge“ angefahren werden.

Dann werden die Parameter für die Kennlinie $I_{DAC} = a_1 \cdot I_{loop\ soll} + b_1$ ausgerechnet und auch in das EEPROM des BPW-Sensors gespeichert.

Am Schluss wird der Mikrocontroller des BPW-Sensors in den Prozess-Modus (PROC-Mode) versetzt.

4.3.2 Programmablaufplan für den Prozess-Modus

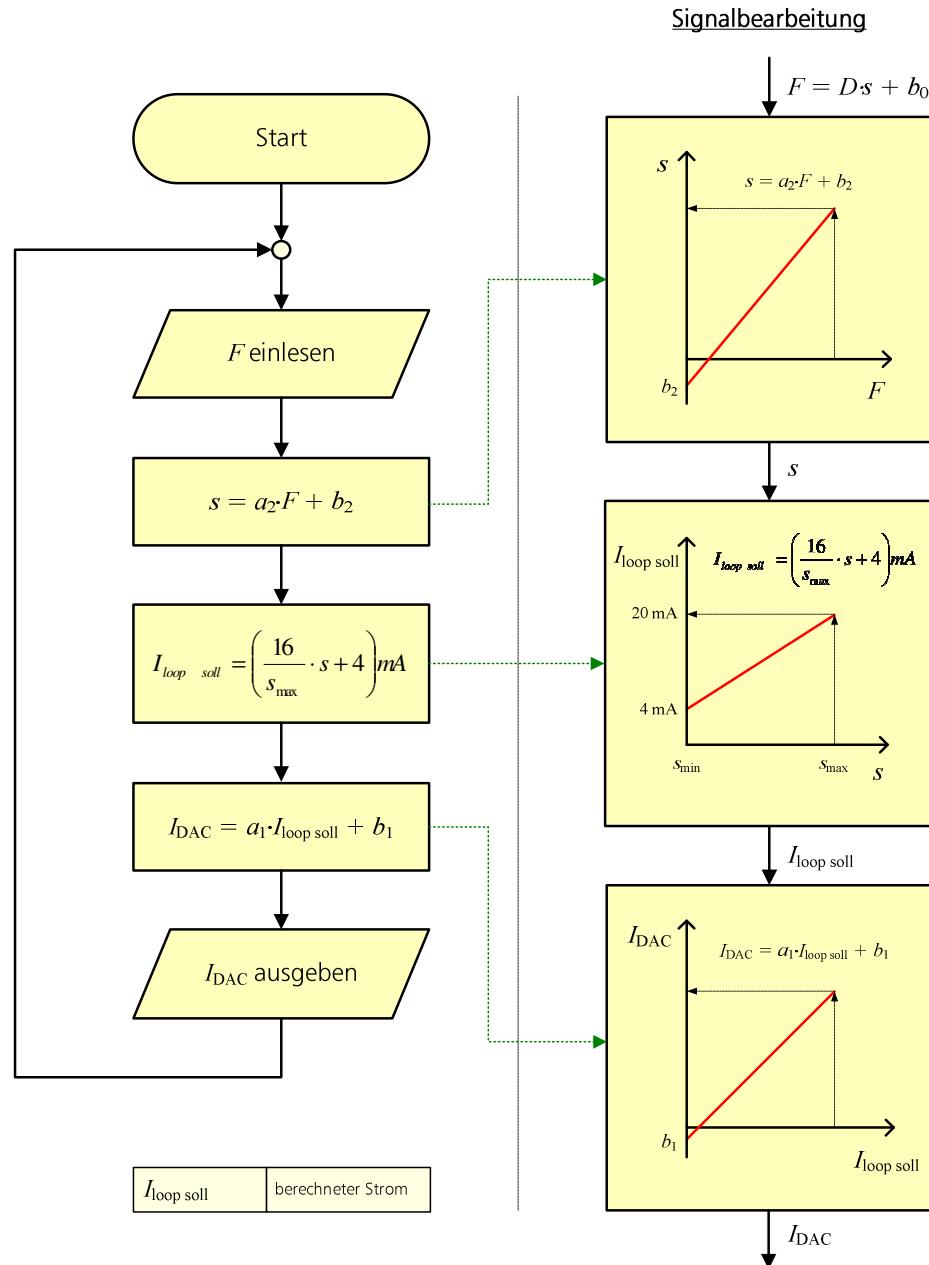


Abbildung 62: Programmablaufplan und Signalbearbeitung im PROC Mode

In dem Prozess-Modus (PROC-Mode) wird die Kraft F aus dem A/D-Wandler eingelesen und mit den ausgerechneten Geradenparametern in die Position s umgerechnet.

$$s = a_2 \cdot F + b_2 \quad (14)$$

Dann folgt die eigentliche Stromvorgabe für die 4 – 20 mA Stromschleife:

$$I_{loop_soll} = \left(\frac{16}{s_{\max}} \cdot s + 4 \right) mA \quad (15)$$

Danach wird die Stromvorgabe, die am DAC eingestellt werden soll, mit den ausgerechneten Geradenparametern ermittelt.

$$I_{DAC} = a_1 \cdot I_{loop_soll} + b_1 \quad (16)$$

Die Verarbeitung der Ein- und Ausgangssignale erfolgt zyklisch im Timerhandler von FrameWORK (siehe Abbildung 58).

Im Anhang 7.9 ist der Kalibrierungsablauf auf dem Testboard in C-Code beigefügt. Auf der beigelegten CD befindet sich die komplette Software für den BPW-Sensor und das Testboard.

4.3.3 Messgenauigkeit des Testboards

Das Testboard wurde mit dem Multifunktionskalibrator MC3 kalibriert.



Abbildung 63: Multifunktionskalibrator MC3

Dabei wurde der Multifunktionskalibrator MC3 als Stromsenke anstatt des BPW-Sensors in dem Stromkreis der Stromschleife eingesetzt. Es wurden die vorgegebenen Ströme des Kalibrators und die angezeigten Werte der Digitalanzeige des Testboards (also die Ausgangsspannung des I/U-Wandlers IC302, siehe Anhang 7.6) erfasst und ausgewertet.

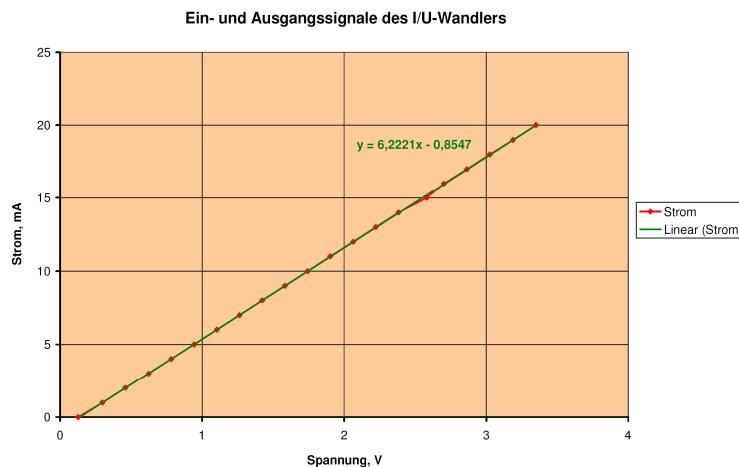


Abbildung 64: Ein- und Ausgangssignale des I/U-Wandlers

Danach wurden die entsprechenden Geradenparameter (Steigung 6,2 und Offset 0,9) ermittelt und auf dem Testboard ins EEPROM gespeichert. Der Messfehler des Testboards beläuft sich nach der Kalibrierung auf 0,1 %.

4.3.4 Messgenauigkeit des BPW-Sensors

Die elektronischen Bauteile des BPW-Sensors besitzen Ungenauigkeiten, die das Nutzsignal beeinträchtigen.

Darunter sind Nichtlinearitäten und Offsets von Kraftsensor, Instrumenten- und OP-Verstärker, Toleranzen der Widerstände, Auflösungsfehler des A/D-Wandlers im PIC- μ Controller.

Die in der Aufgabestellung vorgegebene Genauigkeit des BPW-Sensors soll unter 5 % bleiben. Das ist zu erreichen, indem man diese Ungenauigkeiten durch die Kalibrierung per μ Controller behebt.

Dadurch reduziert sich die Messabweichung der Elektronik-Baugruppe bis auf die Auflösung des A/D-Wandlers im PIC. Der 10-Bit-A/D-Wandler hat die Auflösung $2^{10} = 1024$, umgerechnet in Volt: $5 \text{ V} / 2^{10} = 5 \text{ mV}$, umgerechnet in Prozent: $(5 \text{ mV} / 5 \text{ V}) \cdot 100 \% = 0,1 \%$.

Weitere Ungenauigkeiten kommen von mechanischer Seite. Im Idealfall erfolgt die Krafteinleitung über eine Kalotte exakt in die Messachse des Kraftsensors. Bereits geringe Winkelfehler beeinträchtigen die Messung, weil die Kraft eine vektorielle Größe ist. Ein Winkelfehler β zerlegt die Kraft in eine Radialkraft ($F \cdot \sin \beta$) und eine Axialkraft ($F \cdot \cos \beta$). Für die Auswertung ist allein die Axialkraft von Bedeutung. Im nächsten Kapitel wird der Einfluss mechanischer Elemente näher betrachtet.

4.3.5 BPW-Sensor-Kalibrierung

Die Kalibrierung von den drei BPW-Sensoren wurde einmal durchgeführt. Die Nachprüfung der Linearität ergab, dass die Kennlinien des Stromverlaufs in der Stromschleife manchmal die Geraden darstellen, manchmal aber eindeutig nichtlinear waren.

Die mehreren Versuchsreihen führten zur Erkenntnis, dass unterschiedliche Kennlinien im Zusammenhang mit der Winkelstellung des Stößels stehen. Die Winkelstellung veränderte sich, indem man den Stöbel um seine Symmetrieachse dreht. Es kommt beim Zusammenbau des BPW-Sensors immer wieder vor, dass der Stöbel immer wieder beliebige Winkelstellungen annehmen kann.

Danach wurde ein spezielles Experiment durchgeführt. Die Stöbel aller drei BPW-Sensoren wurden daher farbig markiert, damit man unterschiedliche Winkellagen des Stößels einstellen konnte.

Die Markierungen wurden folgendermaßen auf dem Stöbel aufgeteilt.

Markierungsfarbe	Winkel
Weiss	0°
Hellrot	60°
Gelb	130°
Blau	180°
Dunkelrot	270°
Grün	315°

Tabelle 11: Markierungsfarben und entsprechende Winkel

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Hier in der Abbildung ist die farbige Markierung des Stößels zu sehen.



Abbildung 65: Farbig markierter Stöbel

Die Vermessung aller drei BPW-Sensoren ergab Kraft-Kennlinien ähnlicher Art, die folgendermaßen aussahen.

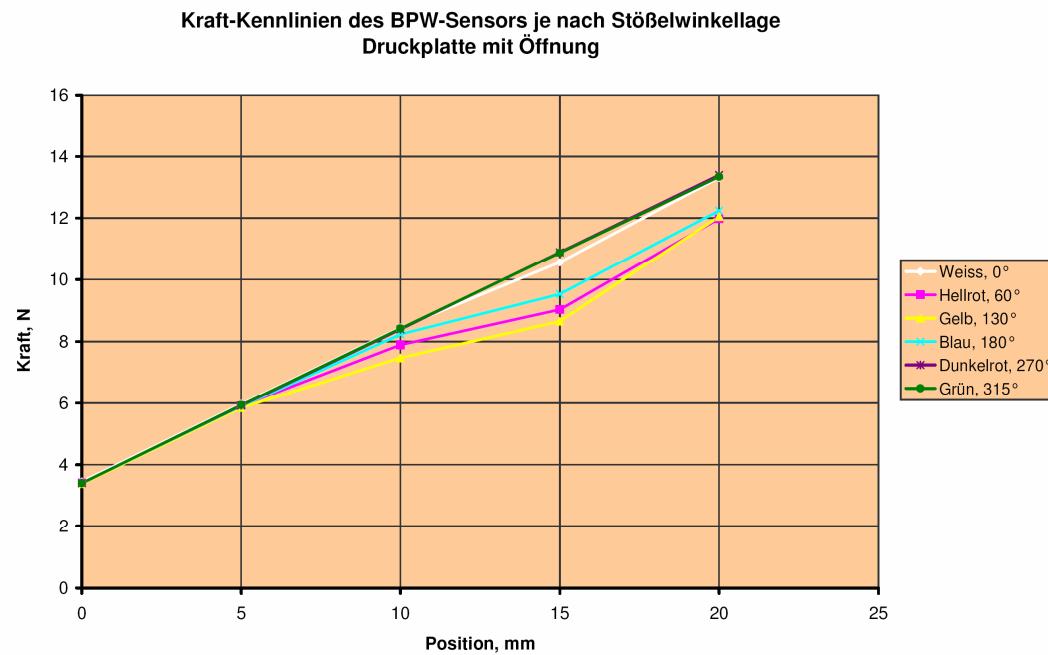


Abbildung 66: Kraft-Kennlinien je nach Stöbelwinkellage, Druckplatte mit Loch

Brake Pad Wear Sensor

Der Linearitätsfehler beläuft sich in diesem Falle auf bis zu 15 %. Das ist deutlich höher als die vorgegebene 5 % Genauigkeit.

Nach dem Experiment wurde festgestellt, dass dieses nichtlineare Phänomen durch die nicht präzise zentrierte Öffnung in der Druckplatte, die unmittelbar mit dem Kraftsensor kontaktiert, verursacht wurde. Deswegen wurde die Öffnung in der Druckplatte mit einem zylindrischen Metallstift geschlossen und zugeklebt.



Abbildung 67: Druckplatte, links: mit Loch, mittig: Metallstift, rechts: ohne Loch

Danach wurden erneut die Messungen bei verschiedenen Winkellagen des Stößels durchgeführt, indem der Stößel um seine Symmetrieachse gedreht wurde.

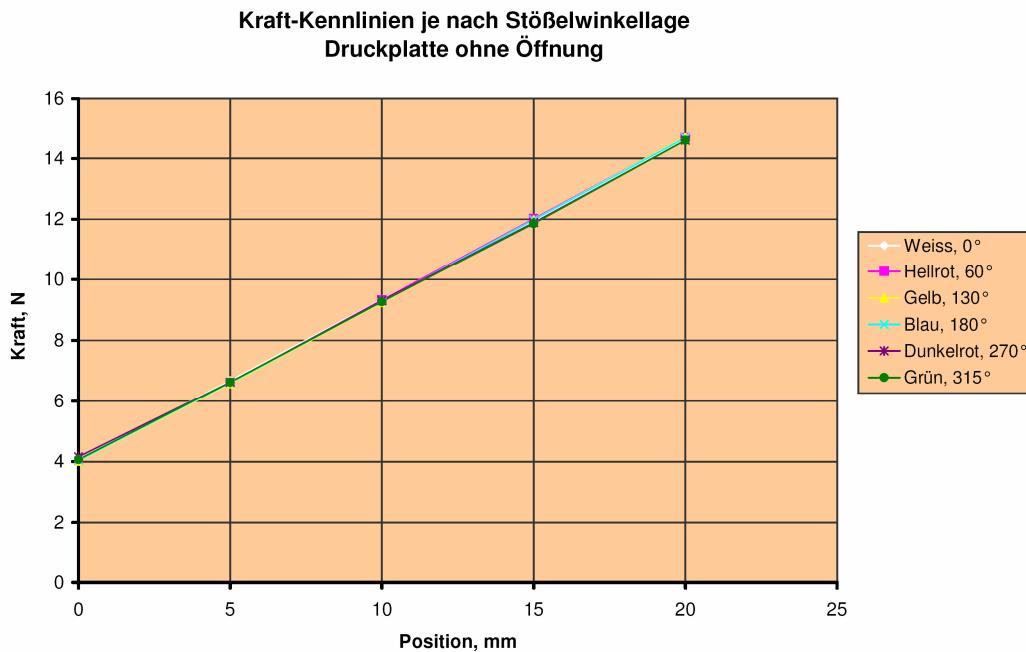


Abbildung 68: Kraft-Kennlinien je nach Stößelwinkellage, Druckplatte ohne Loch

Brake Pad Wear Sensor

Der Linearitätsfehler beläuft sich in diesem Falle nur auf 0,8 %. Das liegt deutlich unter der vorgegebenen 5 % Genauigkeit. Somit wurde die Aufgabe hinsichtlich der Voraussetzung an Genauigkeit erfüllt.

Hier ist der Stromverlauf in der Stromschleife eines BPW-Sensors dargestellt.

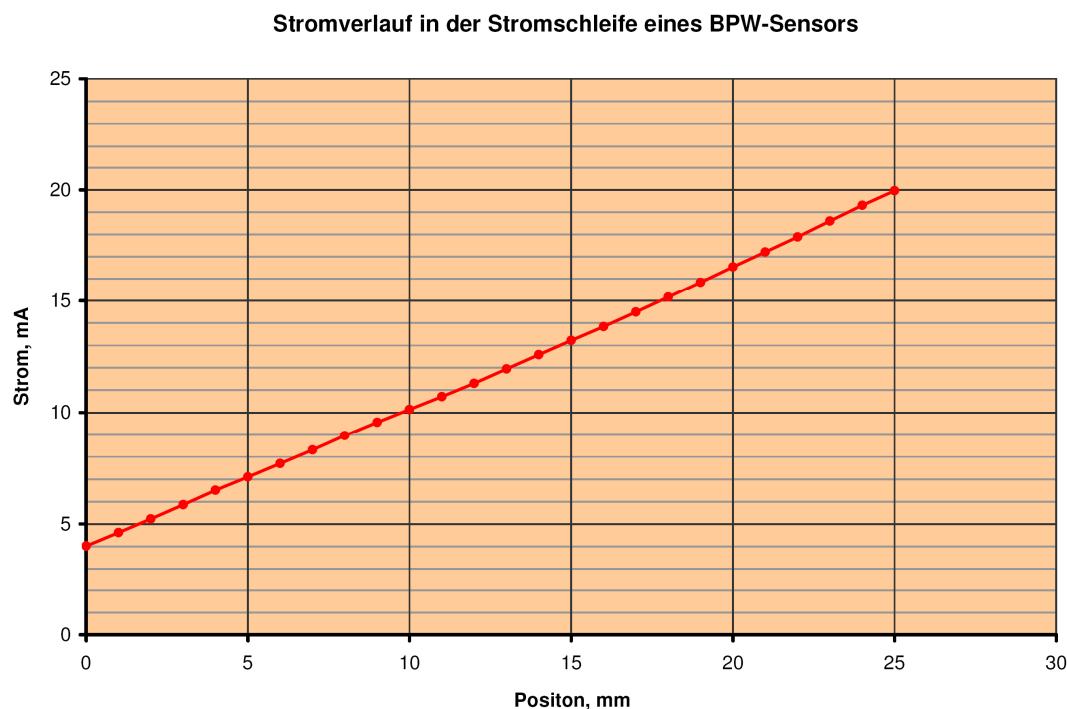


Abbildung 69: Stromverlauf in der Stromschleife eines BPW-Sensors

5 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, auf Basis eines bereits vorhandenen Controller-gestützten Prototyps eines Wegsensors einen weiteren Prototypen (B-Muster) des Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife zu entwickeln und aufzubauen.

Dazu wurde mit EAGLE der Schaltplan und das Layout der Leiterplatte für den BPW-Sensor erarbeitet.

Nach der sorgfältigen Schaltplanprüfung wurde die dazugehörige Stückliste der elektronischen Teile erstellt. Dann wurde von dem Leiterplattenhersteller GMS Electronic Vertriebs GmbH das Angebot angefordert.

Während der Leiterplattenfertigung wurde der Schaltplan und das Layout für das Test-Board erarbeitet. Das Test-Board wurde dann anschließend in die Fertigung gebracht.

Danach wurde die Simulation für die Kalibrierung der BPW-Sensoren in C-Code geschrieben und ausgeführt.

Weiterhin wurde die Kalibrierungssoftware in FrameWORK geschrieben. Am Schluss wurde die Kalibrierung und die Prüfung der BPW-Sensoren auf dem Test-Board durchgeführt.

Das B-Muster wurde realisiert und es wurde der Prototyp „Brake Pad Wear Sensor“ hergestellt.

6 Ausblick

Die Fertigungstoleranzen der gesinterten Bauteile aus Kunststoff (Schieber, Distanzring) machen sich bei dem Zusammenbau von BPW-Sensoren unangenehm bemerkbar. Daher müssen die Bauteile oft nachgeschliffen werden. Bei größeren Stückzahlen ist aber aus diesem Grund die Produktion nicht mehr rentabel. Deshalb ist es wichtig, diesen Umstand bei der weiteren Entwicklung zu berücksichtigen, um unnötige Produktionskosten zu vermeiden.

Beim Einbau der Elektronik-Baugruppe mit dem eingelöteten Stecker klemmt sie gelegentlich im Inneren des Sensorgehäuses. Um die Elektronik-Baugruppe vorwärts zu bewegen, hilft es oft auch nicht, wenn mit der Feder dagegen gedrückt wird. Daher ist es notwendig, entsprechendes Werkzeug zu benutzen. Wenn dabei gegen den FFS-Sensor gedrückt wird, kann es zur mechanischen Überlastung des Kraftsensors führen (die Überlastfestigkeit des FSS-Sensors beträgt 4500 g). Dies verursacht nachher die nichtlinearen Stromkennlinien des Kraftsensors. Daher ist darauf zu achten, dass mit dem Werkzeug nicht gegen den FFS-Sensor, sondern gegen die Leiterplatte gedrückt wird.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass der Stöbel oftmals mehr als 30 mm einwärts geschoben werden kann. Es kommt daher, dass der auf dem Stöbel eingesetzte Schieber trotz der Verringerung des Innendurchmessers des Sensorgehäuses weiter nach hinten geschoben werden kann. Das Sensorgehäuse hat das Gewinde M24 mit dem Innen-durchmesser 22 mm. Der Durchmesser des Schiebers beträgt dagegen 22,8 mm. Deswegen musste der Schieber nachgeschliffen werden. Daher sollte das Gewinde künftig vergrößert werden, um einen unzulässigen Druck auf den Kraftsensor zu vermeiden.

Der PIC18F2520 befindet sich hinsichtlich der Flash- und RAM-Speicher am Rande seiner Kapazität. Die MPLAB IDE bringt folgende Meldungen: „Total ROM 32502 bytes: 99,2 %“; „Total RAM 1264 bytes: 82,3 %“. Die Zwischenlösung wäre, im C-Code bestimmte Sequenzen abzukürzen, um dadurch den Speicherbedarf zu reduzieren, wie z. B.: Texte im C-Code zu verkürzen oder Zahl der printf-Befehle zu verringen.

Es ist empfehlenswert, künftig den funktionsähnlichen μ Controller mit dem größeren Flash- und RAM-Speicher, aber mit dem gleichen QFN-Gehäuse auf dem μ C-Herstellermarkt zu beobachten.

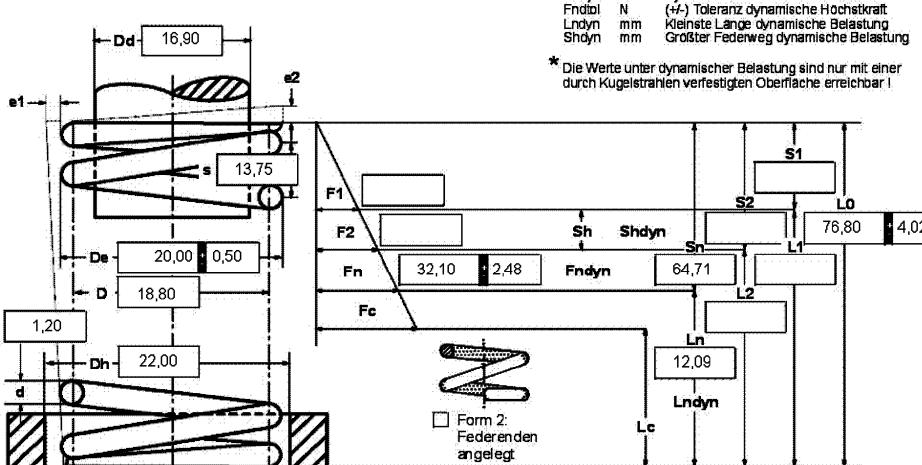
Es kann unter Umständen der Durchmesser des Sensorgehäuses um 2 - 3 mm vergrößert werden. Dadurch wäre es möglich, die Sensorleiterplatte entsprechend bis zu dem Durchmesser 23 - 24 mm zu vergrößern, um z. B. den PIC18F2585 mit dem größeren Speicher (48 kByte) im SOIC-Gehäuse verwenden zu können.

7 Anhang

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

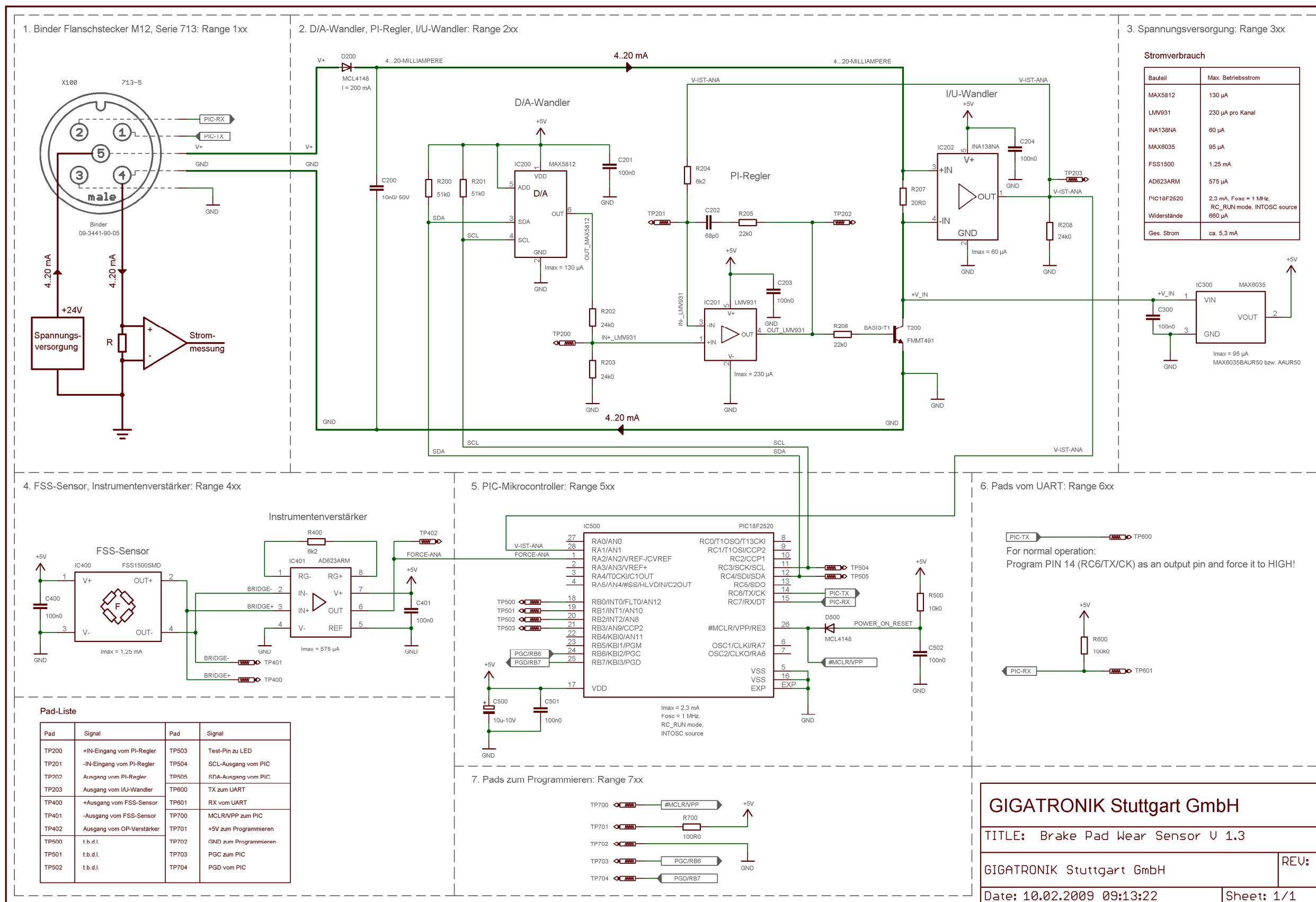
7.1 Datenblatt Druckfeder VD-180K

Datenblatt Druckfeder : VD-180K		GUTEKUNST FEDERN 																																																																																				
 <p style="text-align: center;"><input type="checkbox"/> Form 1: Federenden angelegt und geschliffen <input type="checkbox"/> Form 2: Federenden angelegt</p> <p style="text-align: center;">* Die Werte unter dynamischer Belastung sind nur mit einer durch Kugelstrahlen verfestigten Oberfläche erreichbar!</p>																																																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%; padding: 5px;"> 1 Windungsrichtung <input type="checkbox"/> links <input checked="" type="checkbox"/> rechts </td> <td style="width: 30%; padding: 5px;"> 2 Führung und Lagerung DIN 2089/1 <input type="checkbox"/> Dorn <input type="checkbox"/> Hülse Knicklänge  bei Lagerungsbeiwert $v=0,5$ / Bild 5 0,00 mm </td> <td style="width: 30%; padding: 5px;"> 3 Toleranzen nach DIN 2095 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Gütegrad</td> <td>D_e</td> <td>D_i</td> <td>D_d</td> <td>L₀</td> <td>F₁, F₂</td> <td>e₁, e₂</td> <td>Drahtstärke d nach DIN 2076</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"> 4 Dynamische Beanspruchung * Fn_{dyn} 31,33 Fn_{tol} 2,47 Ln_{dyn} 13,64 Sh_{dyn} 23,13 </td> <td style="padding: 5px;"> 5 Arbeitsweg Sh mm EN 10270-3-1.4310 </td> <td style="padding: 5px;"> 6 Werkstoff <input checked="" type="checkbox"/> gezogen <input type="checkbox"/> gewalzt <input type="checkbox"/> spanend bearbeitet </td> <td style="padding: 5px;"> 7 Fertigungsausgleich durch Eine Federkraft mit zugehöriger Länge <input type="checkbox"/> Eine Federkraft mit zugehöriger Länge und L₀ <input checked="" type="checkbox"/> Zwei Federkräfte mit zugehörigen Längen <input type="checkbox"/> L₀, n, d <input type="checkbox"/> L₀, n, De, Di <input type="checkbox"/> </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"> 8 Lastspielzahl N </td> <td style="padding: 5px;"> 9 Lastspielefrequenz n / s </td> <td style="padding: 5px;"> 10 Feder entgratet <input type="checkbox"/> innen <input type="checkbox"/> außen </td> <td style="padding: 5px;"> 11 Oberflächenschutz <input type="checkbox"/> kugelgestrahlt </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"> 12 Bemerkungen </td> <td colspan="3" style="padding: 5px;"> 13 Federn setzen Alle Federn, die nach ihrer Baugröße zum Setzverhalten neigen, sind vorgesetzt. </td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="padding: 5px;"> 14 Staffelpreise <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Mengenstaffel</th> <th>Einzelpreis [EUR]</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2.7900 EUR</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2.7900 EUR</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>2.7900 EUR</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>2.7900 EUR</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>1.9300 EUR</td> </tr> <tr> <td>17</td> <td>1.0000 EUR</td> </tr> <tr> <td>37</td> <td>0.6700 EUR</td> </tr> <tr> <td>75</td> <td>0.5000 EUR</td> </tr> <tr> <td>125</td> <td>0.4044 EUR</td> </tr> <tr> <td>175</td> <td>0.3801 EUR</td> </tr> <tr> <td>250</td> <td>0.3157 EUR</td> </tr> <tr> <td>350</td> <td>0.2715 EUR</td> </tr> <tr> <td>450</td> <td>0.2326 EUR</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center; padding: 5px;"> Gutekunst + Co.KG Federnfabriken - Carl-Zeiss-Straße 15 - D-72555 Metzingen Verkauf (+49) 07123 / 960-192 · Technische Beratung (+49) 07123 / 960-193 · Zentrale (+49) 07123 / 960-0 Telefax (+49) 07123 / 960-195 · E-mail: verkauf@gutekunst-co.com </td> </tr> </table>				1 Windungsrichtung <input type="checkbox"/> links <input checked="" type="checkbox"/> rechts	2 Führung und Lagerung DIN 2089/1 <input type="checkbox"/> Dorn <input type="checkbox"/> Hülse Knicklänge  bei Lagerungsbeiwert $v=0,5$ / Bild 5 0,00 mm	3 Toleranzen nach DIN 2095 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Gütegrad</td> <td>D_e</td> <td>D_i</td> <td>D_d</td> <td>L₀</td> <td>F₁, F₂</td> <td>e₁, e₂</td> <td>Drahtstärke d nach DIN 2076</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> </table>	Gütegrad	D _e	D _i	D _d	L ₀	F ₁ , F ₂	e ₁ , e ₂	Drahtstärke d nach DIN 2076	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4 Dynamische Beanspruchung * Fn _{dyn} 31,33 Fn _{tol} 2,47 Ln _{dyn} 13,64 Sh _{dyn} 23,13	5 Arbeitsweg Sh mm EN 10270-3-1.4310	6 Werkstoff <input checked="" type="checkbox"/> gezogen <input type="checkbox"/> gewalzt <input type="checkbox"/> spanend bearbeitet	7 Fertigungsausgleich durch Eine Federkraft mit zugehöriger Länge <input type="checkbox"/> Eine Federkraft mit zugehöriger Länge und L ₀ <input checked="" type="checkbox"/> Zwei Federkräfte mit zugehörigen Längen <input type="checkbox"/> L ₀ , n, d <input type="checkbox"/> L ₀ , n, De, Di <input type="checkbox"/>	8 Lastspielzahl N	9 Lastspielefrequenz n / s	10 Feder entgratet <input type="checkbox"/> innen <input type="checkbox"/> außen	11 Oberflächenschutz <input type="checkbox"/> kugelgestrahlt	12 Bemerkungen	13 Federn setzen Alle Federn, die nach ihrer Baugröße zum Setzverhalten neigen, sind vorgesetzt.			14 Staffelpreise <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Mengenstaffel</th> <th>Einzelpreis [EUR]</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2.7900 EUR</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2.7900 EUR</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>2.7900 EUR</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>2.7900 EUR</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>1.9300 EUR</td> </tr> <tr> <td>17</td> <td>1.0000 EUR</td> </tr> <tr> <td>37</td> <td>0.6700 EUR</td> </tr> <tr> <td>75</td> <td>0.5000 EUR</td> </tr> <tr> <td>125</td> <td>0.4044 EUR</td> </tr> <tr> <td>175</td> <td>0.3801 EUR</td> </tr> <tr> <td>250</td> <td>0.3157 EUR</td> </tr> <tr> <td>350</td> <td>0.2715 EUR</td> </tr> <tr> <td>450</td> <td>0.2326 EUR</td> </tr> </table>				Mengenstaffel	Einzelpreis [EUR]	1	2.7900 EUR	2	2.7900 EUR	3	2.7900 EUR	5	2.7900 EUR	7	1.9300 EUR	17	1.0000 EUR	37	0.6700 EUR	75	0.5000 EUR	125	0.4044 EUR	175	0.3801 EUR	250	0.3157 EUR	350	0.2715 EUR	450	0.2326 EUR	Gutekunst + Co.KG Federnfabriken - Carl-Zeiss-Straße 15 - D-72555 Metzingen Verkauf (+49) 07123 / 960-192 · Technische Beratung (+49) 07123 / 960-193 · Zentrale (+49) 07123 / 960-0 Telefax (+49) 07123 / 960-195 · E-mail: verkauf@gutekunst-co.com													
1 Windungsrichtung <input type="checkbox"/> links <input checked="" type="checkbox"/> rechts	2 Führung und Lagerung DIN 2089/1 <input type="checkbox"/> Dorn <input type="checkbox"/> Hülse Knicklänge  bei Lagerungsbeiwert $v=0,5$ / Bild 5 0,00 mm	3 Toleranzen nach DIN 2095 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Gütegrad</td> <td>D_e</td> <td>D_i</td> <td>D_d</td> <td>L₀</td> <td>F₁, F₂</td> <td>e₁, e₂</td> <td>Drahtstärke d nach DIN 2076</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> </table>	Gütegrad	D _e	D _i	D _d	L ₀	F ₁ , F ₂	e ₁ , e ₂	Drahtstärke d nach DIN 2076	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																										
Gütegrad	D _e	D _i	D _d	L ₀	F ₁ , F ₂	e ₁ , e ₂	Drahtstärke d nach DIN 2076																																																																															
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																															
2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																																															
3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																																															
4 Dynamische Beanspruchung * Fn _{dyn} 31,33 Fn _{tol} 2,47 Ln _{dyn} 13,64 Sh _{dyn} 23,13	5 Arbeitsweg Sh mm EN 10270-3-1.4310	6 Werkstoff <input checked="" type="checkbox"/> gezogen <input type="checkbox"/> gewalzt <input type="checkbox"/> spanend bearbeitet	7 Fertigungsausgleich durch Eine Federkraft mit zugehöriger Länge <input type="checkbox"/> Eine Federkraft mit zugehöriger Länge und L ₀ <input checked="" type="checkbox"/> Zwei Federkräfte mit zugehörigen Längen <input type="checkbox"/> L ₀ , n, d <input type="checkbox"/> L ₀ , n, De, Di <input type="checkbox"/>																																																																																			
8 Lastspielzahl N	9 Lastspielefrequenz n / s	10 Feder entgratet <input type="checkbox"/> innen <input type="checkbox"/> außen	11 Oberflächenschutz <input type="checkbox"/> kugelgestrahlt																																																																																			
12 Bemerkungen	13 Federn setzen Alle Federn, die nach ihrer Baugröße zum Setzverhalten neigen, sind vorgesetzt.																																																																																					
14 Staffelpreise <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Mengenstaffel</th> <th>Einzelpreis [EUR]</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2.7900 EUR</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2.7900 EUR</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>2.7900 EUR</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>2.7900 EUR</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>1.9300 EUR</td> </tr> <tr> <td>17</td> <td>1.0000 EUR</td> </tr> <tr> <td>37</td> <td>0.6700 EUR</td> </tr> <tr> <td>75</td> <td>0.5000 EUR</td> </tr> <tr> <td>125</td> <td>0.4044 EUR</td> </tr> <tr> <td>175</td> <td>0.3801 EUR</td> </tr> <tr> <td>250</td> <td>0.3157 EUR</td> </tr> <tr> <td>350</td> <td>0.2715 EUR</td> </tr> <tr> <td>450</td> <td>0.2326 EUR</td> </tr> </table>				Mengenstaffel	Einzelpreis [EUR]	1	2.7900 EUR	2	2.7900 EUR	3	2.7900 EUR	5	2.7900 EUR	7	1.9300 EUR	17	1.0000 EUR	37	0.6700 EUR	75	0.5000 EUR	125	0.4044 EUR	175	0.3801 EUR	250	0.3157 EUR	350	0.2715 EUR	450	0.2326 EUR																																																							
Mengenstaffel	Einzelpreis [EUR]																																																																																					
1	2.7900 EUR																																																																																					
2	2.7900 EUR																																																																																					
3	2.7900 EUR																																																																																					
5	2.7900 EUR																																																																																					
7	1.9300 EUR																																																																																					
17	1.0000 EUR																																																																																					
37	0.6700 EUR																																																																																					
75	0.5000 EUR																																																																																					
125	0.4044 EUR																																																																																					
175	0.3801 EUR																																																																																					
250	0.3157 EUR																																																																																					
350	0.2715 EUR																																																																																					
450	0.2326 EUR																																																																																					
Gutekunst + Co.KG Federnfabriken - Carl-Zeiss-Straße 15 - D-72555 Metzingen Verkauf (+49) 07123 / 960-192 · Technische Beratung (+49) 07123 / 960-193 · Zentrale (+49) 07123 / 960-0 Telefax (+49) 07123 / 960-195 · E-mail: verkauf@gutekunst-co.com																																																																																						

7.2 BPW-Sensor-Schaltplan V 1.3

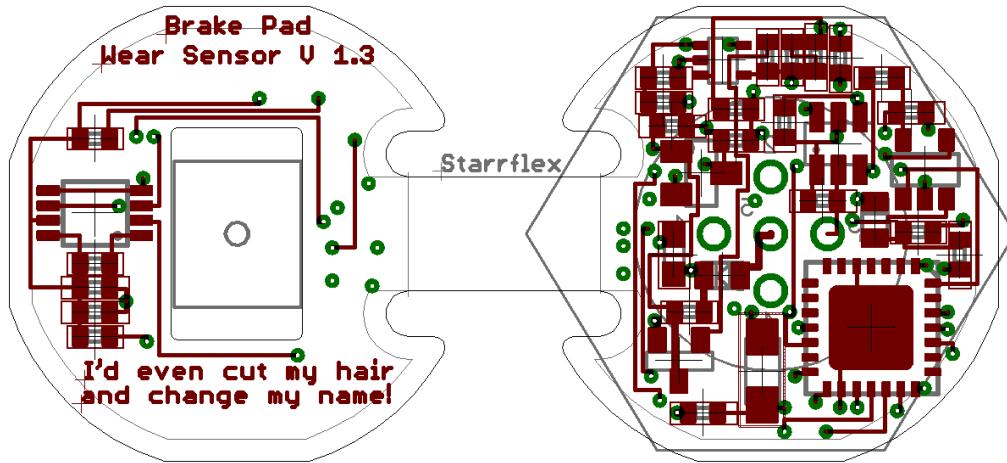
Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

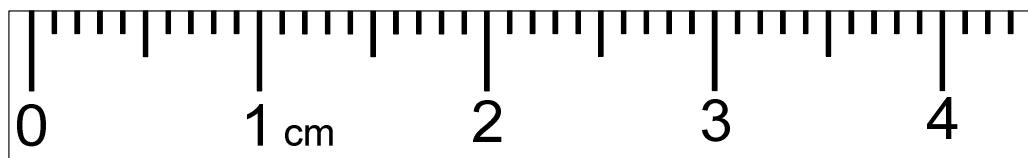
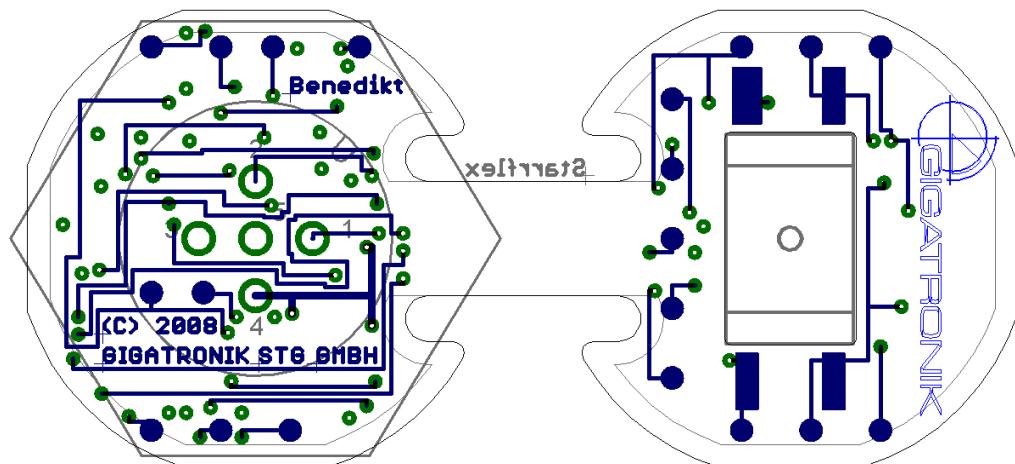


7.3 BPW-Sensor-Leiterplatte V 1.3

Oberseite (Top):



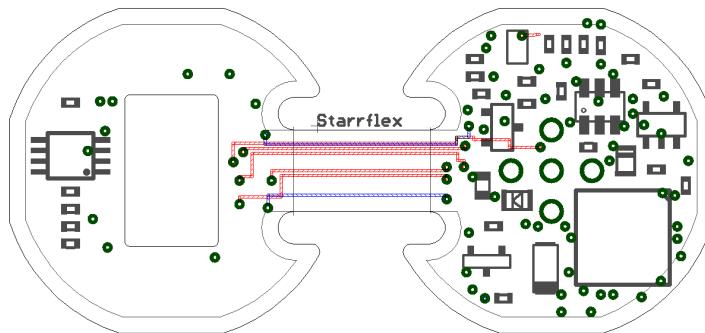
Unterseite (Bottom):



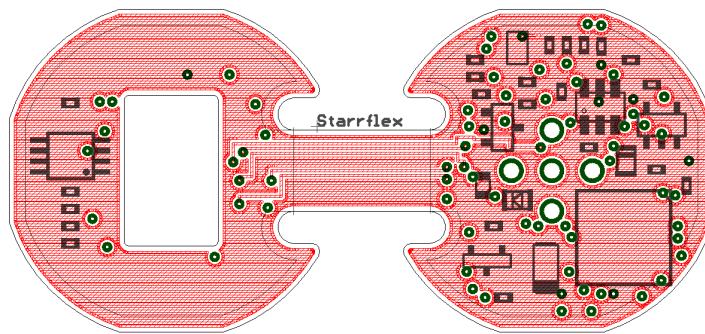
Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

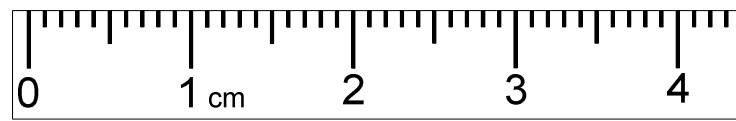
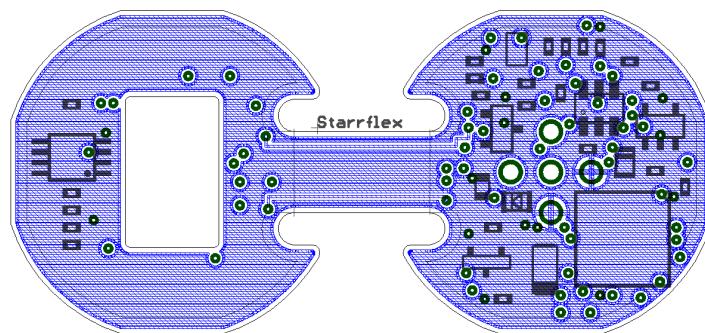
Layout der flexiblen Leitung:



Obere Innenlage +5 V:



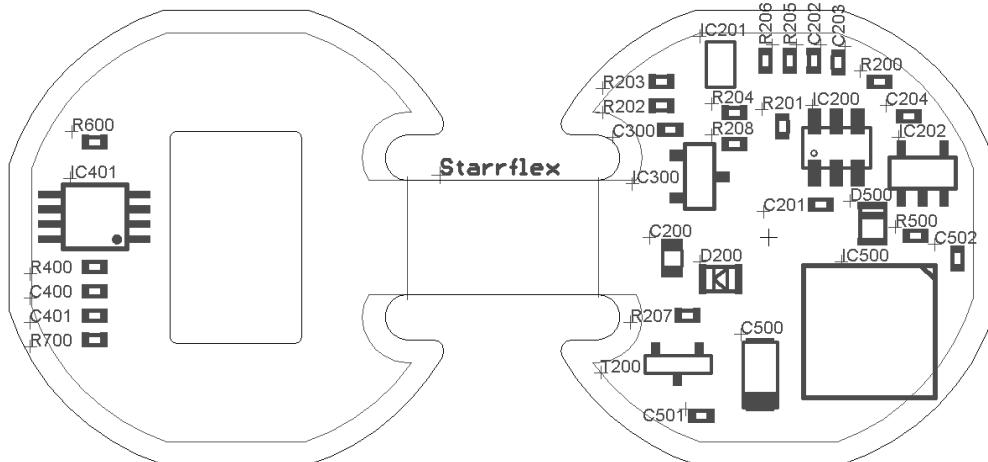
Untere Innenlage GND:



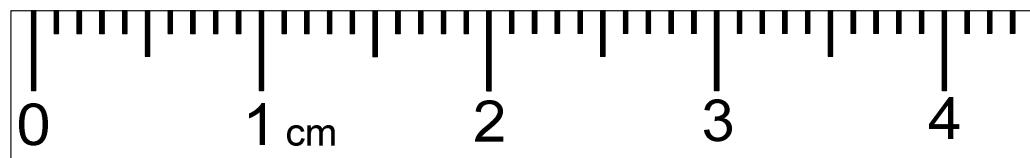
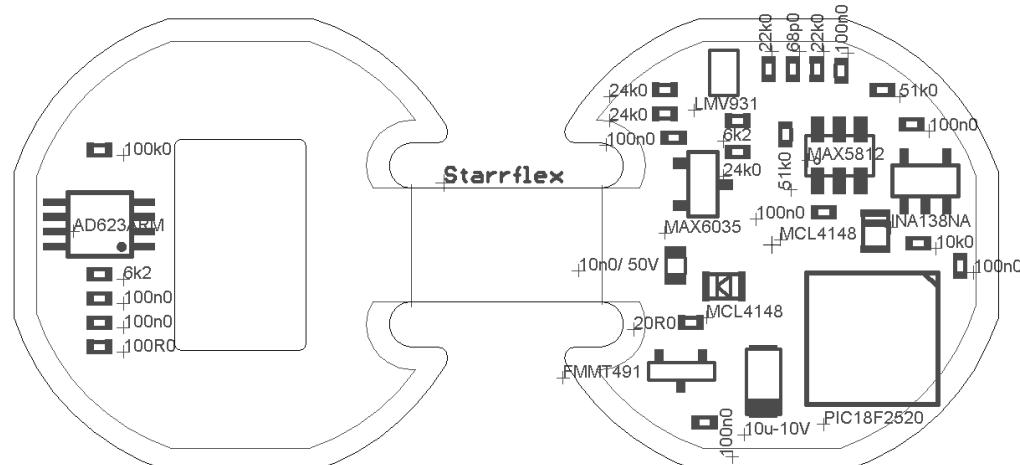
Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Bestückungsplan mit Namen:



Bestückungsplan mit Werten:



Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

7.4 BPW-Sensor-Stückliste V 1.3

Pos.	Anzahl	Bauteil	Wert	Bauform	Beschreibung	Stückzahl, 5 Sensoren	Stückzahl, 110 Sensoren
1	1	C200	10 nF	0603	Kondensator, 50 V	5	110
2	8	C201, C203, C204, C300, C400, C401, C501, C502	100 nF	0402	Kondensator	40	880
3	1	C202	68 pF	0402	Kondensator	5	110
4	1	C500	10 μ F	SMCA	Kondensator, 10 V	5	110
5	1	D200	MCL4148	MicroMELF	Diode	5	110
6	1	D500	MCL4148	MicroMELF	Diode	5	110
7	1	IC200	MAX5812*	SOT-23, 6L	D/A-Wandler	5	110
8	1	IC201	LMV931	SC-70, 5L	OP-Verstärker	5	110
9	1	IC202	INA138NA	SOT-23, 5L	I/U-Wandler	5	110
10	1	IC300	MAX6035BAUR50 bzw. AAUR50	SOT-23, 3L	Spannungsreferenz	5	110
11	1	IC400	FSS1500NSB		Kraftsensor, 0-1500 g	5	110
12	1	IC401	AD623ARM	μ SOIC, 8L	Instrumentenverstärker	5	110

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

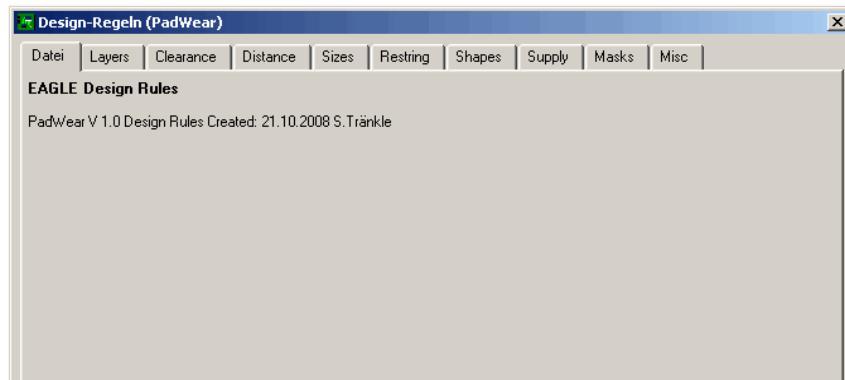
Brake Pad Wear Sensor

Pos.	Anzahl	Bauteil	Wert	Bauform	Beschreibung	Stückzahl, 5 Sensoren	Stückzahl, 110 Sensoren
13	1	IC500	PIC18F2520-I/ML	QFN, 28L	28-Lead, 6 x 6 mm	5	110
14	2	R200, R201	51 kOhm	0402	Widerstand	10	220
15	3	R202, R203, R208	24 kOhm	0402	Widerstand	15	330
16	1	R204	6,2 kOhm	0402	Widerstand	5	110
17	2	R205, R206	22 kOhm	0402	Widerstand	10	220
18	1	R207	20 Ohm	0402	Widerstand	5	110
19	1	R400	6,2 kOhm	0402	Widerstand	5	110
20	1	R500	10 kOhm	0402	Widerstand	5	110
21	1	R600	100 kOhm	0402	Widerstand	5	110
22	1	R700	100 Ohm	0402	Widerstand	5	110
23	1	T200	FMMT491	SOT-23	NPN-Transistor	5	110
24	1	X100	Flanschstecker	M20, 5-polig	Binder, Serie 713-5, 09-3441-90-05	5	110

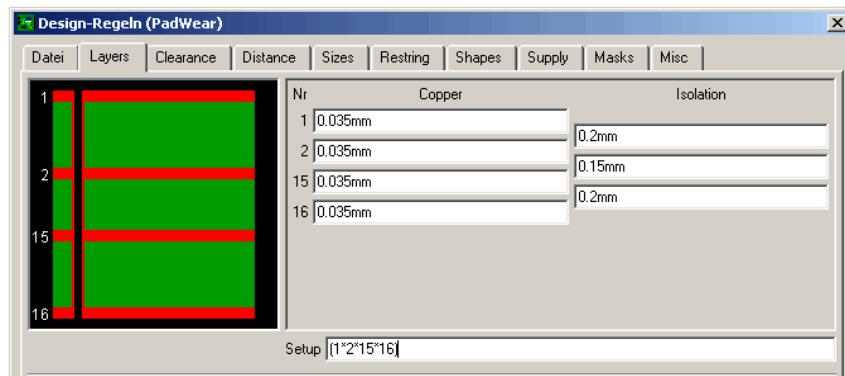
* MAX5812 Für MAX5812 darf ein beliebiges (L, M, N, P) aber dann gleiches (!) Bauteil für alle Sensorenplatinen genommen werden!
Und nach der Bestückung, Rückmeldung anfordern, was für ein Bauteil (MAX5812L (AAYT), MAX5812M (AAYV), MAX5812N (AAYX),
MAX5812P (AAYZ)) verbaut wurde!

7.5 EAGLE-Design-Regeln

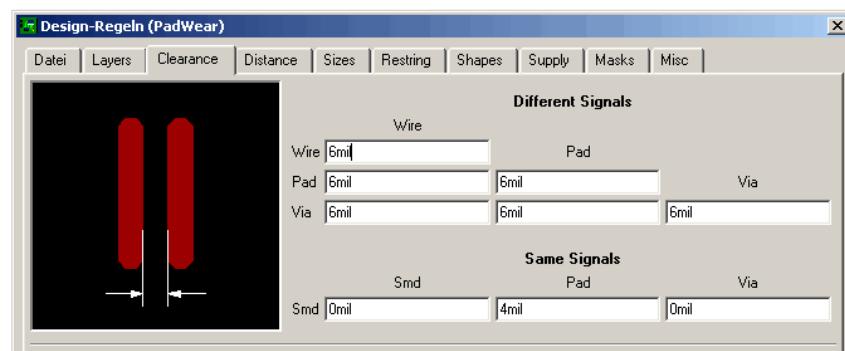
Datei:



Layers:



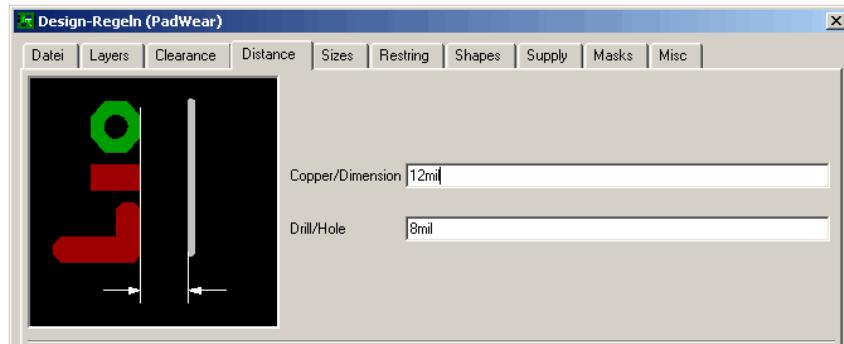
Clearance:



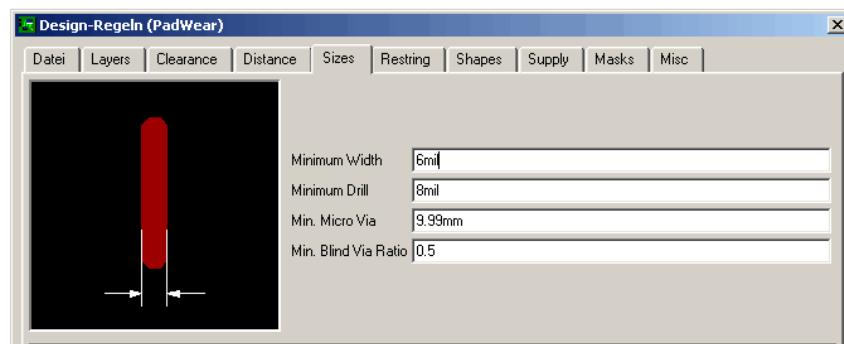
Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

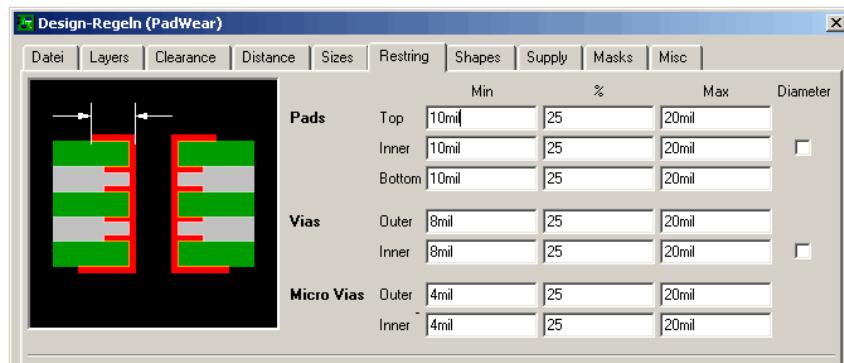
Distance:



Sizes:



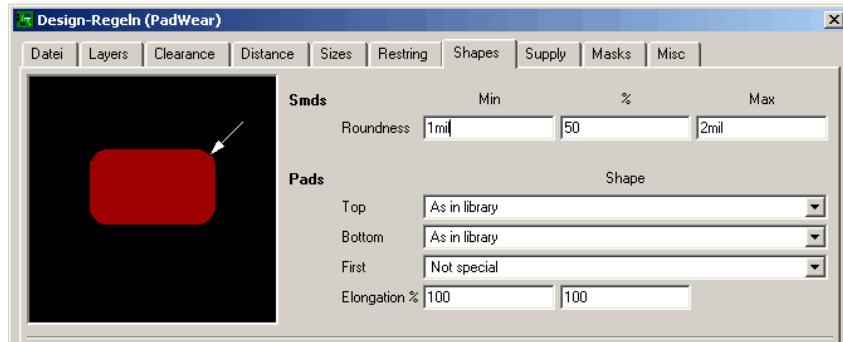
Restring:



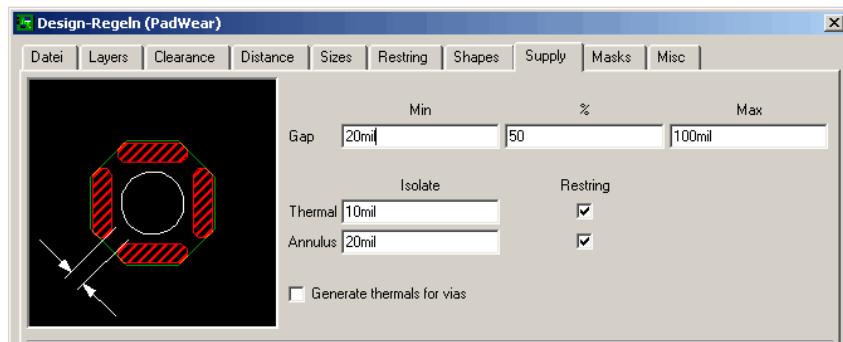
Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

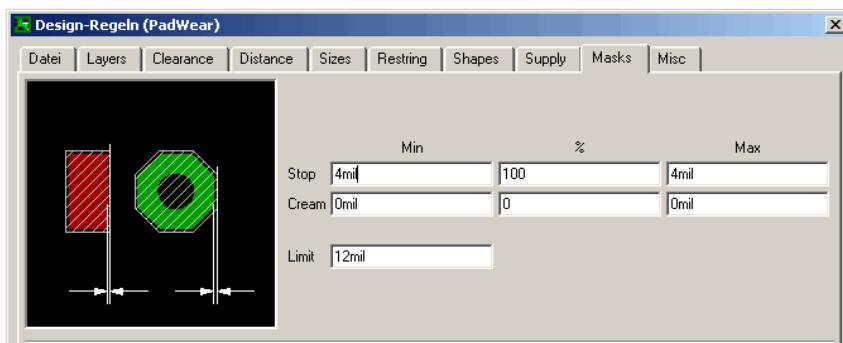
Shapes:



Supply:



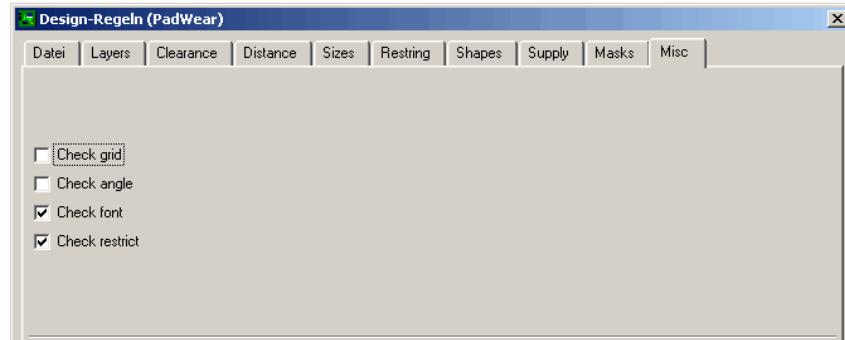
Masks:



Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems
mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

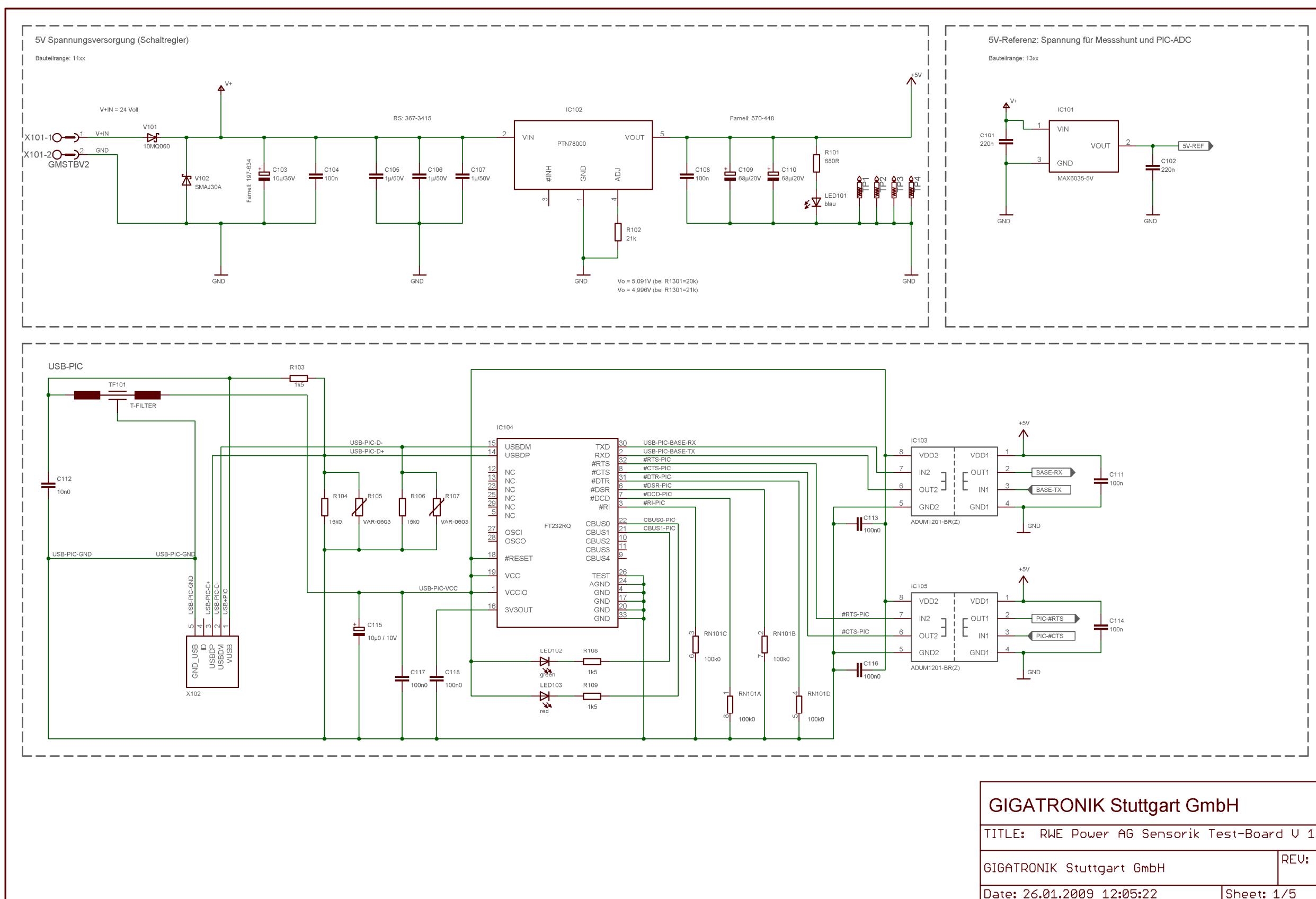
Misc:



7.6 Testboard-Schaltplan V 1.5 interim

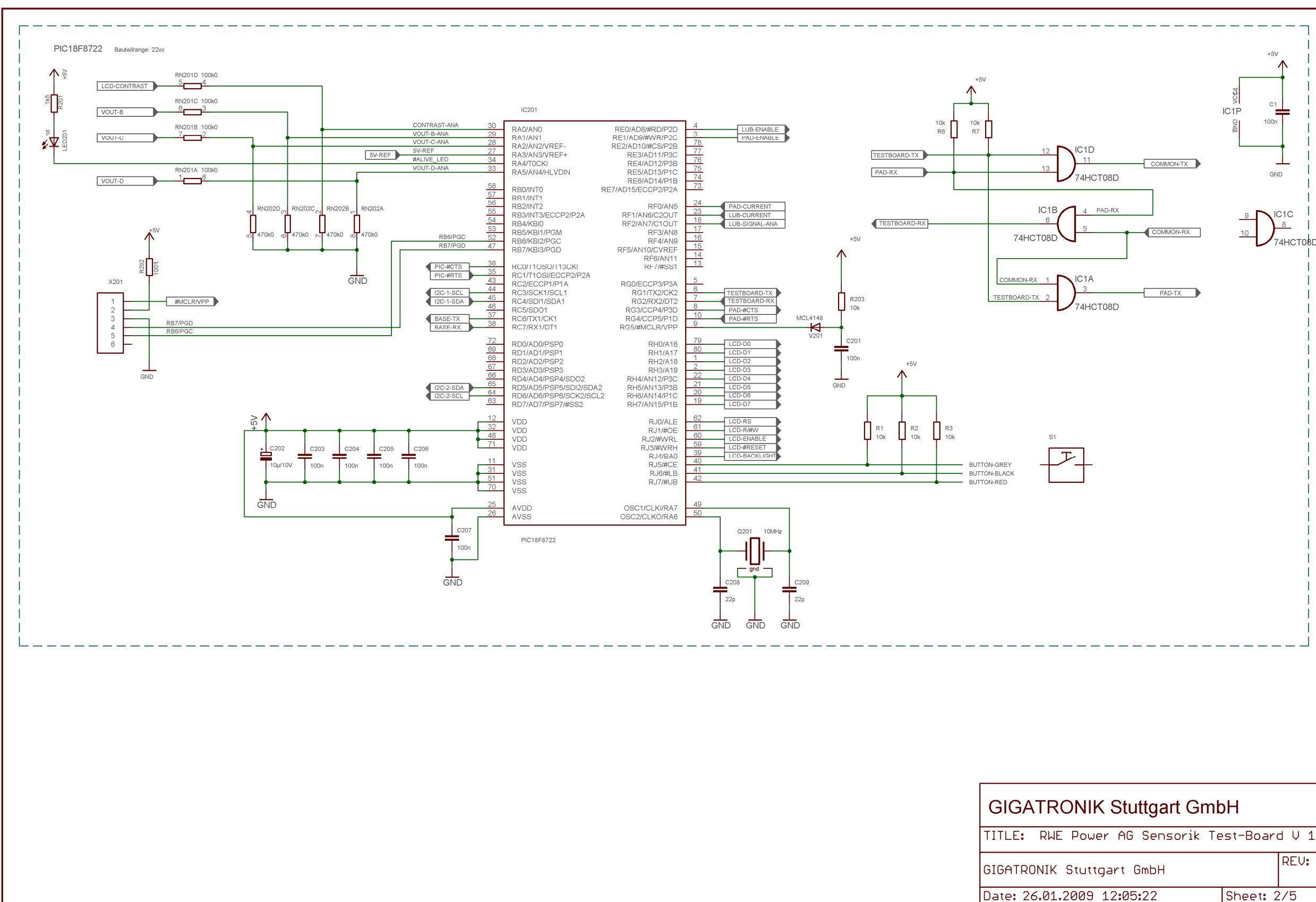
Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor



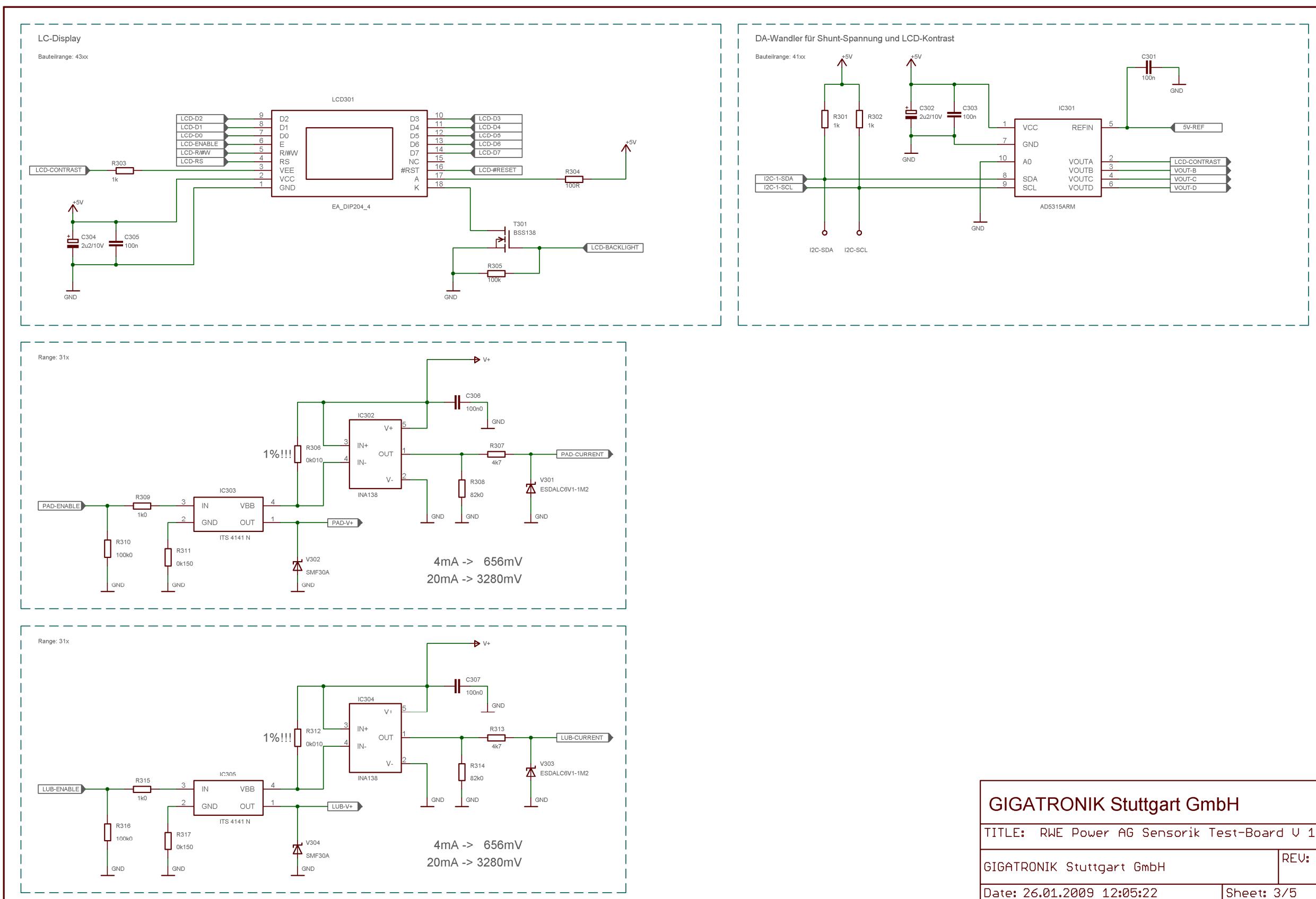
Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

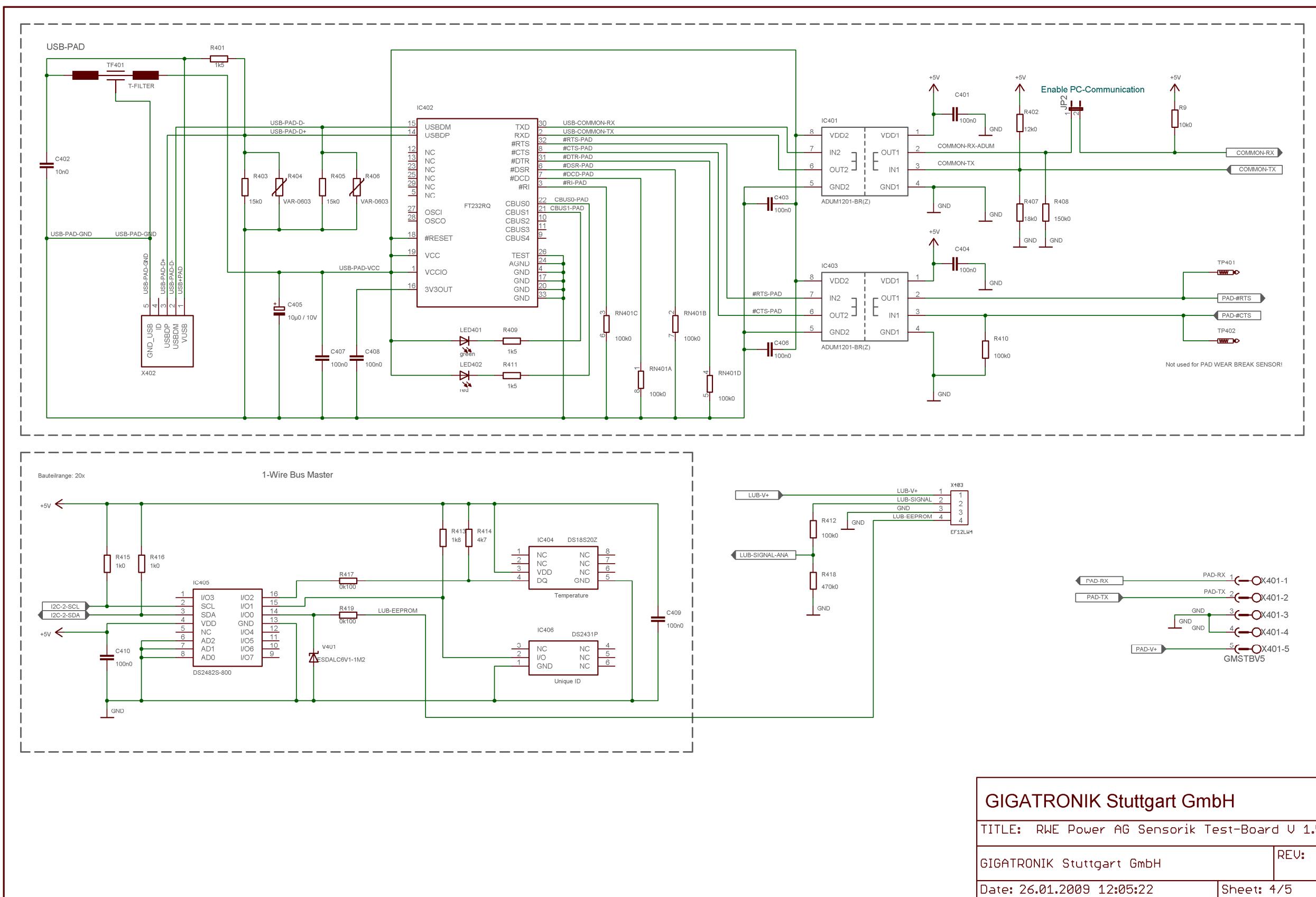


Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

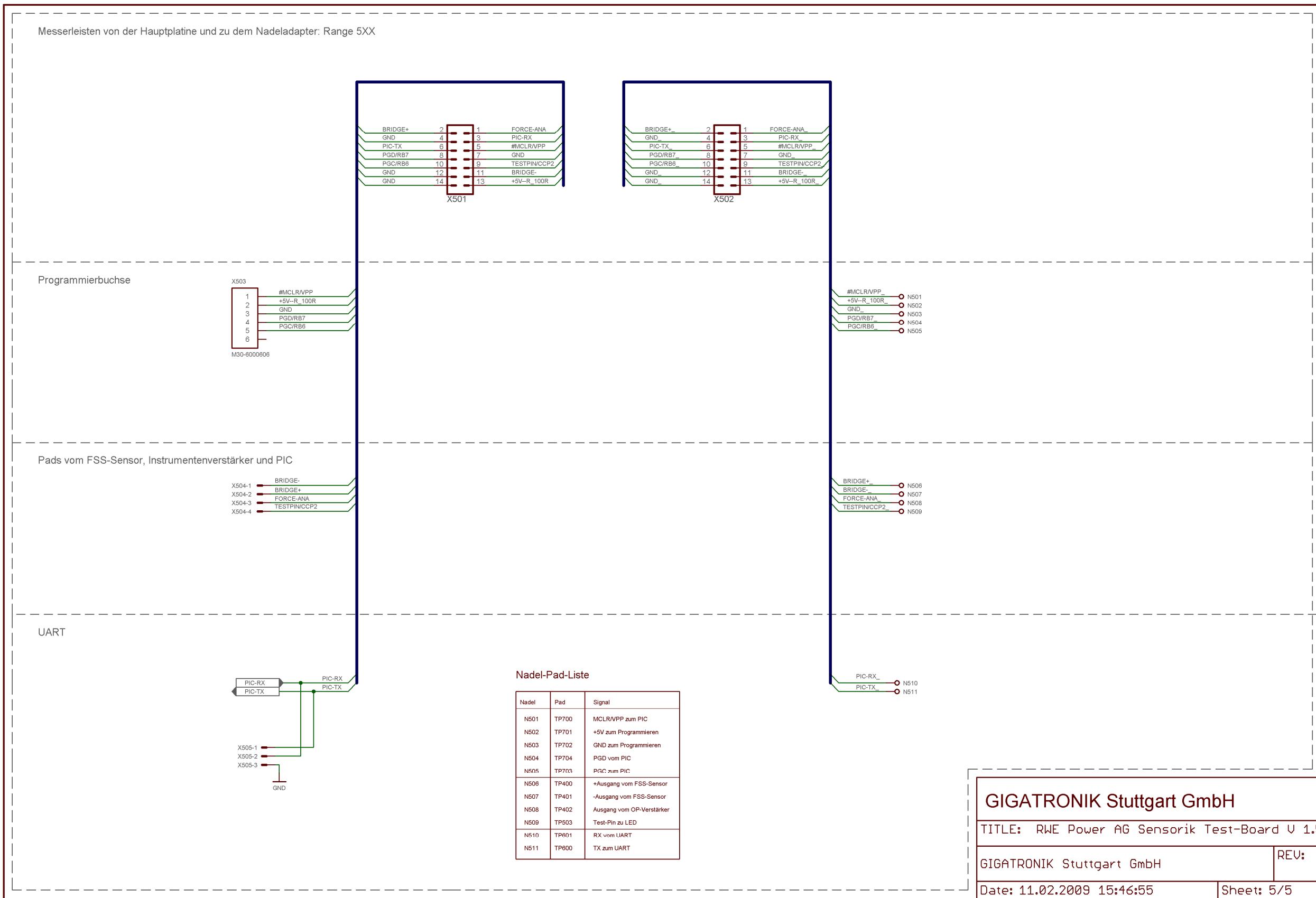
Brake Pad Wear Sensor



Brake Pad Wear Sensor



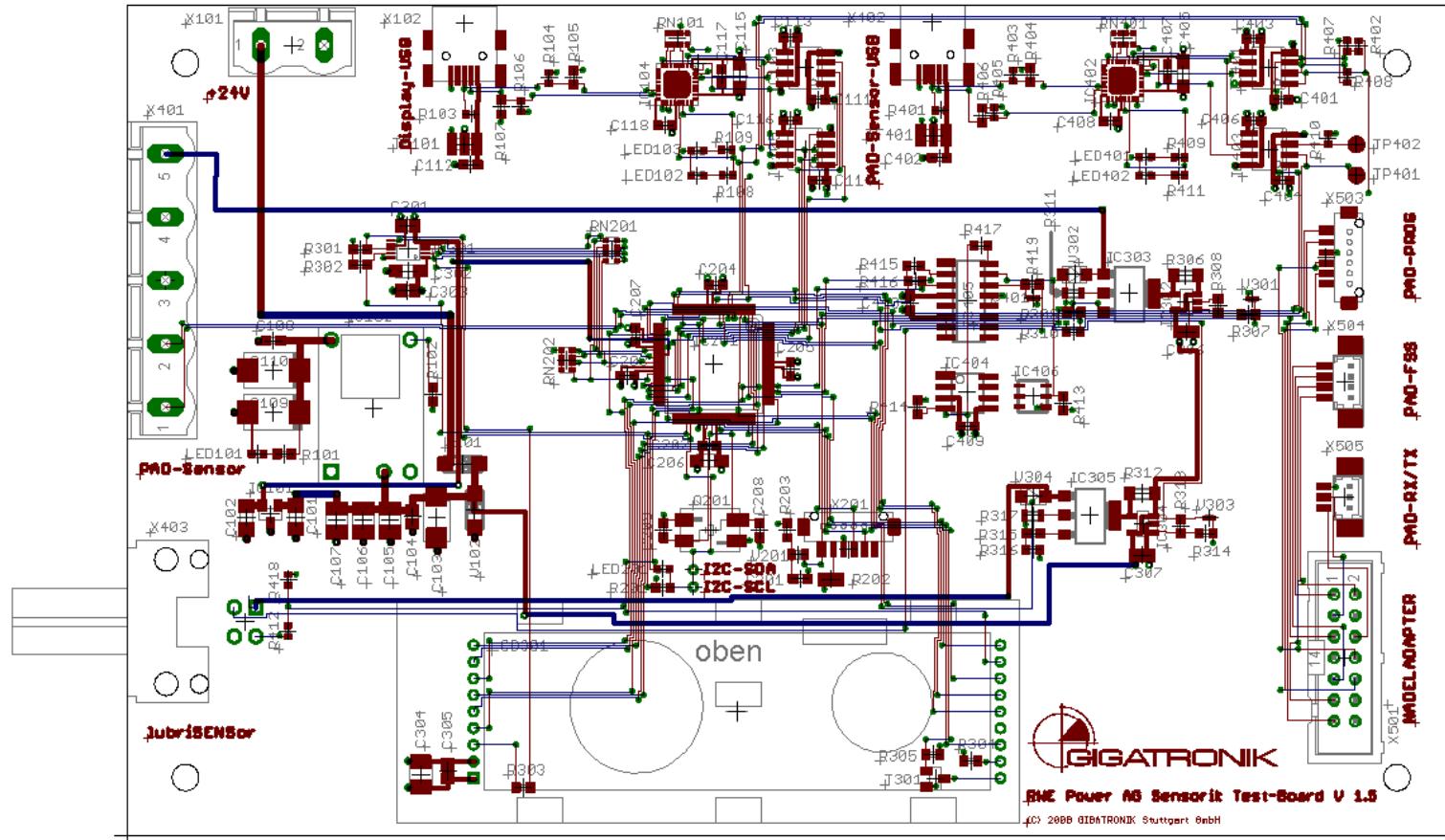
Brake Pad Wear Sensor



Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

7.7 Testboard-Leiterplatte V 1.5



7.8 Testboard-Stückliste V 1.5

Pos.	Anzahl	Bauteil	Wert	Bauform	Beschreibung
1	2	C101, C102	220n	C-EUC1206	Kondensator
2	1	C103	10 μ /35V	CPOL-EUSMCC	Kondensator
3	4	C104, C301, C303, C305	100n	C-EUC0805	Kondensator
4	3	C105, C106, C107	1 μ /50V	C-EUC1210	Kondensator
5	9	C108, C111, C114, C201, C203, C204, C205, C206, C207	100n	C-EUC0603	Kondensator
6	2	C109, C110	68 μ /20V	CPOL-EUSMCE	Kondensator
7	2	C112, C402	10n0	C-EUC0603	Kondensator
8	12	C113, C116, C117, C118, C401, C403, C404, C406, C407, C408, C409, C410	100n0	C-EUC0603	Kondensator
9	2	C115, C405	10 μ 0/10V	CPOL-EUSMCA	Kondensator
10	1	C202	10 μ /10V	CPOL-EUSMCA	Kondensator
11	2	C208, C209	22p	C-EUC0603	Kondensator
12	1	C302	2 μ 2/10V	CPOL-EUSMCA	Kondensator
13	1	C304	2 μ 2/10V	CPOL-EUSMCB	Kondensator
14	2	C306, C307	100n0	C-EUC0805	Kondensator
15	1	IC101	MAX6035AAUR-5V	SOT-23, 3L	Spannungsreferenz
16	1	IC102	PTN78000W	PTN78000WAH	wird beige stellt
17	4	IC103 , IC10 5, IC401, IC403	ADUM1201-BR(Z)	SOIC N	Dual-Channel Digital Isolators
18	2	IC104 , IC402	FT232RQ	QFN-32-1	USB Interface

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Pos.	Anzahl	Bauteil	Wert	Bauform	Beschreibung
19	1	IC201	PIC18F8722	TQFP, 80L	Mikrocontroller
20	1	IC301	AD5315ARM	MSOP, 10L	10-Bit DACS
21	2	IC302 , IC304	INA138	SOT-23, 5L	I/U-Wandler
22	2	IC303 , IC305	ITS4141N	BSP450, SOT-223R	wird beigestellt
23	1	IC404	DS18S20Z	SO8	wird beigestellt
24	1	IC405	DS2482S-800	SO16	wird beigestellt
25	1	IC406	DS2431P	TSOC6	wird beigestellt
26	1	LCD301	EA_DIP204_4	EADIP204B-4NLW	wird beigestellt
27	1	LED101	blau	LEDCHIPLED_0603	Leuchtdiode
28	2	LED102, LED 401	green	LEDCHIPLED_0603	Leuchtdiode
29	2	LED103, LED 402	red	LEDCHIPLED_0603	Leuchtdiode
30	1	LED201	rot	LEDCHIPLED_0603	Leuchtdiode
31	1	Q201	10MHz	QUARZ_NKS7	Resonator
32	1	T301	BSS138	BSS138	Transistor
33	1	R101	680R	R-EU_R0603	Widerstand
34	1	R102	21k	R-EU_R0603	Widerstand
35	6	R103, R108, R109, R401, R409, R411	1k5	R-EU_R0402	Widerstand
36	4	R104, R106, R403, R405	15k0	R-EU_R0402	Widerstand
37	4	R105, R107, R404, R406	VAR-0603	VARISTORCN0603	Würth: 823 56 050 050
38	1	R201	1k5	R-EU_R0603	Widerstand
39	1	R202	100R	R-EU_R0805	Widerstand
40	1	R203	10k	R-EU_R0603	Widerstand
41	3	R301, R302, R303	1k	R-EU_R0603	Widerstand
42	1	R304	100R	R-EU_R0603	Widerstand
43	1	R305	100k	R-EU_R0603	Widerstand
44	2	R306, R312	0k010	R-EU_MELFO204W	Widerstand, 1% - E96!!!
45	3	R307, R313, R414	4k7	R-EU_R0603	Widerstand

Entwicklung und B-Muster-Aufbau eines Wegsensorsystems mit integrierter 4 - 20 mA Stromschleife

Brake Pad Wear Sensor

Pos.	Anzahl	Bauteil	Wert	Bauform	Beschreibung
46	2	R308, R314	82k0	R-EU_R0603	Widerstand
47	4	R309, R315, R415, R416	1k0	R-EU_R0603	Widerstand
48	2	R310, R316	100k0	R-EU_R0603	Widerstand
49	2	R311, R317	0k150	R-EU_MELF0102W	Widerstand
50	1	R402	12k0	R-EU_R0402	Widerstand
51	1	R407	18k0	R-EU_R0402	Widerstand
52	1	R408	150k0	R-EU_R0402	Widerstand
53	2	R410, R412	100k0	R-EU_R0402	Widerstand
54	1	R413	1k8	R-EU_R0603	Widerstand
55	2	R417, R419	0k100	R-EU_R0603	Widerstand
56	1	R418	470k0	R-EU_R0402	Widerstand
57	3	RN101 , RN20 1, RN401	100k0	4R-NCAY16	Widerstand
58	1	RN202	470k0	4R-NCAY16	Widerstand
59	2	TF101 , TF40 1	T-FILTER	NFE31PT222Z1E9	Filter
60	1	V101	10MQ060	SCHOTTKY-DIODE	Diode
61	1	V102	SMAJ18A	SCHOTTKY-DIODE	Diode
62	1	V201	MCL4148	DIODE	Diode
63	3	V301, V303, V401	ESDALC6V1-1M2	ESDALC6V1-1M2	Diode
64	2	V302, V304	SMF30A	SMFXA	Diode
65	1	X101	GMSTBV2	GMSTBV2	wird beigestellt
66	2	X102, X402	USB MINI	USB MINI-B SMT W/PEGS	MOLEX - 675030020
67	1	X201	M30-6000606	CON-HARWIN-M30-6000606	
68	1	X401	GMSTBV5	GMSTBV5	wird beigestellt
69	1	X403	EF12LW4	EF12LW4	wird beigestellt
70	1	X501	14-pol. Stifteleiste	14-pol. Stifteleiste	14-pol. Stifteleiste
71	1	X503	M30-6000606	CON-HARWIN-M30-6000606	MOLEX, 6 Pol.
72	1	X504	53398-04	53398-04	MOLEX, 4 Pol.
73	1	X505	53398-03	53398-03	MOLEX, 3 Pol.

7.9 Programm-Listing zum Kalibrierungsablauf auf dem Testboard

```
//  
  
// static void DefaultAutoCalibrationHandler(void)  
  
//  
  
static void DefaultAutoCalibrationHandler(void)  
{  
  
    // PWS autocalibration  
  
    if (tApp.ucPWSCommandsPending == 0) //  
    {  
  
        switch ( tApp.enPWSAutoConfState )  
        {  
  
            case acINIT:  
  
                // Autocalibration started  
  
                printf("PWS auto-calibration started.");  
  
                tApp.bAutoCalMode = boolON;  
  
                // start with loop calibration  
  
                tApp.enPWSAutoConfState = acCALI_START;  
  
                //next state ASAP  
  
                TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 0);  
  
                break;  
  
  
            case acCALI_START:  
  
                // current loop calibration started  
  
                printf("\r\n\r\n +-----+\r\n| Calibrating current loop |\r\n+-----+\r\n\r\n\t  
Measuring low current...");  
  
                // request 4 mA  
  
                printfM(tApp.hU4IO, "DAC RAW %5.3f\r\n",  
defLOOP_OUTPUT_LOW);
```

Brake Pad Wear Sensor

```
// low current requested, measure it next
tApp.enPWSAutoConfState = acCALI_LOW;
// next state in 2s
TimerSetTime(HTIMER(timerCAL),
             defLOOP_TIME_FOR_CURRENT_TO_ADJUST, 0);
break;

case acCALI_LOW:
    // "PWS CALI LOW" measure low current
    tApp.tPWS.fX1 = tApp.fPadCurrent;
    tApp.tPWS.fY1 = defPWS_Y1_DEFAULT;

    // request 20 mA
    printfM(tApp.hU4IO, "DAC RAW %5.3f\r\n",
            defLOOP_OUTPUT_HIGH);
    printf("\r\n\tMeasuring high current...");

    // high current requested, measure it next
    tApp.enPWSAutoConfState = acCALI_HIGH;
    // next state in 2s
    TimerSetTime(HTIMER(timerCAL),
                 defLOOP_TIME_FOR_CURRENT_TO_ADJUST, 0);
    break;

case acCALI_HIGH:
    // "PWS CALI HIGH" measure HIGH current
    tApp.tPWS.fX2 = tApp.fPadCurrent;
    tApp.tPWS.fY2 = defPWS_Y2_DEFAULT;

    // measured everything, now calculate next
    tApp.enPWSAutoConfState = acCALI_CALC;
```

Brake Pad Wear Sensor

```
// next state ASAP
TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 0);
break;

case accALI_CALC:
    // "PWS CALI CALC" calculate slope and offset
    if ( TwoPointStraight (&(tApp.tPWS)) == enOK )
    {
        // output
        printf("\r\n\r\n\tSlope calculated as:
%5.3f",tApp.tPWS.fSlope);
        printf("\r\n\tOffset calculated as:
%5.3f",tApp.tPWS.fOffset);
    }

    // save calculated parameters next
    tApp.enPWSAutoConfState = accALI_SAVE;
    // next state ASAP
    TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 0);
    break;

case accALI_SAVE:
    // save parameters
    printf("\r\n\tSaving parameters... ");
    // "PWS CALI SAVE"
    // Assemble output string

    sprintf((char*)tApp.pucBuffer, "PS OFF %5.3f",
            tApp.tPWS.fOffset); //
    printfM(tApp.hU4IO, "%s\r\n", (char*)tApp.pucBuffer);
    //
```

Brake Pad Wear Sensor

```
// Save slope
sprintf((char*)tApp.pucBuffer, "PS SLO %5.3f",
        tApp.tPWS.fSlope);           //
printfM(tApp.hU4IO, "%s\r\n", (char*)tApp.pucBuffer);
//


// TODO "if (save successful)"

// request calibrated midway current output
printfM(tApp.hU4IO, "DAC LOOP %5.3f\r\n",
        defLOOP_OUTPUT_MIDWAY);
printf("\r\n\r\n\tChecking calibration: ");

// low current requested, check it next
tApp.enPWSAutoConfState = accALI_CHECK;
// next state in 2s
TimerSetTime(HTIMER(timerCAL),
             defLOOP_TIME_FOR_CURRENT_TO_ADJUST, 0);
break;

case accALI_CHECK:

    // check if midway output is within boundaries

    if (defLOOP_OUTPUT_MIDWAY + 0.1 > tApp.fPadCurrent
        // within tolerance ?
        && defLOOP_OUTPUT_MIDWAY - 0.1 < tApp.fPadCurrent)
        // 5 percent of 20mA = 1mA

        // but 0.5 percent should be doable ;)
    {
        // Success
        printf ("successful.");
    }
```

Brake Pad Wear Sensor

```
// current loop calibration done,  
// carry on to position sensor  
tApp.enPWSAutoConfState = acCALP_START;  
  
// next state ASAP  
TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 0);  
}  
else  
{  
    // Thank you, try again  
    printf ("failed!");  
  
    // loop calibration failed  
    tApp.enPWSAutoConfState = acERROR;  
    // next state ASAP  
    TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 0);  
}  
  
break;  
  
case acCALP_START:  
    printf("\r\n\r\n"  
          "\r\n-----+\r\n          | Calibrating position sensor |\r\n          -----+");  
  
    printf("\r\n\r\n\r\n\tPlease press [BLACK] button  
          \r\n\twhen at lower ledge.");  
  
    // disable if pressed before  
    tApp.bBlackButtonPressed = boolOFF;
```

Brake Pad Wear Sensor

```
// wait for black button pressed next
tApp.enPWSAutoConfState = acCALP_LOW_WAIT;

// next state ASAP
TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 0);
break;

case acCALP_LOW_WAIT:
    // check if black button was pressed
    if(tApp.bBlackButtonPressed)
    {
        // Button pressed
        printf("\r\n\r\n\tMeasuring lower ledge value...");

        tApp.enPWSAutoConfState = acCALP_LOW;
        // next state in 2s
        TimerSetTime(HTIMER(timerCAL),
                     defFORCE_TIME_FOR_VALUE_TO_ADJUST, 0);
    }
    else
    {
        // Button not pressed yet
        // printf("\x08.");
        // check again in 250ms
        TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 250);
    }
    break;

case acCALP_LOW:
    // measure lower ledge
    printfM(tApp.hU4IO, "PWS CALP LOW\r\n");
```

Brake Pad Wear Sensor

```
// now upper ledge
printf("\r\n\r\n\tPlease press [BLACK] button
      \r\n\twhen at upper ledge.");

// disable if pressed before
tApp.bBlackButtonPressed = boolOFF;

// now wait for upper ledge
tApp.enPWSAutoConfState = acCALP_HIGH_WAIT;
// next state ASAP
TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 0);
break;

case acCALP_HIGH_WAIT:
    // check if black button was pressed
    if(tApp.bBlackButtonPressed)
    {
        // Button pressed

        printf("\r\n\r\n\tMeasuring upper ledge value...");

        // measure upper ledge
        tApp.enPWSAutoConfState = acCALP_HIGH;
        // next state in 2s
        TimerSetTime(HTIMER(timerCAL),
                     defFORCE_TIME_FOR_VALUE_TO_ADJUST, 0);
    }
    else
    {
        // Button not pressed yet
        // printf(".");
        // check again in 250ms
```

Brake Pad Wear Sensor

```
    TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 250);  
}  
  
break;  
  
case accCALP_HIGH:  
    // measure upper ledge  
    printfM(tApp.hU4IO, "PWS CALP HIGH\r\n");  
    tApp.ucPWSCommandsPending++;  
  
    // measured everything, now calculate  
    tApp.enPWSAutoConfState = accCALP_CALC;  
    // next state ASAP  
    TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 0);  
    break;  
  
case accCALP_CALC:  
    // calculate position sensor offset and slope  
  
    printf("\r\n\r\n\tCalculating...");  
    printfM(tApp.hU4IO, "PWS CALP CALC\r\n");  
    tApp.ucPWSCommandsPending++;  
  
    // save parameters next  
    tApp.enPWSAutoConfState = accCALP_SAVE;  
    // next state ASAP  
    TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 0);  
    break;  
  
case accCALP_SAVE:  
    // save parameters  
    printf("\r\n\tSaving values...");  
    printfM(tApp.hU4IO, "PWS CALP SAVE\r\n");
```

Brake Pad Wear Sensor

```
tApp.ucPWSCommandsPending++;

// we're done, enable process mode
tApp.enPWSAutoConfState = acENABLE_PROC;

// next state ASAP
TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 0);
break;

case acENABLE_PROC:
    // enable process mode
    printfM(tApp.hU4IO, "PWS MODE PROC\r\n");
    printf("\r\n\tEnabling process mode...");
    // tApp.ucPWSCommandsPending++;
    // mode doesnt give a reply yet
    // finished
    tApp.enPWSAutoConfState = acFINISHED;
    // next state ASAP
    TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 0);
    break;

case acFINISHED:
    printf("\r\n\r\nFinished.");
    // exit
    tApp.enPWSAutoConfState = acEXIT;
    // next state ASAP
    TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 0);
    break;

case acERROR:
    printf("\r\n\r\nFAILED: An error occurred.");
```

Brake Pad Wear Sensor

```
// exit
tApp.enPWSAutoConfState = acEXIT;
// next state ASAP
TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 0);
break;

case acEXIT:
    // re-enter ASAP
    TimerSetTime(HTIMER(timerCAL), 0, 0);
    // stop timer
    TimerSetMode(HTIMER(timerCAL), timermodeSTOP);
    tApp.bAutoCalMode = boolOFF;
    CPP(" ");
    break;
}

else
{
/*     printf("Communication error!\r\n");
    TimerSetMode(HTIMER(timerCAL), timermodeSTOP);
    tApp.ucPWSCommandsPending = 0;
    CPP(""); */
}
} // DefaultAutoCalibrationHandler(void)
```

8 Quellenverzeichnis

- [1] Federn, Download von http://www.hp-gramatke.de/pmm_physics/german/page0350.htm am 03.01.2009.
- [2] Paland, Ernst-Günter: Technisches Taschenbuch. INA-Schaeffler KG, Herzogenaurach, 2002.
- [3] EAGLE-Produkt-Information, Download von <http://www.cadsoft.de/info.htm> am 21.12.2008.
- [4] Makdessian, A.: Entwurf einer 4 - 20 mA Stromschleife, Download von www.all-electronics.de/ai/resources/60c03f3ec4d.pdf am 09.01.2009.
- [5] Schmidt, H.: C Ent-Packt. MITP-Verlag, Bonn, 2001.
- [6] Analog Microelectronics GmbH, Stromüberwachung in einer 2-Draht Stromschleife (4 .. 20 mA), Download von www.analogmicro.de/products/info/german/analogmicro.de.an1016.pdf am 09.01.2009.
- [7] Grafikdatei 5423906.jpg, Download von www.panoramio.com/photos/original/5423906.jpg am 12.01.2009.
- [8] Kühl, M.: Kolloquium beltGATE.ppt, GIGATRONIK GmbH, Stuttgart, 2006.
- [9] GIGATRONIK GmbH, Projekt 08-1G3600-001-02, Stuttgart, 2008.
- [10] Grafikdatei Tagebau Garzweiler Panorama 2005.jpg, Download von http://de.wikipedia.org/wiki/Tagebau_Garzweiler am 12.01.2009.
- [11] XTR115.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 12.01.2009.
- [12] Grafikdatei FSS1500NSB,%20FSS1500NSR,%20FSS1500NST.jpg, Download von <http://digikey.com/it/> am 14.01.2009.
- [13] Grafikdatei weatstone.gif, Download von www.sensocon.de/bilder/produkte/weatstone.gif am 14.01.2009.
- [14] ZDF: Giganten im Tagebau, Download von <http://www.zdf.de/ZDFde/inhalt/29/0,1872,7006141,00.html> am 15.01.2009.
- [15] AD623BN.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 16.01.2009.
- [16] PIC18F2520: 7310747_1.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 16.01.2009.

- [17] MAX5812.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 16.01.2009.
- [18] LMV931.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 16.01.2009.
- [19] INA138NA: 0djst1o4k1hwa2izji0pe3da0gfy.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 16.01.2009.
- [20] MAX6035.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 16.01.2009.
- [21] PI-Regler, Download von http://www.vias.org/mikroelektronik/regler_pi.html am 16.01.2009.
- [22] PIC10F206: 0iwto2s8tr2plwsqwcy0493sxkcy.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 22.01.2009.
- [23] PIC16F59: 0xtq84fptitpdr7xguauw17uo77y.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 22.01.2009.
- [24] PIC18F2585: 0fpa69x73txq36utx6wc4k0i3jwy.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 22.01.2009.
- [25] dsPIC30F3014: 07ollc85jur0ql6fqsaurdaxu2yy.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 22.01.2009.
- [26] dsPIC30F6014: 07ollc85jur0ql6fqsaurdaxu2yy.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 22.01.2009.
- [27] Framework: Download von <http://de.wikipedia.org/wiki/Framework> am 26.01.2009.
- [28] Gaa, S.: Tutorial, GIGATRONIK GmbH, <R:\Projekte\frameWORK\Tutorial\V1.0\Tutorial.doc>, Stuttgart 25.03.2008.
- [29] Sprut: Die Nutzung des I²C-Interfaces, Download von <http://www.sprut.de/electronic/pic/grund/i2c.htm> am 27.01.2009.
- [30] Braun, W.: Regelungstechnik. Skript zur Vorlesung. Hochschule Esslingen, 2008.
- [31] Honeywell: FSS1500NSB, Download von <http://sccatalog.honeywell.com/imc/datasheet.asp?PN=FSS1500NSB> am 27.01.2009.
- [32] AD623ARM: AD623BN.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 27.01.2009.
- [33] MAX5812: MAX5812.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 27.01.2009.

- [34] LMV931: 0dzplxjx7esrx98r43eg9lly1lpy.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 27.01.2009.
- [35] INA138NA: 0djst1o4k1hwa2izji0pe3da0gfy.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 27.01.2009.
- [36] MAX6035: MAX6035.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 27.01.2009.
- [37] FMMT491: FMMT491.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 27.01.2009.
- [38] MIRA – ELECTRONIC: Kondensatoren, Download von <http://www.mira-electronic.de/> am 27.01.2009.
- [39] MCL4148: MCL4148.pdf, Download von <http://www.datasheetcatalog.com> am 27.01.2009.
- [40] Franz Binder GmbH: Steckverbinder-Katalog Serie 713, S. 13, Download von <http://www.binder-connector.de/pdfs/serien/713.pdf> am 27.01.2009.
- [41] Lutz, H., Wendt, W.: Taschenbuch der Regelungstechnik, 3. Auflage, Verlag Harri Deutschland, Thun und Frankfurt am Main, 2000.
- [42] CadSoft Computer GmbH: EAGLE Trainingshandbuch Version 4.1, Download von <ftp://ftp.cadsoft.de/eagle/program/4.16r2/tutorial-ger.pdf> am 30.01.2009.
- [43] Kethler, A., Neujahr, M.: Leiterplattendesign mit EAGLE. REDLINE GMBH, Heidelberg, 2004.
- [44] Produkt-Info Multilayer: contag_multilayer.pdf, Download von <http://www.contag.de/> am 19.02.2009.
- [45] Starr-flexible Leiterplatten: contag_starr-flexible_leiterplatten.pdf, Download von <http://www.contag.de/> am 19.02.2009.