

Bachelorarbeit

Edo Kriegsmann

Kaskadierbare berührungssensitive reaktive
Flächen mit Objektidentifizierung

Edo Kriegsmann
Kaskadierbare berührungssensitive reaktive
Flächen mit Objektidentifizierung

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Technische Informatik
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. Klemke
Zweitgutachter : Prof. Dr. Heitmann

Abgegeben am August 18, 2010

Thema der Bachelorarbeit

Kaskadierbare berührungssensitive reaktive Flächen mit Objektidentifizierung

Stichworte

Kaskadierbare Module, Leuchtsegmente, kapazitive Berührungserkennung, RFID Objektidentifizierung

Kurzzusammenfassung

Diese Bachelorarbeit beschreibt den Aufbau kaskadierbarer Modulplatinen, welche die Sensor- und Aktormöglichkeiten eines Wohnraums erweitert. So lassen sich beliebig große Flächen erstellen, welche sowohl Berührungen einer Person erfassen, als auch Objekte und deren Position auf der Fläche ermitteln können. Das System kann diese Daten dazu nutzen, den Wohnraum benutzerspezifisch anzupassen, aber auch ein direktes Feedback über rückwärtig angebrachte, mehrfarbige Leuchtsegmente geben. Zu den Kernbereichen dieser Arbeit zählt die Analyse der zu verwendenden Sensor- und Aktortechnik und deren Implementierung in das kaskadierbare Modulsystem. Des Weiteren wird auf die Ansteuerung und der dazu benötigten Modulsoftware eingegangen.

Title of the paper

Cascadable, touch-sensitive, reactive surface with object identification

Keywords

Cascadable modules, light segments, capacitive touch sensors, RFID object identification

Abstract

The bachelor thesis at hand describes the build-up of cascadable module boards which enlarge the sensor and actuator opportunities of residential property. Faces of optional size can be constructed which collect the touch of a person and identify objects and their position on the face. The system is able to use this data for a user-specific adjustment of living space. Moreover, direct feedback via rearwardly tapped multi-colored illuminated segments can be given. A core area of the thesis is the analysis of the used sensor and actuator technique as well as the implementation in the cascadable module system. Additionally, the activation and the required module software are examined.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Listings	9
1 Einleitung	10
1.1 Zielsetzung	11
1.2 Vergleichbare Lösungen	12
1.3 Anforderungen	14
2 Analyse	16
2.1 Sensorik zur Berührungserkennung	17
2.1.1 Optische Objekterkennung	17
2.1.2 Kapazitive Objekterkennung	22
2.2 Objektidentifizierung	31
2.2.1 RFID-Technik	31
2.2.2 RFID-Lesegeräte	31
2.2.3 Aufbaumöglichkeiten des RFID-Readers	32
2.3 Segmentbeleuchtung der Module	34
2.3.1 LED-Technik	34
2.3.2 LED-Treiberbausteine	36
2.4 Datenbusse und Modulverbindungen	37
2.4.1 Datenbus zur Modulkommunikation	37
2.4.2 Segmentinterne Datenwege	41
2.4.3 Bussystem zur Ansteuerung der Modulkaskade	43
2.5 Mikrocontroller	44
2.5.1 Anforderungen an der Mikrocontroller	45
2.5.2 Auswahl des Mikrocontrollers	45
2.6 Steuergerät	46
2.6.1 Mikrocontoller zur Modulansteuerung	46
2.6.2 Ethernet Verbindung	47
2.6.3 Konfiguration des Steuergeräts	47
2.7 Fazit der Analyse	48

3 Realisierung	49
3.1 Prototyp	49
3.2 Grundlagen zum Hardwareaufbau	51
3.2.1 Platinenaufteilung	51
3.2.2 Anforderungen an das Platinendesign	51
3.3 Hardwaredesign der Komponenten	54
3.3.1 Hauptplatine	54
3.3.2 Sensorikplatine zur Berührungserkennung	65
3.3.3 Sensorikplatine zur Objektidentifizierung	65
3.3.4 Steuergerät	69
3.4 Softwaredesign	71
3.4.1 Software zur Modulsteuerung	71
3.4.2 Software auf dem Steuergerät	73
3.4.3 PC-Steuerungssoftware	75
3.5 Interface	75
3.5.1 Adressierung	75
3.5.2 Mikrocontrollerverbindungen	77
3.5.3 I2C Interface zur Modulkommunikation	78
3.5.4 TCP-Interface zur Modulkommunikation	80
3.5.5 Interpretation der Sensor- und Aktordaten	83
3.6 Fertigung	84
3.6.1 3D-Simulation zur Validierung des Platinendesigns	84
3.6.2 Fertigung der Bauteile	86
4 Abschließende Betrachtung	87
4.1 Fazit	87
4.2 Entwicklungsmöglichkeiten	88
Literaturverzeichnis	90
A Anhang	93
A.1 Modulverbindungen	93
A.2 Quellcode des Modulsteuergeräts und der Modulsteuerung	95

Abbildungsverzeichnis

1.1	Lichtinstallation der Vernissage "Romantische Maschinen"	11
1.2	Sensacell (vgl. Sensacell, 2010a)	13
2.1	Schematischer Aufbau der Modulkomponenten	16
2.2	Schematischer Aufbau der Fotosensoren	17
2.3	Schaltplan der acht Fotosensoren	19
2.4	Testaufbau mit 8 berührungsempfindlichen und 64 beleuchteten Feldern	20
2.5	Schaltplan eines RC-Sensors	22
2.6	Schaltplan eines Kippschwingers	24
2.7	Schaltplan des kapazitiven Sensors (vgl. Teuteberg, 2010)	25
2.8	Zum Clock-Signal interviiertes Oszillatrorsignal	26
2.9	Oszillator und Sensorleitung - Nicht berührte Sensorfläche	26
2.10	Oszillator und Sensorleitung - Berührte Sensorfläche	26
2.11	Data und Clock Signal - Nicht berührte Sensorfläche	27
2.12	Data und Clock Signal - Berührte Sensorfläche	27
2.13	Schaltplan zur Berührungserkennung über Frequenzänderung	29
2.14	Frequenz nicht berührter Sensorfläche	30
2.15	Frequenz berührter Sensorfläche	30
2.16	Atmel QT 100 A (vgl. Atmel, 2010b , Seite 2)	30
2.17	RFID-Aufbaumöglichkeit 1	32
2.18	RFID-Aufbaumöglichkeit 2	33
2.19	LED-Kennlinien (Grafik in Anlehnung an Nullohm (2010))	35
2.20	Pulsweitenmodulation (Grafik vgl. www.dtic.upf.edu (2010))	35
2.21	TLC5940 Testplatine	37
2.22	Schaubild der segmentinternen Kommunikationswege	41
2.23	Schaubild der Modulkommunikation	44
2.24	Ethernet Shield	47
3.1	Arduino MEGA	50
3.2	Duemilanove	50
3.3	Strombelastbarkeit der Leiterbahnen (vgl. Multipcb, 2010)	52
3.4	Option 1	55
3.5	Option 2	55

3.6	Option 3	55
3.7	7805 mit vorgeschalteten Dioden	57
3.8	7805 in Kombination mit 7810	58
3.9	Basisbeschaltung eines Atmel ATmega 328	59
3.10	Brildea LED Painter PCB (vgl. Brildea, 2010)	61
3.11	Mainboardlayout Toplayer	63
3.12	Mainboardlayout Bottomlayer	64
3.13	Layout Touchsensor	65
3.14	Layout RFID	65
3.15	Schaltplan der 4 kapazitiven Sensoren	66
3.16	Ringkern-Rechner 1.2	67
3.17	Ringkern-Rechner 1.2	68
3.18	Steuergerät	69
3.19	Modulhauptplatine mit Steuergerät	70
3.20	Adressierung der Leuchtdioden	76
3.21	Adressierung der Sensoren	76
3.22	Busverbindungen des Moduls	77
3.23	3D RFID-Platine - Oben	84
3.24	3D RFID-Platine - Unten	84
3.25	3D Touch-Platine - Oben	84
3.26	3D Touch-Platine - Unten	84
3.27	3D-gerendertes Mainboard mit bestückten Sensorplatinen	85
3.28	Bestückte Sensorplatine	86

Listings

3.1	Quellcode zum Abfragen der Sensordaten	78
3.2	Quellcode zum Setzen von Aktordaten	79
3.3	Quellcode einers TCP-Verbindungsaufbaus	80

1 Einleitung

Ein aktuell großes Thema unter Kunstinteressierten ist der Trend zu interaktiven Kunstgegenständen, welche unter dem Begriff "interactive Art" zu fassen sind. Im April 2010 startete eine Vernissage des Design Departments der HAW, welche sich mit diesem Thema auseinandersetzte. In der Ausstellung unter dem Titel "Romantische Maschinen" (vgl. [HAW-Hamburg, 2010](#)) wurden Projekte gezeigt, welche in Kooperation mit dem Technik und Informatik Department der HAW entstanden sind. Die Ausstellungsstücke verbunden die künstlerischen Aspekte mit interaktiven Elementen, welche die Informatik bereitstellte. So war es den Designern möglich, Kunstgegenstände zu schaffen, welche aktiv mit den Besuchern interagieren konnten. Diese Interaktion stützte sich auf Sensoren vielerlei Art. Unter anderem wurden Sensoren zur Messung von Geräuschpegeln, Temperatur, Bewegung oder dem Abstand zwischen Betrachter und Ausstellungsstück genutzt. Es wurde beispielsweise ein Vorhang aus mehreren hundert Leuchtdioden geschaffen, der durch Messung des Abstandes zum Betrachter verschiedene Leuchtsituationen aktivierte (siehe Grafik 1.1). Am ZKM (Zentrum für Kunst und Medientechnologie) entstand ein Museum, welches sich ausschließlich der interaktiven Kunst widmet (vgl. [Medienmuseum, 2010](#)).

Die Grundlage solcher Projekte liegt sowohl in der Verfügbarkeit von immer kostengünstiger werdender Sensortechnik, als auch der laufend einfacher werdenden Mikrocomputertechnik. Hieraus entstanden Mikrocontrollersysteme wie das "Lili Pad" (vgl. [Arduino, 2010a](#)), welche zur Nutzung kaum Kenntnisse im Bereich Informatik erfordern und so die Verwendung dieser Systeme einem größeren Publikum eröffnet.

Ein weiteres Anwendungsgebiet dieser Sensor- und Mikrocontrollertechnik ist die Verwendung in Wohnräumen. Aus diesem Kontext entstand im Jahr 2010 das "Living Place" Projekt an der HAW (vgl. [Rahimi, 2010](#)), welches sich mit der Technisierung von Wohnräumen beschäftigt. Im Rahmen des "Living Place" ist es unter anderem möglich, zukünftige Technologien unter realen Bedingungen zu entwickeln und zu erproben. Zu diesen Technologien gehören unter anderem Sicherheitssysteme, wie beispielsweise ein System zur Erkennung von Stürzen bewegungseingeschränkter Personen, aber auch Systeme zur Steigerung des Wohnkomforts.

Aus diesen Bereichen entstand der Kern dieser Ausarbeitung. So sollen die künstlerischen Aspekte von "interactive Art" in den Einklang mit einer sinnvollen Sensor- und Aktoerweiterung des Wohnraums gebracht werden.



Abbildung 1.1: Lichtinstallation
der Vernissage
"Romantische
Maschinen"

1.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es ein System zu entwickeln, welches die Sensor- und Aktorelemente eines Wohnraums erweitert. Dies soll es dem Wohnraum ermöglichen, sich präziser den Bedürfnissen eines Bewohners anzupassen. Mit den heutigen technischen Möglichkeiten ist diese Anpassung nur in groben Zügen möglich. Zwar können in eine Wohnung implementierte Instrumente beispielsweise auf Licht oder Temperatur reagieren, jedoch ist dies für weitergehende Automatisierungen und individuelle Bewohneranpassungen nicht ausreichend.

Ein fehlendes Element ist eine Sensorik, die es erlaubt präzise Angaben über den Aufenthaltsort von Objekten zu machen. Diese Sensorik kann in allen Oberflächen eines Wohnraums wie Regalen, Tischen oder Ablagen integriert werden und so Informationen über den Aufenthaltsort von Gegenständen liefern. Diese Objektidentifizierende Elektronik kann durch bereits in Mobiltelefonen und Bildschirmen zur Verwendung kommenden Berührungssensibilität erweitert werden. Durch Kopplung dieser Sensorinformationen mit einem Aktor, wie einer rückwärtig beleuchteten Oberfläche, lässt sich so eine reaktive Oberfläche auf-

bauen, welche auf Berührungen und aufgelegte Gegenstände reagieren kann. Dies eröffnet neue Wege der Interaktion zwischen Bewohner und Wohnraum.

So können Wohnszenarien im Hauscomputer abgelegt und automatisiert abgerufen werden. Beim Eindecken von Tellern auf einen Tisch kann das Wohnsystem das Szenario des Essens abrufen. Dies könnte beispielsweise Lüftungen aktivieren, eine Temperaturanpassung vornehmen oder eine Nachricht in Kinder- oder Arbeitszimmern ausgeben. Zugleich kann die Anzahl der Personen anhand der eingedeckten Teller erkannt werden. Ein weiteres Szenario ist das Anschauen von Videos auf dem Heimkinosystem der Wohnung. Auf diese Art ist es möglich, eine Filmauswahl durch Auflegen des DVD-Trays auf den Tisch zu treffen und damit die Wiedergabe zu starten. Um einen unbeabsichtigten Filmstart zu verhindern, kann die Oberfläche durch die integrierte Aktortechnik verschiedenfarbige Leuchtsegmente neben der aufliegenden Verpackung einblenden, welche die Wiedergabe durch Berühren der Oberfläche bestätigen oder abwählen.

Zur Umsetzung dieser Zielsetzung ist es erforderlich, eine Hardware zu entwickeln, welche die Sensor- und Aktorelemente miteinander zu einem kaskadierbarem Modul vereint.

1.2 Vergleichbare Lösungen

Auf künstlerischer Basis entstanden in den vergangenen Jahren unzählige Projekte, welche vor allem durch die prototyping-Plattform "Arduino" (vgl. [Arduino, 2010b](#)) entstanden sind. So basierten auch die Ausstellungstücke der oben erwähnten Vernissage auf dieser Plattform (vgl. [HAW-Hamburg, 2010](#)).

Kommerziell sind auf diesem Gebiet verschiedene Firmen tätig, welche jedoch eine andere Zielsetzung an dieses System verfolgen. So erlaubt ein Gros der Entwicklungen ausschließlich die Beleuchtung der Objekte oder zielt auf die reine Nutzung als LED-basiertes Display ab. Die Möglichkeit zur Erkennung von Berührungen oder Objekten wird, von einer gleichzeitigen Integration in ein Hausbussystem abgesehen, kaum genutzt.

Sensacell Leuchtsegmente

Die funktional verwandteste Entwicklung, welche als einzige auch kommerziell hergestellt wird, ist in den ebenfalls kaskadierbaren Leuchtsegmente von Sensacell (vgl. [Sensacell, 2010b](#)) zu finden. Mit diesen Leuchtelementen ist es möglich, LED beleuchtete Flächen aufzubauen, welche auf Berührungen von Menschen reagieren können. Auch erlauben diese, zu einer Kaskade verschachtelt, die Verwendung als Bildschirm. Eine Objektidentifikation und Positionsbestimmung ist nicht vorgesehen. Laut Datenblatt (vgl. [Sensacell, 2010b](#), Seite 4) lassen sich diese Module über den RS485 Bus an einen PC anbinden, was so auch eine Anbindung an weitere Netzwerke erlaubt. Durch Anbringen einer Zusatzhardware

an ein Modul, welches dieses zum Mastermodul macht, ist es möglich, einfache Funktionen autonom ablaufen zu lassen (vgl. [Sensacell, 2010b](#), Seite 3) . Ein Beispiel einer solchen Funktion ist auf Grafik 1.2 zu sehen.

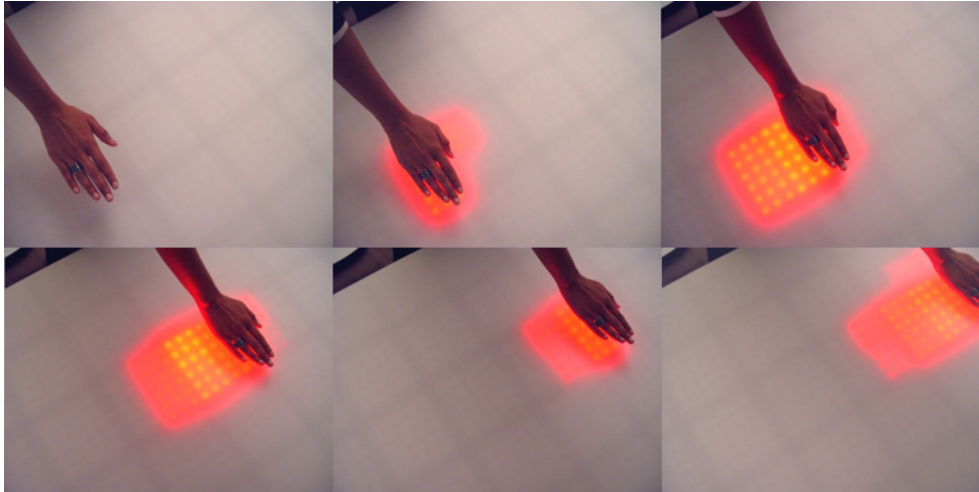


Abbildung 1.2: Sensacell (vgl. [Sensacell, 2010a](#))

1.3 Anforderungen

Zum Bau eines solchen Sensor- Aktormoduls ist es erforderlich, diese Anforderungen an dieses genau festzulegen. Diese bilden die Grundlage der Analyse, in welcher die Auswahl der notwendigen Bauteile getroffen wird. Hierzu werden im kommenden Abschnitt die Modulelemente unterteilt und die einzelnen Kenndaten festgelegt.

Anforderungen an die Segmentbeleuchtung

Jede Modulplatine soll mit 16 Lichtquellen ausgestattet werden, welche gleichmäßig über das Modul verteilt werden. Dabei ist eine flächendeckende Ausleuchtung der Moduloberfläche sicherzustellen. Funktional muss diese Beleuchtung eine ausreichende Helligkeit besitzen, um auch bei Tag deutlich erkennbar zu sein, wenn auch nicht bei direktem Einfall von Sonnenlicht. Die Leuchtquellen sollten mit einer ausreichend hohen Frequenz anzusprechen sein, um einen flackerfreien Farbwechsel zu ermöglichen.

Anforderungen an die Berührungserkennung

Es ist eine Technik zu implementieren, welche die Eingaben eines Benutzers erfasst. Mit Eingaben ist in diesem Fall das Annähern bzw. Berühren der Segmentoberfläche mit einer Hand gemeint. Eine mechanische Lösung durch Schalter oder Drucksensoren ist aus haptischen und optischen Gründen nicht vorgesehen. Das Erkennungsverfahren muss unabhängig von der Umgebungshelligkeit und anderen in Privaträumen denkbaren Störquellen arbeiten. Hierzu zählen Lichter, Mikrowellen oder handelsübliche Funkverbindungen wie WLAN-Zugangspunkte. Auch soll eine Positionsbestimmung dieser Eingaben möglich sein. Ein Raster in der Größe einer Hand, also in etwa von zehn mal zehn Zentimetern, gilt hier als Orientierungspunkt. Die Sensorik sollte so ausgelegt sein, dass eine sichere Erkennung mit einem Abstand von fünf Zentimetern und durch die Moduloberfläche hindurch sichergestellt ist.

Anforderungen an die Objektidentifizierung

Auch die Objektidentifizierung muss diese Distanz zur Erkennung überwinden können, da die Elektronik zur Objektidentifizierung ebenfalls unter der Segmentoberfläche angebracht werden soll. Die Erkennung ist so auszulegen, dass die Objekte eindeutig identifiziert werden können. Die zu erkennenden Objekte dürfen hierbei maschinenlesbar markiert werden, optische Veränderungen sind jedoch zu vermeiden. Zur Identifikation soll auch eine Positionsbestimmung des Objekts möglich sein. Es gilt dasselbe Rastermaß wie bei der Berührungserkennung. Auch die Erkennungsgeschwindigkeit erfolgt analog zur Berührungserkennung.

Beschaffenheit der Segmentoberfläche

Die Beschaffenheit der Segmentoberfläche muss sicherstellen, dass diese sowohl lichtdurchlässig, als auch undurchsichtig ist. Bei der Transparenz ist also ein Kompromiss zu finden, der möglichst viel Licht der Modulplatine durchlässt, aber die Modulplatine dabei nicht sichtbar wird. Auch eine Lichtstreuung der rückwärtigen Beleuchtung wäre vorteilhaft, da so auf Diffusoren vor den Lichtquellen verzichtet werden kann. Um Interferenzen mit der Sensorik zu vermeiden, muss die Auswahl der Segmentoberfläche in Abstimmung mit dieser erfolgen. Die Ausarbeitung beschränkt sich auf den Bau der Module, so dass diese Anforderung festgelegt wird, jedoch die Umsetzung dieser Oberfläche in der Realisierung nicht erfolgt.

Kaskadierbarkeit der Module

An die Kaskadierbarkeit der Module wird die Anforderung gestellt, eine Fläche von einem Quadratmeter mit Modulen auszustatten. Die erforderliche Anzahl an Modulen hängt so von der Modulgröße und deren Bauart an. Diese wird im folgenden Kapitel den weiteren Anforderungen angepasst und bestimmt.

Weitere einzuhaltende Konventionen

Der Aufbau der Modulkaskade muss möglichst einfach zu bewältigen sein. Eine große Anzahl an Verbindungskabeln oder Versorgungsleitungen ist zu vermeiden. Die Betriebsspannung ist über eine 12V Stromquelle bereitzustellen.

Aus ökonomischer Sicht ist eine kostengünstige Bauweise von Vorteil.

2 Analyse

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Analyse der Hard- und Software, die zum Aufbau der Module erforderlich ist. Es werden technische Möglichkeiten gegenübergestellt und auf Nutzbarkeit überprüft. Dies erfolgt auf theoretischer Seite durch die Überprüfung der Komponentenspezifikationen unter Berücksichtigung der festgelegten funktionalen Anforderungen. Um die robuste Einsatzfähigkeit unter realen Bedingungen zu prüfen, werden in Frage kommende Lösungen durch Prototypen verifiziert.

Des Weiteren werden nicht funktionale Anforderungen an die Komponenten spezifiziert, welche vor der Auswahl dieser nicht zu bestimmen waren.

Die Analyse setzt so die in der Realisierung zu verwendenden Baugruppen und deren Schnittstellen fest.

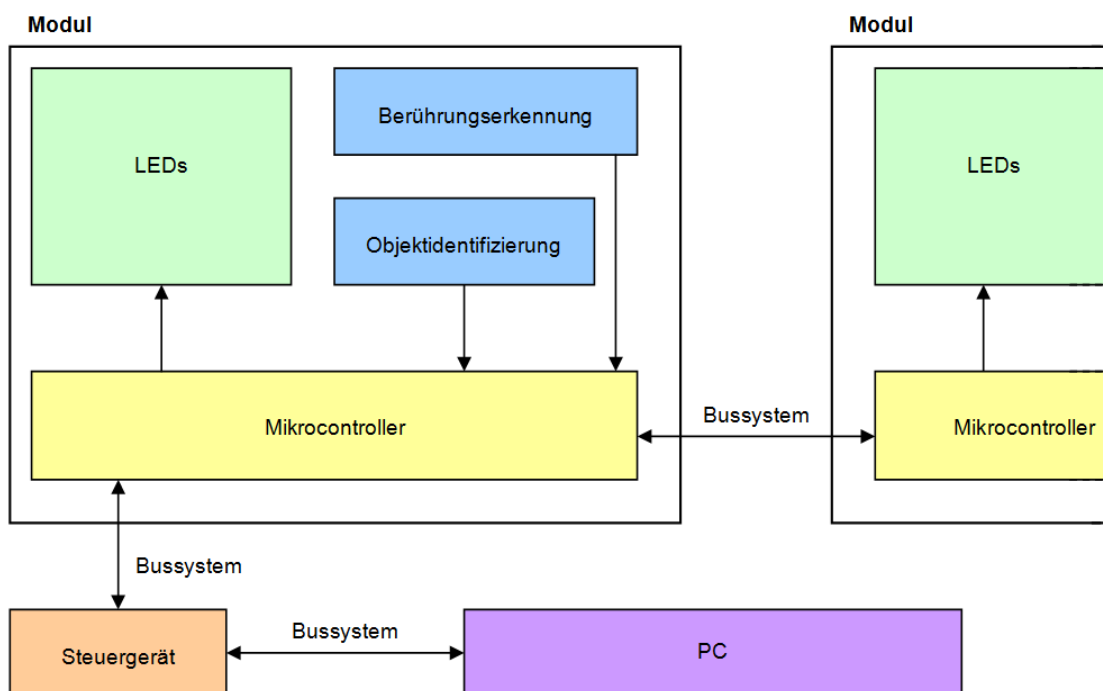


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau der Modulkomponenten

2.1 Sensorik zur Berührungserkennung

Dieser Abschnitt befasst sich mit den technischen Möglichkeiten die Eingaben eines Benutzers zu erfassen und auszuwerten. Mit Eingaben ist in diesem Fall das Annähern bzw. Berühren der Segmentoberfläche mit einer Hand gemeint. Wie in den Anforderungen festgelegt, muss sich die Erkennung auf optische oder elektromagnetische Erkennungsverfahren für diese Eingaben stützen.

2.1.1 Optische Objekterkennung

Eine Möglichkeit der Erfassung einer Hand oder eines Gegenstandes auf einer teiltransparenten und rückwärtig beleuchteten Oberfläche ist die Messung der Helligkeit unter der Oberfläche. Dieses Prinzip macht sich den Helligkeitsunterschied zwischen einem offen liegenden Segment und einem durch einen Gegenstand abgedeckten zu Nutze. Im abgedeckten Fall reflektiert das zu erkennende Objekt das sonst in den Raum geworfene Licht zurück in das Segment – die Helligkeit im Segment steigt. Dieser Zugewinn an Helligkeit lässt sich durch eine einfache elektrische Schaltung messen. Schematisch ist dieser Aufbau in Grafik [2.2](#) dargestellt.

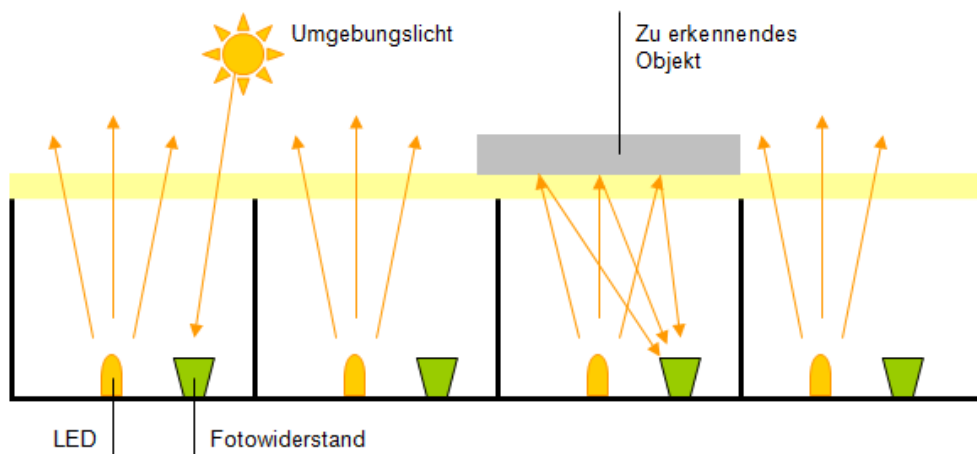


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau der Fotosensoren

Eine erfolgreiche Erkennung nach diesem Prinzip ist von vielen Faktoren abhängig. So ist eine helle Umgebungsbeleuchtung der Segmente von großem Nachteil, denn die Differenz des einfallenden Umgebungslichtes, welches durch den aufliegenden Gegenstand abgeschattet

wird, zu dem Helligkeitszugewinn durch das wieder zurück reflektierte Licht muss ausreichend signifikant sein um eine sichere Messung zu gewährleisten. Dies schränkt auch die Farben der zu erkennenden Gegenstände auf helle Töne ein, denn dunkle Objekte absorbieren einen zu großen Anteil des Lichtes anstatt dieses zu reflektieren. Auch in sehr hellen Umgebungen besteht die Gefahr, dass durch den hohen Lichteinfall in das Segment die Helligkeit durch das Abdecken dieses Segments nicht steigt sondern sinkt. Dies macht den Einsatz der Sensorik in hellen Umgebungen unmöglich. Zudem ist eine dauerhaft aktivierte und gleichbleibend helle Segmentbeleuchtung erforderlich, denn nur durch das ausfallende Licht ist die Ermittlung einer Reflektion möglich. Sollte das Segment in unterschiedlichen Helligkeiten oder Farben beleuchtet werden, muss in einem Kalibrierungsdurchgang die Helligkeit in jedem Segment bei jeder Helligkeit und Farbe gemessen werden. Ohne dies kann keine Erkenntnis aus den Helligkeitsveränderungen gewonnen werden, da ein Referenzwert fehlt. Auch weitere nicht beeinflussbare Lichtquellen könnten das Messergebnis negativ beeinflussen.

Der Aufbau einer solchen Sensorelektronik ist kostengünstig und einfach zu realisieren. Hier handelt es sich um einen Fotowiderstand in einem Spannungsteiler. Bei Anstieg des auf den Fotowiderstand einfallenden Lichtes verringert sich der Widerstand des Fotowiderstandes. Bei Beschattung erhöht sich dieser wieder um ein Vielfaches. Die resultierende Spannung zwischen dem Referenzwiderstand - der in etwa den Widerstandswert des Fotowiderstandes bei Helligkeit besitzen sollte - und dem Fotowiderstand selbst, lässt sich durch einen A/D-Wandler eines Mikrochips auslesen und weiterverarbeiten. Um eine sichere Messung zu gewährleisten, muss die Sensorelektronik eine Referenzspannung ermitteln. Dies ist jene Spannung, welche über dem Sensor abfällt, wenn dieser nicht durch Berühren aktiviert wird. Ein Anstieg der Sensorspannung über den Referenzspannungswert lässt sich dann als erkanntes Objekt interpretieren.

Prototyp

Um zu ermitteln ob diese Technik trotz der erkennbaren Nachteile nutzbar ist, wurde ein Prototyp mit acht unabhängigen Feldern konstruiert.

In jedem Segment wurde jeweils eine RGB-LED (Dreifarb-Leuchtdiode mit den Farben rot, grün und blau) und parallel zu dieser ein wie oben beschriebener Sensor installiert. Ein 1/8 Analogmultiplexer ermöglichte es die Werte aller acht Lichtsensoren mit einem A/D-Wandler (Analog-Digital-Konverter) einzulesen. In der Grafik [2.3](#) ist der Aufbau dieser Schaltung zu sehen.

Der erste Test des Sensors erfolgte unter optimalen Bedingungen. So wurde die Raumbeleuchtung auf ein Minimum abgedunkelt und als zu erkennendes Objekt ein weißes Blatt Papier gewählt.

Zur Kalibrierung der Sensoren wurde die Sensorspannung am Spannungsteiler des Fotowiderstandes über einen Zeitraum von 100ms 20 mal ausgewertet und zu einer Referenzspannung gemittelt. Dies hat den Effekt eines Tiefpasses und hilft einzelne Messfehler zu kompensieren.

Messergebnis

Unter den oben beschriebenen optimalen Testbedingungen ließen sich hervorragende Ergebnisse erzielen. Die Erkennung erfolgte ohne sichtbare Zeitdifferenzen und ließ sich einfach durch einen Mikrocontroller auswerten. Sobald jedoch die Testbedingungen minimal verschärft wurden, waren wie zu erwarten präzise Messungen nicht mehr möglich. Besonders helle Umgebungen oder einfallendes Licht auf die Oberfläche erzeugten falsch positive Ergebnisse der Sensorik. Dies ließ sich auch durch Filtersoftware nicht unterdrücken. Ein Einsatz dieser Technik ist nur unter Optimalbedingungen möglich und daher nicht für den robusten Einsatz zu gebrauchen.

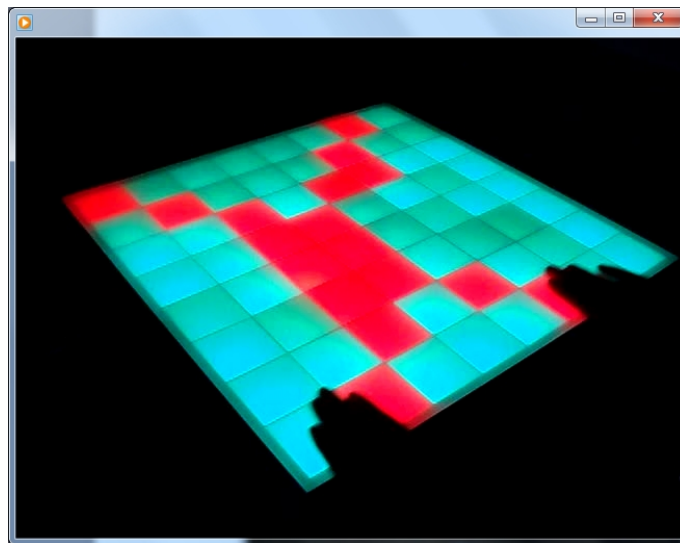


Abbildung 2.4: Testaufbau mit 8 berührungsempfindlichen und 64 beleuchteten Feldern

Erweiterung um Infrarot-Leuchtmittel und Infrarot-Lichtsensoren

Eine Abwandlung dieser Sensorik besteht in der Nutzung von Infrarotdioden als Lichtquelle und IR-Fototransistoren, welche durch Filter ausschließlich auf infrarotes Licht reagieren. Diese Kombination hat den Vorteil, nicht abhängig von der Segmentbeleuchtung zu sein da eine eigene IR-Lichtquelle genutzt wird. Auch sind keine Interferenzen mit der LED-Segmentbeleuchtung zu erwarten, da eine konventionelle LED im Gegensatz zu Leuchtmitteln mit Glühfäden keinen Infrarotanteil im Licht besitzen. Doch sind weiterhin Störungen der Sensorik durch Sonnenlicht und Kunstlicht auf Basis von Glühfadenlampe möglich. So ist diese Technik nur unwesentlich robuster, aber durch die zusätzlichen Elektronikelemente kostenintensiver.

Externe Kamera

Ein weiterer optischer Ansatz zur Positionsermittlung von Objekten ist der Einsatz einer externen Videokamera. Die Nachteile dieser Lösung überwiegen jedoch. Zur Anschaffung der Kamera ist auch weitere Hardware erforderlich um eine Objekterkennung in Echtzeit zu ermöglichen. Auch ist es eine komplexe Aufgabe die gewollten Beleuchtungseffekte optisch von sich bewegenden Objekten zu differenzieren und eindeutig zu erkennen. All dies und die „unschön“ extern angebrachte Technik lassen diese Option ebenfalls ausscheiden.

2.1.2 Kapazitive Objekterkennung

Neben den optischen Lösungen zur Objekt- und Personenerkennung existiert auch die Möglichkeit der kapazitiven Erkennung. Das Prinzip beruht auf der Veränderung des elektrischen Feldes einer Sensorelektrode durch Annäherung an diese. Dies macht diese Sensortechnik besonders interessant, weil die Sensorelektroden unsichtbar unter der Segmentoberfläche angebracht werden können, da das elektrische Feld diese Oberfläche, insofern sie den festgelegten Anforderungen dieser Arbeit entspricht, durchdringen kann. Zudem ist sie unabhängig von der Umgebungs- oder Segmentbeleuchtung und der Farbe der zu erkennenden Objekte.

RC-Glied

Die wohl einfachste Möglichkeit die Kapazitätsveränderung einer Sensorelektrode zu ermitteln ist das Ausnutzen der Zeitkonstante eines RC-Gliedes. Ein RC-Glied ist eine Elektrische Kombination eines in Widerstandes mit einem Kondensator. Für diese Schaltung wird der R-Teil der RC-Konstante auf ein Maximum angehoben, so dass sich schon kleine Änderungen im C-Teil signifikant auf die Ladezeit auswirken. Es sollte zur zu messenden Kapazität ein stabilisierender Kondensator im Picofaradbereich installiert werden, um stabile Messergebnisse zu erreichen.

Zeitkonstante $t = R * C$

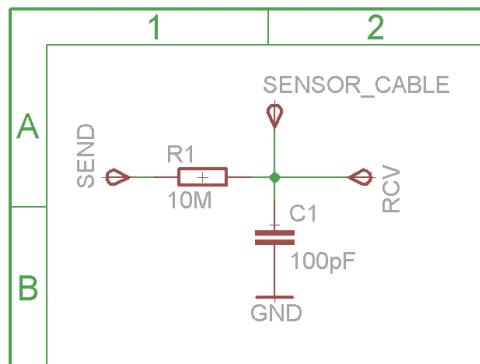


Abbildung 2.5: Schaltplan eines RC-Sensors

Bei dieser Sensortechnik entlädt ein Mikrochip zunächst den Aufbau, indem er den SEND und RCV Pin auf Masse zieht (siehe [Abbildung 2.5](#)). Nachdem so der Sensorleitung jegliche Ladung entzogen wurde, wird am SEND Pin eine Spannung angelegt. Diese wird über

den Widerstand auf den RCV Pin übertragen. Die Zeit die diese Übertragung in Anspruch nimmt, lässt sich durch die Zeitkonstante $t = R \cdot C$ ermitteln. Da der Widerstand fix ist, hängt die Übertragungsdauer ausschließlich von der Kapazität der Sensorleitung ab. Durch den Widerstand im Megaohmbereich sind schon kleine Änderungen der Kapazität leicht im Zeitverhalten abzulesen. Arduino.cc (vgl. [Badger, 2010](#)) stellt hierzu eine Softwarebibliothek namens "CapSense" bereit, welche diese Messungen vereinfacht.

Bei Nutzung eines $10\text{M}\Omega$ Widerstandes und einer Kapazität von 100pF ergibt sich eine Ladezeit von 1ms . Eine Verdreifachung der Kapazität durch Berühren der Sensorleitung würde auch die Ladezeit auf 3ms verdreifachen.

$$t = 1 * 10^7 \Omega * 1 * 1^{-10} F = 1 \text{ms Ladezeit}$$

$$t = 1 * 10^7 \Omega * 3 * 1^{-10} F = 3 \text{ms Ladezeit}$$

Die Problematik an dieser Schaltung ist, dass sich die Dauer der Übertragung mit Annäherung einer Hand an den Sensor leider nicht verkürzt, sondern sich durch die so vergrößerte Kapazität der Sensorfläche verlängert. Hier ist die richtige Dimensionierung des Fixwiderstandes entscheidend. Ein kleiner Widerstandswert verringert die Empfindlichkeit, da eine größere Kapazität eingebracht werden muss, um einen signifikanten Zeitunterschied zu erreichen. Aber auch die Zeit einer Messung reduziert sich deutlich, was für eine schnelle Objekterkennung unerlässlich ist. Eine Vergrößerung des Widerstandes vergrößert auch die Sensorempfindlichkeit, hat aber bei großen Kapazitäten zur Folge, dass die Messzeit mehrere hundert Millisekunden in Anspruch nehmen kann. Sollte ein einzelner Mikrochip so mehrere Sensoren abfragen wollen, kann sich die Messzeit schnell zu einer Sekunde aufkumulieren, was eine schnelle Objekterkennung zunichte machen würde.

Prototyp

Mit einem Prototyp wird nachgewiesen, ob eine sichere Erkennung einer Berührung in angemessener Zeit zu erreichen ist.

Die Messung erfolgte mit einem Atmel ATmega 328. Als Fixwiderstand kam ein $10\text{M}\Omega$ Kohleschichtwiderstand zur Verwendung, an dem eine Sensorelektrode aus $10 \times 10\text{cm}$ Aluminiumfolie angeschlossen wurde. Zudem wurde, wie im Schaltplan [2.5](#) zu erkennen, ein Kondensator auf Masse gelegt, um die Messergebnisse zu stabilisieren.

Messergebnis

Der Testaufbau zeigte, dass sich diese Methode durchaus zum Erkennen von Berührungen eignet. Gerade auch die gute "CapSense" Bibliothek macht die Nutzung auf Seiten der Software sehr einfach. Leider erwies sich die Genauigkeit als zu unpräzise, als dass diese einem Dauereinsatz standhalten würde. Gerade die nicht vorhersehbare Rechenzeit zum Auslesen des Sensors würde diese Technik zu einer unberechenbaren Komponente im System machen.

Schwingkreis

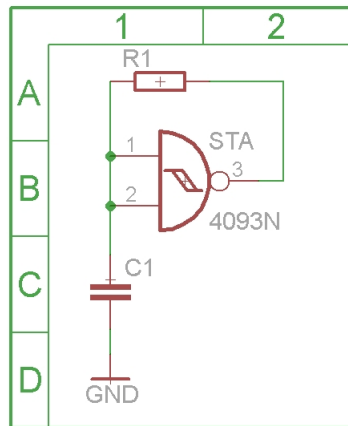


Abbildung 2.6: Schaltplan
eines
Kippschwingers

Ein durch einen rückgekoppelten, invertierenden Schmitt-Trigger erzeugter Oszillator bildet die Basis einiger kapazitiver Sensorsysteme. Ein Schmitt-Trigger ist ein elektrisches Bauteil, welches bei Überschreiten einer definierten Eingangsspannung seinen Ausgang steilflankig auf einen HIGH-Pegel legt und bei Unterschreiten der unteren Schaltschwelle ebenfalls steilflankig wieder auf 0V zurücksetzt (vgl. Naundorf, 2004, Seite 81). Bei einem invertierenden Schmitt-Trigger werden lediglich die Ausgangspegel invers zum Eingangspegel geschaltet. Dieser auch Kippschwinger genannte Aufbau (vgl. Sextro, 2008, Seite 74) lädt über einen rückkoppelnden Widerstand (Grafik 2.6 A/1) einen vorgeschalteten Kondensator (Grafik 2.6 C/1). Sobald die Ladung dieses Kondensators die obere Schaltschwelle des Schmitt-Triggers (Grafik 2.6 B/1-2), welche etwa bei 3V liegt, erreicht hat, invertiert der Schmitt-Trigger sein Ausgangssignal auf 0V. Dies entlädt den Kondensator, bis dessen die Ladung wiederum die untere Schaltschwelle unterschreitet und so den Schmitt-Trigger zurück auf das High-Level – 5V – invertiert. Dieser Vorgang wiederholt sich je nach Dimensionierung der RC-Elemente im Kiloherzbereich.

Um hieraus Rückschlüsse auf Annäherung an eine Sensorelektrode zu ziehen existieren unter anderen folgende zwei Methoden.

Oszillator in Kombination mit einem D-Flip-Flop

Die Kombination des Oszillators mit einem D-Flip-Flop (vgl. Teuteberg, 2010) ist eine einfache, hardwarebasierte Lösung zur Erkennung von Berührungen.

Ein NAND Schmitt-Trigger am Ausgang des Oszillators (Grafik 2.7 A/3) invertiert das durch den Oszillator erzeugte Taktsignal und leitet dies zum Clock-Eingang eines D-Flip-Flops

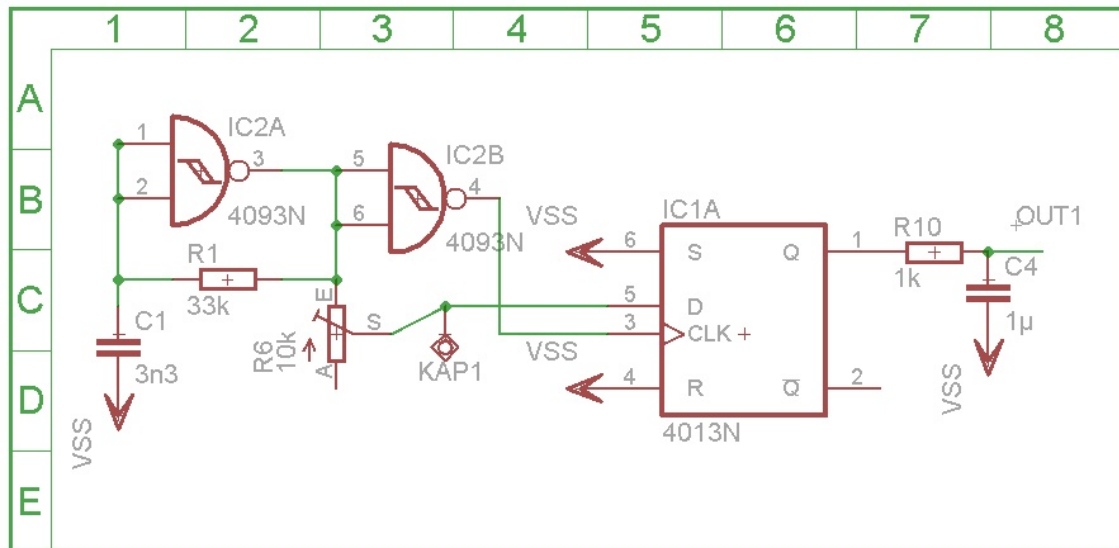


Abbildung 2.7: Schaltplan des kapazitiven Sensors (vgl. Teuteberg, 2010)

(Grafik 2.7 B/3). Durch diese Invertierung entsteht eine geringe Zeitverzögerung, welche für die Messung erforderlich ist. Diese Verzögerung ist dem Oszillogramm (siehe 2.8) zu entnehmen.

Ebenfalls befindet sich am Ausgang des Oszillators eine Sensorleitung in Reihenschaltung mit einem Potentiometer (Grafik 2.7 B-C/2), welche wiederum mit dem Data-Eingang des Flip-Flops verbunden ist. Durch die oben beschriebene Zeitverzögerung zwischen dem Oszillator und dem Clock-Eingang des Flip-Flops erreichen die direkt vom Oszillator ausgehenden Data Signale nicht zeitgleich das Flip-Flop und können so nicht erfasst und gesichert werden. Durch Einbringen einer Kapazität an die Sensorleitung wird das Data Signal soweit verzögert, dass es zusammen mit dem Clock Signal am Flip-Flop eintrifft und dieser den Wert sichern kann. Diese Kapazität wird durch die Annäherung an die Sensorelektrode (Grafik 2.7 C/3) erzeugt.

Das Oszillogramm 2.9 zeigt die Oszillator- (türkis) und Datenleitung (blau) bei nicht berührter Sensorfläche. Auf der Grafik 2.10 ist eine deutliche Abflachung des auch vom Oszillator ausgehenden Data Signals, bedingt durch die Berührung der Sensorfläche zusätzlich eingebrachte Kapazität, zum Oszillator zu erkennen.

Eine Messung der Flip-Flop Ein- und Ausgangssignale zeigt hier die Funktionsweise. Während im linken Schaubild 2.11 zu erkennen ist, dass das hier blau gezeichnete Datensignal die Clock-Flanke (lila) nicht zum HIGH-Pegel erreicht, zeigt das rechte Bild 2.12 das gerade rechtzeitige Erreichen der Clock-Flanke durch das Berühren der Sensorfläche. Das grün gezeichnete, positive Flip-Flop Ausgangssignal bestätigt dies.

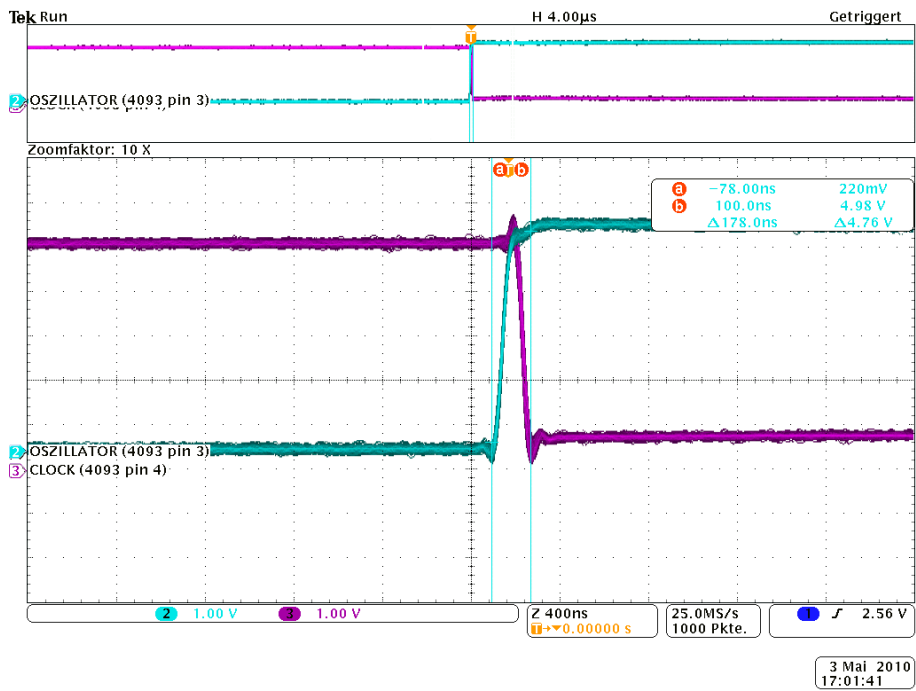


Abbildung 2.8: Zum Clock-Signal intervientes Oszillatrorsignal

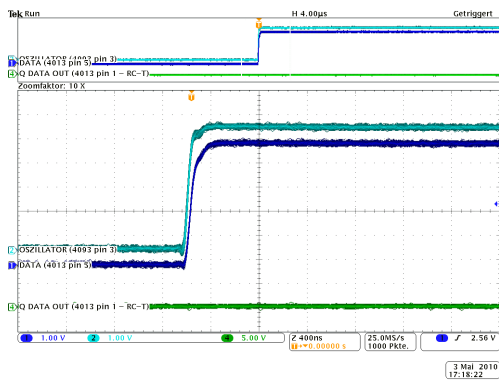


Abbildung 2.9: Oszillator und Sensorleitung - Nicht berührte Sensorfläche

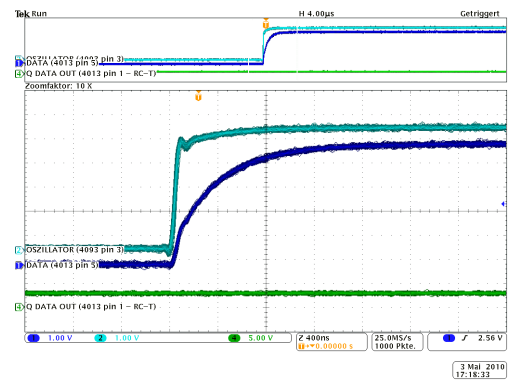


Abbildung 2.10: Oszillator und Sensorleitung - Berührte Sensorfläche

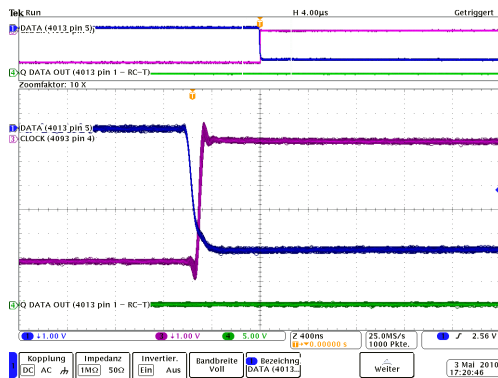


Abbildung 2.11: Data und Clock Signal - Nicht berührte Sensorfläche

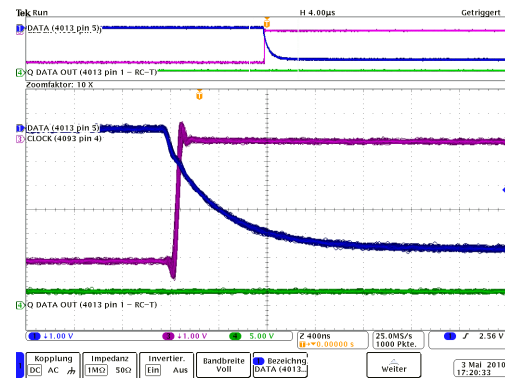


Abbildung 2.12: Data und Clock Signal - Berührte Sensorfläche

Eine Kalibrierung der Sensorempfindlichkeit erfolgt über den durch das Potentiometer einstellbaren Widerstandswert, welcher zum variablen kapazitiven Anteil die Zeitkonstante der Sensorleitung beeinflusst.

Mit dieser Schaltung lässt sich so eine Annäherung an die Sensorleitung angeschlossene Sensorfläche einfach am Ausgang des Flip-Flops ablesen. Durch ein am Flip-Flop Ausgang angebrachtes RC-Glied 2.7(B6), welches als Tiefpass 1. Ordnung fungiert, werden sowohl einzelne Messfehler herausgefiltert, als auch das Ausgangssignal des Flip-Flops zu einer glatten Spannung integriert. Hier muss die RC-Kombination so gewählt werden, dass Messfehler sicher unterdrückt, aber auch schnelle Bewegungen noch sicher erkannt werden. Eine Erkennungszeit von einer Zehntelsekunde sollte hier einen angemessenen Kompromiss darstellen. Die Grenzfrequenz des Tiefpasses sollte dementsprechend im Bereich von 10 Hz liegen.

Grenzfrequenz RC-Tiefpass 1. Ordnung:

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * R * C}$$

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * 10k\Omega * 1\mu F} = 15,7 Hz$$

Um mit konventionellen Widerstands- und Kondensatorgrößen arbeiten zu können, fällt hier die Wahl auf einen 1µF Kondensator in Kombination mit einem 10k Ohm Widerstand. Dieser so zu einer gleichmäßigen Spannung aufintegrierte Wert kann über einen A/D-Wandler des Mikrochips eingelesen werden.

Der Vorteil dieser Lösung liegt klar darin, dass nur wenige, günstige Komponenten die gesamte Erkennung übernehmen. Eine Berührung kann inklusive Filterung durch den Tiefpass

in rund 60ms erfasst werden, da die Oszillatorfrequenz im Bereich von 16 kHz liegt und mit jedem Zyklus eine neue Messung erfolgt. Auch die hardwareseitige Kalibrierung der Sensorempfindlichkeit vereinfacht die Installation und Wartung der Sensoren. Gerade zur Weiterverarbeitung der Messdaten mit einem Mikrochip ist diese Methode besonders gut geeignet, da keine Rechenzeit für die Erkennung benötigt wird, sondern nur ein digitales Signal vom Flop-Flop-Ausgang eingelesen werden muss.

Prototyp

Ein Prototyp soll auch hier ermitteln, ob sich diese Sensortechnologie zum robusten Erfassen von Berührungen eignet oder dafür ungeeignet ist.

Zu dem Aufbau der Berührungserkennung wurden vier LED-Kontrollleuchten zur Berührungsanzeige und vier RC-Tiefpässe auf der Platine untergebracht. Die Messung der Ergebnisse erfolgte mit dem prototyping-Board "Arduino Duemillinove". Eine 10x10cm Aluminiumfolie diente als Sensorelektrode - diese Größe entspricht in etwa der Fläche der auch im Modul verwendeten Sensorelektrode.

Messergebnis

Der Prototyp dieser Schaltung mit vier Elementen bestätigte die positiven Erwartungen an diese Messtechnik. Eine präzise Kalibrierung war durch die Potentiometer hardwareseitig möglich und erzeugte eine sichere Erkennung einer Hand schon aus einem Abstand von circa 5cm. Ein Einsatz dieser Sensortechnik ist in Betracht zu ziehen.

Es zeigte sich lediglich, dass es nicht möglich war, die Signale an digitalen Eingängen zu erfassen. Eine Messung ergab, dass die Ausgangsspannung des aktivierten Sensors lediglich bei 2,3V liegt und so nicht dem HIGH-Level eines Mikrocontrollers von etwa 3V entspricht. Bei Auswertung der Sensorsignale mit Hilfe von A/D-Wandlern ist dieses Problem aber einfach zu umgehen. So lässt sich das Signal softwareseitig digitalisieren und ein HIGH-Level ab 2,3V interpretieren.

Frequenzänderung des Oszillators

Eine weitere Möglichkeit der kapazitiven Erkennung über einen solchen Oszillator ist der Aufbau eines Schwingkreises, in welchem die Frequenz dieses Kreises durch die Kapazität einer Sensorelektrode manipuliert wird. Vereinfacht ist dieser Aufbau in der Darstellung [2.13](#) zu erkennen.

Bei Annäherung an die am Sensorpad [2.13](#) (C2) angeschlossene Sensorfläche vergrößert sich die Kapazität der Rückkopplung des Kippschwingers. Dies wiederum hat zur Folge, dass sich so die Frequenz verringert, mit der dieser Kreis schwingt. Diese Frequenzänderung ist mit einem Mikrochip ebenfalls einfach zu erfassen, erfordert aber zusätzlichen, wenn auch

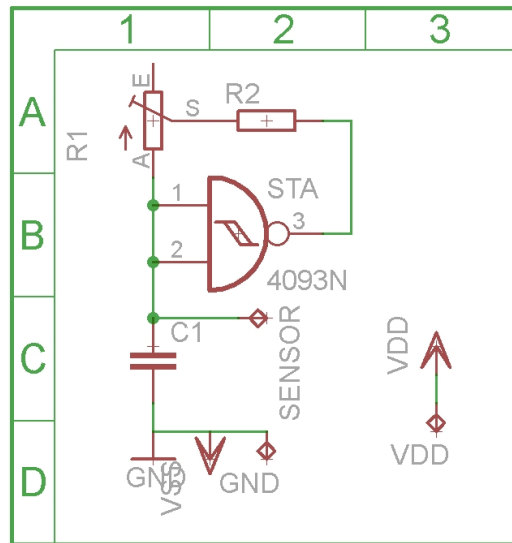


Abbildung 2.13: Schaltplan zur Berührungserkennung über Frequenzänderung

nur geringen Rechenaufwand. Hierzu wird die Zeit einer einzelnen Flanke gemessen und zur Schwingfrequenz umgerechnet.

$$f = \frac{1}{2 \cdot t}$$

Bei einem rückkoppelnden Widerstand von 33kOhm und einem zu ladenden Kondensator von 3,3nF Kapazität ergab sich eine Frequenz von 16,0kHz. Diese verringert sich durch Berühren der Sensorelektrode auf 15,5kHz. Eine Annäherung an die Sensorfläche bringt leider keine signifikante Frequenzänderung.

Die Frequenzänderung, zu sehen auf Grafik 2.14 und 2.15, ist selbst bei kleinster zeitlicher Auflösung und maximalem Zoomfaktor des Oszilloskops nur schwer zu erkennen.

Bei Vergrößerung des rückkoppelnden Widerstands auf 200k Ohm und einem zu ladenden Kondensator von 3,3nF Kapazität ergibt sich eine Frequenz von 2,69kHz. Diese verringert sich durch Berühren der Sensorelektrode auf 2,60kHz. Die grundlegende Verringerung der Frequenz ist durch den sechsfach größeren Widerstand bedingt, der aber auch die Auswirkung auf Änderung der Sensorkapazität steigert. Auch hier ist nur eine messbare Änderung der Frequenz durch direktes Berühren der Sensorelektrode zu erreichen. Eine Annäherung an die Sensorfläche kann nicht ausreichend präzise erfasst werden. Auch durch weitere Kondensator- Widerstandskombinationen lässt sich das Verhalten nicht ausreichend optimieren.

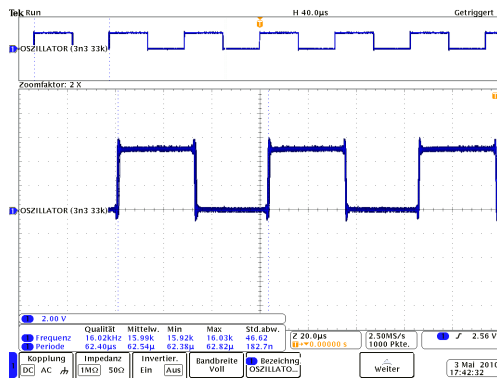


Abbildung 2.14: Frequenz nicht berührter Sensorfläche

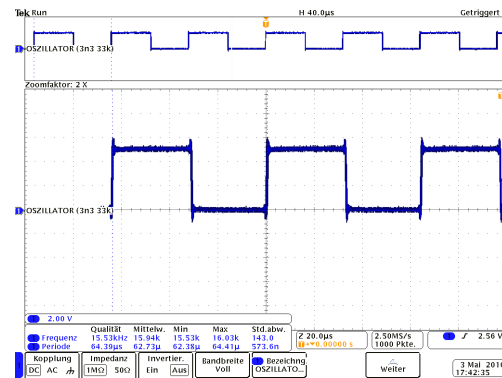


Abbildung 2.15: Frequenz berührter Sensorfläche

Aufgrund der Tatsache, dass eine sicher zu messende Frequenzänderung nur durch direktes Berühren der Sensorelektrode zu erreichen ist, ist eine verdeckte Installation dieses Sensors nicht möglich. Dies schließt dieses Messverfahren zur berührungslosen Erkennung aus.

Kommerzielle kapazitive Sensoren

Zu diesen selbst erstellten Lösungen der kapazitiven Erkennung gesellen sich auch einige kommerzielle Produkte, welche im kommenden Abschnitt vorgestellt werden.

Besonders sticht hier der Quantum QT100A Chip von Atmel heraus (vgl. [Atmel, 2010a](#)). Hierbei handelt es sich um einen selbstkalibrierenden kapazitiven Sensor mit einem Sensorkanal. Dieser ist in der SMD-Bauweise verfügbar und verspricht präzise Messungen ohne eine aufwändige externe Beschaltung erforderlich zu machen (vgl. Grafik [2.16](#)).

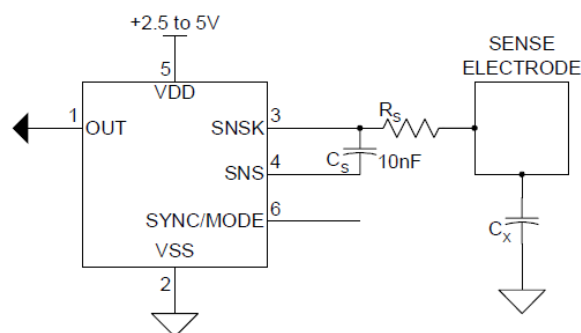


Abbildung 2.16: Atmel QT 100 A (vgl. [Atmel, 2010b](#), Seite 2)

Dieser Sensorchip traf nicht rechtzeitig ein um getestet werden zu können.

2.2 Objektidentifizierung

Für die Objektidentifizierung soll das RFID-Verfahren eingesetzt werden. RFID steht für "Radio frequency identification" und ermöglicht es, mit einem RFID-Lesegerät, berührungslos und durch viele Oberflächen hindurch eine in einem Transponderchip gespeicherte ID auszulesen (vgl. [Schoblick, 2005](#), Seite 14) . Diese IDs sind weltweit eindeutig und machen es möglich, jedes damit ausgestattete Objekt eindeutig zu identifizieren.

2.2.1 RFID-Technik

Ein RFID-Transponderchip oder auch "Tag" genannt besteht grundlegend aus drei Teilen, der Antenne, dem Mikrochip und dem Träger dieser beiden Bauteile. Diese Komponenten können in unterschiedlichen Bauformen miteinander kombiniert werden. So sind verschiedenartigste Transponder für jeden Einsatzzweck herstellbar, was eine Anbringung dieser an unterschiedlichsten Gegenständen möglich macht.

Die Besonderheit des passiven RFID-Transponders ist, dass die Versorgungsspannung aus den empfangenen Funkwellen gewonnen wird (vgl. [Schoblick, 2005](#), Seite 121) . So kommt dieser, wie ein Barcode auch, komplett ohne eine eigene Spannungsquelle aus. Dies steigert die Flexibilität in der Anbringung dieser Transponder deutlich und macht jegliche Wartungsarbeiten überflüssig. Leider schränkt dies aber auch die Reichweite, in der sich das Tag auslesen lässt, auf wenige Zentimeter (kleiner 25cm) ein, was für den Einsatz dieses Projektes mit einem erforderlichen Erkennungsabstand von fünf Zentimetern vollkommen ausreichend ist.

2.2.2 RFID-Lesegeräte

Zum Aufbau dieses Erkennungssystems kommen vor allem der ID-2- und der ID-12-Reader des Herstellers ID Innovations in Frage (vgl. [ID-Innovations, 2010](#)) . Diese weitgehend baugleichen Lesegeräte unterscheiden sich nur durch eine integriert Antenne im ID-12-Lesegerät. Am ID-2 Lesegerät muss diese extern angebracht werden.

Im Gegensatz zu den meisten RFID-Lesegeräten besitzen diese Reader zu einem TTL-Ausgang auch ein integriertes RS232-Interface. Dies macht das Auslesen der Transponder-ID mit einem Mikrocontroller über die UART-Schnittstelle möglich. Die UART-Schnittstelle ist die serielle Schnittstelle des Atmel Controllers. Auch der geringe Stromverbrauch von 13mA (ID-2) und 30mA (ID-12) ist von Vorteil.

2.2.3 Aufbaumöglichkeiten des RFID-Readers

Um vier Felder des Segments mit dieser Objekterkennung auszustatten bestehen zwei Möglichkeiten.

Zum einen können vier eigenständige Lesegeräte des Typs ID-12 auf dem Modul aufgebracht werden. Dies macht den Aufbau besonders einfach, da nur eine Datenleitung, die RS232 Leitung, zum Mikrokontroller multiplext werden muss (vgl. Grafik 2.17). Auch ist es nicht erforderlich externe Antennen anzubringen, da diese bereits in den ID-12 -Lesegeräten integriert sind. Das Neustarten der Module erfolgt über einen weiteren, parallel zum ersten geschalteten Multiplexer, welcher als Demultiplexer verwendet wird. Dieser aktiviert den gerade beschalteten RFID-Reader durch Anlegen einer Spannung an den Reset-Pin. Die Reset-Kontakte der nicht beschalteten Reader werden über einen Pull-Down-Widerstand auf Masse gezogen und bleiben so deaktiviert. Theoretisch könnte auch auf den RS232-Multiplexer verzichtet und die RS232-Leitungen über Sperrdioden direkt an an den Mikrokontroller angebunden werden. Hierzu muss sichergestellt werden, dass lediglich ein Lesegerät Daten sendet, da es sonst zu Kollisionen auf dem Bus kommt.

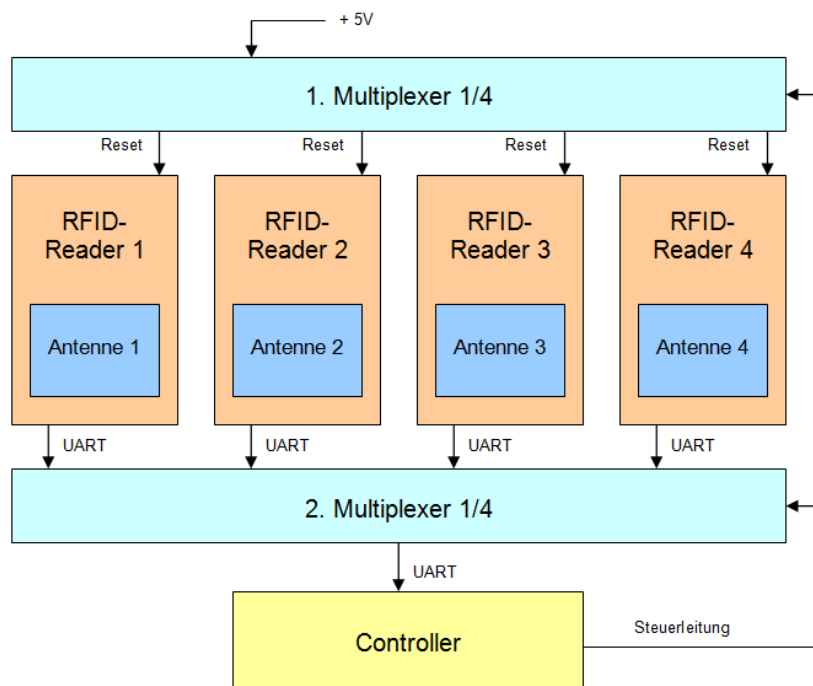


Abbildung 2.17: RFID-Aufbaumöglichkeit 1

Zum anderen ist es möglich einen einzigen eigenständigen Reader ohne eine integrierte Antenne auf das Modul aufzubringen und diesen mit vier externen Antennen zu versehen

(vgl. Grafik 2.18). Dies senkt die Kosten des Aufbaus um fast 75 Prozent, da nur ein einziges ID-2-Lesegerät verwendet wird. Jedoch macht es das Aufbringen von vier externen Antennen erforderlich. Da weder die Leistung eines RFID-Readers dieses Typs ausreicht um vier Antennen zeitgleich zu betreiben, noch die Möglichkeit besteht vier Transponder zeitgleich auszulesen, ist es notwendig die Antennen einzeln an das Lesegerät binden zu können. Dies macht hochwertige Analogmultiplexer mit einem sehr geringen Schaltwiderstand erforderlich, da das Lesegerät ansonsten kein magnetisches Feld um die Antenne zum Auslesen der Transponder-ID aufbauen kann. Auch ist dies für die Bestimmung der Position des Transponders erforderlich, denn nur durch gezieltes Schalten autonomer Antennen lässt sich bestimmen, welche Antenne den Transponder erkannt hat.

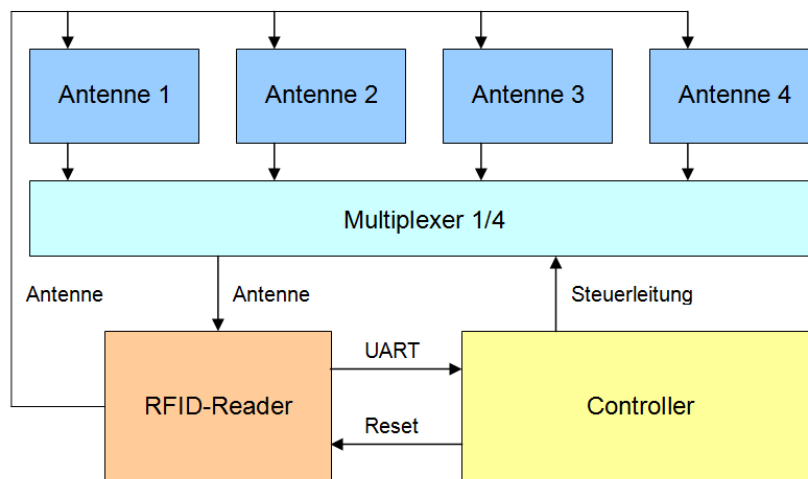


Abbildung 2.18: RFID-Aufbaumöglichkeit 2

Prototyp

Mit einem Prototyp soll sichergestellt werden, dass das theoretisch mögliche Multiplexen von RFID-Antennen sicher in die Praxis umzusetzen ist.

Hierzu kommen folgende Bauteile zur Verwendung:

- RFID-Lesegerät des Typs ID-2
- Luftspulen mit einer Induktivität von 1.08mH
- Ein doppelter 1/4 Analogmultiplexer des Typs 4051

Messergebnis

Mit dem 4051-Analogmultiplexer gelang es nicht eine Transponder-ID auszulesen. Dies ist durch den zu hohen Innenwiderstand von 100Ohm zu begründen.

Ein Wechsel des Analogmultiplexers auf den Typ MAX4618 des Herstellers Maxim IC sollte den gesuchten Erfolg bringen. Dieser hat mit 10Ohm einen deutlich geringeren Innenwiderstand, welcher nun dem Lesegerät das Aufbauen des erforderlichen Feldes erlauben sollte.

Dieser Chip traf nicht rechtzeitig ein, um getestet und verwendet werden zu können. Alle Vortests zeigten aber großes Potential, so dass dieser Lösungsweg in der Realisierung zur Verwendung kommen wird.

2.3 Segmentbeleuchtung der Module

Jedes Modul soll mit 16 RGB-LEDs ausgestattet werden um eine flächendeckende, rückwärtige Beleuchtung der Segmentoberfläche zu realisieren. Diese Beleuchtung macht es möglich sowohl in passiver Weise auf die Raumathmosphäre einzuwirken, als auch aktiv auf die Eingaben des Benutzers reagieren zu können.

2.3.1 LED-Technik

Aufgrund der Kennlinie der Leuchtdiode ist es nicht möglich, diese, wie bei konventionellen Leuchtmittel auf Basis von Glühfäden üblich, durch Herabsetzen der Betriebsspannung zu dimmen. Ein Absenken der Spannung würde zu einem rapiden Einbruch des Stroms führen und die LED rasch deaktivieren. In Grafik [2.19](#) wird dies veranschaulicht. Auch die Kennlinien unterschiedlicher LED-Farben sind hier noch einmal gegenüber gestellt.

Zum Dimmen von LEDs ist das Pulsweitenmodulationsverfahren - abgekürzt PWM - notwendig. Hierbei wird die LED weiterhin mit der vollen Spannung betrieben, jedoch wird diese in einer sehr schnellen Folge gepulst. Die Dauer der positiven Pulse bestimmt in linearer Abhängigkeit die Helligkeit der Leuchtdiode. In Grafik [2.20](#) wird diese Funktionsweise noch einmal verdeutlicht.

Durch die Kombination der drei Grundfarben und das PWM-Verfahren zur präzisen Dimmung der drei Leuchtdioden lassen sich so so gut wie alle Farbkombination erreichen.

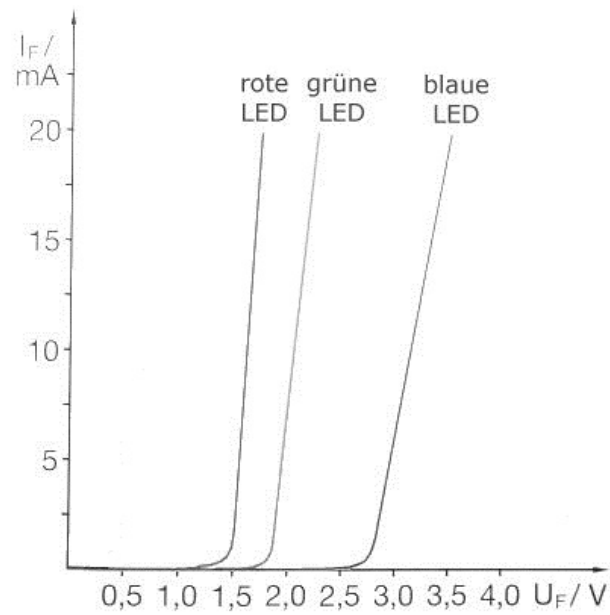


Abbildung 2.19: LED-Kennlinien (Grafik in Anlehnung an [Nullohm \(2010\)](#))

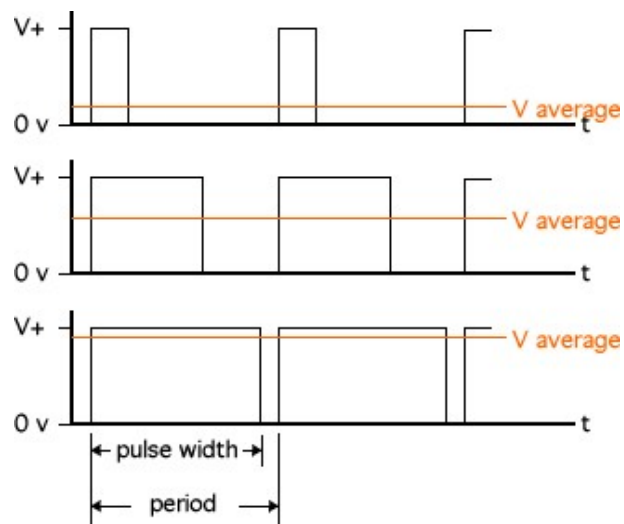


Abbildung 2.20: Pulsweitenmodulation (Grafik vgl. www.dtic.upf.edu (2010))

2.3.2 LED-Treiberbausteine

Um dieses Verfahren für jede Leuchtdiode bereitzustellen sind spezielle LED-Treiberbausteine notwendig. Hier stellt Texas Instruments einen sehr leistungsfähigen Chips namens TCL5940 (vgl. [TexasInstruments, 2010](#), Seite 1) zur Verfügung, welcher 16 Kanäle mit einer maximalen Spannung von 17V und einem Dauerstrom von 120mA pro Kanal beschalten kann. Eine in diesen Chip integrierte Konstantstromquelle, welche durch einen Referenzwiderstand gesteuert wird, ermöglicht den Betrieb der Leuchtdioden ohne Vorwiderstand. So lässt sich der Maximalstrom stufenlos von 20mA bis 120mA konfigurieren, was den Betrieb jeder konventionellen Leuchtdiode ermöglicht.

Dieser Chip unterstützt zur Pulsweitenmodulation in 4096 Stufen auch die analoge Dimmung jedes Kanals. Dies ist notwendig um baulich bedingte Helligkeitsunterschiede zwischen den Leuchtdioden auszugleichen. So kann der maximale Strom der Konstantstromquelle jedes Kanals zusätzlich per Software in 63 Schritten eingeschränkt werden (vgl. [TexasInstruments, 2010](#), Seite 15) um zu helle LEDs auf das Niveau der anderen abzusenken.

Angesteuert wird der TCL5940 LED-Treiber über eine serielle Schnittstelle. Hierbei lassen sich die Chips im Daisy-Chain-Verfahren hintereinanderschalten und so bis zu 40 Chips (vgl. [TexasInstruments, 2010](#), Seite 20) an einem Datenbus betreiben. Hier gibt der Hersteller das Interface im Datenblatt vor. Eine vorhandene Softwarebibliothek (vgl. [acleone, 2010](#)) ermöglicht das schnelle Einbinden des Treibers in die Modulsoftware.

Die Verfügbarkeit im DIL-28- und PWP28-Package ermöglicht sowohl den Aufbau der Module in der through-hole technology als auch in der surface-mounted device Bauweise.

Durch das Hintereinanderschalten von drei LED-Treibern dieses Typs erreicht man die für das Modul notwendigen 48 steuerbaren LED-Kanäle.

Prototyp

Um auch dieses Bauteil auf Nutzbarkeit zu überprüfen wird eine Testplatine erstellt. Auf dieser sind alle zum Betrieb erforderlichen Bauteile sowie 16 Leuchtdioden zur Anzeige der Funktion untergebracht. Als steuernder Controller wird ein "Arduino Pro Mini" auf Basis des Atmel ATmega 328 Mikrocontrollers verwendet.

Messergebnis

Es zeigte sich, dass der Treiberbaustein exakt den Anforderungen der Bachelorarbeit genügt und in dieser Form alternativlos ist.

Die gemessene Stromaufnahme während des Betriebs lag bei rund 150mA. Dieser verhältnismäßig hohe Stromverbrauch und die dadurch resultierende Abwärme sind die einzig feststellbaren Nachteile dieses LED-Treibers.

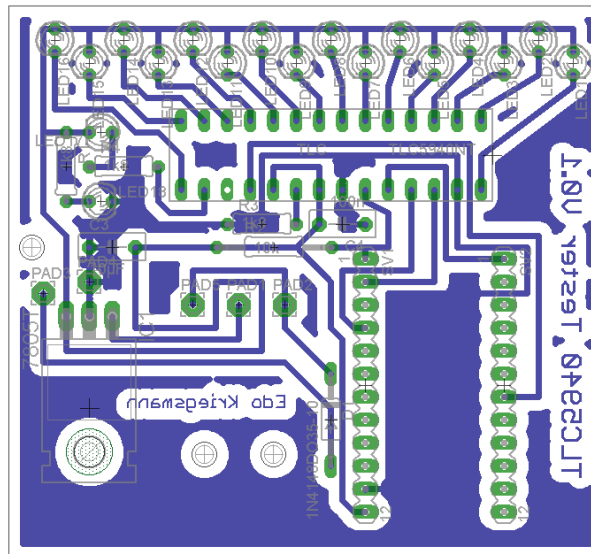


Abbildung 2.21: TLC5940 Testplatine

2.4 Datenbusse und Modulverbindungen

Zur Übertragung der Daten sowohl im Modul selber als auch unter den Modulen sind passende Bussysteme zu ermitteln und ein Interface zu definieren. Hier ist zwischen den segmentinternen und segmentexternen Schnittstellen zu unterscheiden.

2.4.1 Datenbus zur Modulkommunikation

Das Interface zwischen den Modulen erfordert eine bidirektionale Übertragung, da sowohl Sensordaten der Segmente ausgelesen, als auch die integrieren Aktoren angesprochen werden sollen. Zudem ist es aufgrund der flexiblen Anzahl an Busteilnehmern erforderlich, das Bussystem eine Erkennung und Adressierung der Teilnehmer ermöglicht.

Um eine Einschätzung der Anforderungen an das Bussystem zu ermöglichen, ist es erforderlich die Rahmenbedingungen genauer zu spezifizieren. Dazu gehören die maximale Anzahl der anzusprechenden Module an einem Datenbus, die Entfernung der Module zueinander und die für die Übertragung der Datenmenge erforderliche Busgeschwindigkeit. Auch sollte in die Entscheidung einfließen, ob externe Bustreiberbausteine benötigt werden, denn eine Einsparung dieser würde den Aufbau vereinfachen und die Baukosten reduzieren.

Datenlast auf dem Bussystem

Datenmenge eines Sensordatensatzes:

- RFID-Tag-ID a 5 Byte für 4 Segmente: 20 Byte
- Toucherkennung für 4 Segmente a 1 Bit: 4 Bit (aufgerundet auf 1 Byte)

Die Abtastfrequenz der Sensoren für eine flüssige Erkennung von Eingaben sollte bei etwa 15 Hz liegen, was eine Kapazität von $15 \text{ Hz} * (20 \text{ Byte} + 1 \text{ Byte}) = 315 \text{ Byte/s} = 2.520 \text{ Bit/s}$ auf dem Bussystem erfordert.

Datenmenge eines Aktordatensatzes:

- Helligkeitswert für 16 RGB-LED-Elemente a 3 Byte: 48 Byte

Die Ansteuerfrequenz der Aktoren liegt in etwa bei 20 Hz. Das erfordert eine Kapazität auf dem Bussystem von $20 \text{ Hz} * 48 \text{ Byte} = 960 \text{ Byte/s} = 7.680 \text{ Bit/s}$.

Insofern eine Adressierung der Daten über das Bussystem selbst erfolgt, ist hierzu keine Belastung im Payload einzuplanen. Als Payload wird die reine Nutzlast des Datenbusses bezeichnet, welche keine Protokoll- oder Steuerinformation umfasst.

Somit wird der Bus mit jedem angeschlossenen Modul mit rund **10kbit/s belastet**.

Möglichkeiten zur Reduzierung der Datenlast

Einsparpotential in der Menge der zu übertragenden Daten liegt hier in der Frequenz der Sensordatenerfassung und der Kürzung der RFID-Tag-IDs von vollen fünf auf die letzten drei Byte der ID. Durch die wegfallenden ersten zwei Byte der RFID-ID kann es theoretisch zu Überschneidungen von Tags kommen, deren letzten drei Byte identisch sind und sich lediglich in den ersten zwei Byte unterscheiden. Allerdings sind durch drei Byte noch $2^{24} = 16,8$ Milliarden Kombinationen möglich und so ein Überschneiden als unwahrscheinlich anzusehen.

Bei einer Reduzierung von 15 auf 10 Hz und einer Kürzung der ID-Länge kann die erforderliche Datenmenge für die Sensordatenübertragung auf 1.040 bit/s pro Modul reduziert werden.

Um auf der Aktoreenseite einen flackerfreien Betrieb zu sichern, sollte die Bildwiederholfrequenz hier nicht unter 20 Hz gesenkt werden. Die einzige Möglichkeit der Datenreduzierung ist eine Verringerung der Farbtiefe von 255 (8 Bit) auf 32 (5Bit) Stufen. So ist es möglich die RGB-Farbinformationen eines Leuchtmoduls in zwei Byte unterzubringen, statt drei Byte verwenden zu müssen. Dies würde die erforderliche Datenrate auf 5.120 bit/s reduzieren.

Mit diesen Maßnahmen könnte die erforderliche Datenrate pro Modul auf rund **6kbit/s fast halbiert** werden.

Eine Übersicht über die erforderliche Datenrate verschiedener Modulanzahlen:

	9 Module	16 Module	25 Module	36 Module
Normale Datenübertragung	92 kbit/s	163 kbit/s	255 kbit/s	367 kbit/s
Einsparpotential berücksichtigt	56 kbit/s	100 kbit/s	157 kbit/s	225 kbit/s

Dies ergibt bei 36 Modulen und ohne Einschränkung der Sensordatenerfassung eine minimal erforderliche Datenrate des Busses von **367.200 bit/s**. Diese Übertragungsmenge wird nur bei voller Belastung des Busses durch gleichzeitiges Ansprechen aller Module erreicht, muss aber durch die Bandbreite des Busses sicher abgedeckt werden.

Anzahl der Busteilnehmer

Zu den maximal 36 Modulen wird ein weiterer Teilnehmer im Bussystem zur Steuerung der Module benötigt. So ist es erforderlich, dass das Bussystem eine **minimale Anzahl von 37 Teilnehmern** unterstützt. Eine Multimasterfähigkeit des Bussystems, dies ist die Fähigkeit eines Bussystems die Kontrolle mehreren Teilnehmern zu überlassen, muss nicht gegeben sein, da es ausreicht dem Steuergerät die alleinige Kontrolle des Busses zu überlassen.

Wahl des Bussystems

Unter diesen festgelegten Anforderungen an das Bussystem kann nun eine Auswahl erfolgen. Die potentiell geeigneten Systeme sind der I2C und der RS485-Bus, welche im kommenden Absatz näher beschrieben werden.

I2C - oder korrekt I²C - steht für Inter-Integrated Circuit (vgl. www.i2c-bus.org, 2010) und ist ein serieller von Phillips entwickelter Bus. Die Übertragung wird von einem Master koordiniert und erlaubt bis zu 112 adressierbare Teilnehmer. Mit den aktuelleren Spezifikationen dieses Bussystems wurde im Laufe der Zeit die Übertragungsgeschwindigkeit von ursprünglich 100 kbit/s auf 400kbit/s gesteigert. In aktuellsten Spezifikationen sind bis zu 3,4MBit/s möglich, dies wird jedoch von dem Atmel Mikrokontroller, welcher hier eingesetzt werden soll, nicht unterstützt.

Der **RS485** oder auch EIA-485 (vgl. www.interfacebus.com, 2010) genannte Bus arbeitet ebenfalls mit einer seriellen Übertragung der Informationen. Seine Übertragungsgeschwindigkeit von bis zu 10 MBit und seine hohe Toleranz gegenüber elektromagnetischen Störungen zeichnen dieses Bussystem aus. Nachteilig ist die Begrenzung der Busteilnehmer auf 32, was jedoch den Minimalanforderungen dieser Bachelorarbeit genügt. Zudem wird ein RS485 Treiberbaustein benötigt, um einen Mikrochip mit diesem Bus kommunizieren lassen zu können.

Ein tabellarischer Vergleich der genannten Bussysteme:

	I2C	RS485
Maximale Busgeschwindigkeit	400 kbit/s	10.000 kbit/s
Maximale Busteilnehmer	112	32
Benötigte Treiberbausteine	nein	ja
Benötigte Busleitungen	2	2
Bidirektionale Übertragung	ja	ja

Fazit

Aufgrund der ausreichenden Geschwindigkeit und der Möglichkeit mehr als 32 Teilnehmer ansteuern zu können, fällt die Wahl des Systems für die Realisierung auf das I2C-Bussystem. Auch die in vielen Mikrocontrollern vorhandene Fähigkeit, den I2C Bus ohne zusätzliche Komponenten ansprechen zu können, spricht für diesen.

Eine Testverbindung über den I2C-Bus Datenbus zwischen zwei Arduino Duemillinoes zeigte, dass eine Verbindung einwandfrei hergestellt werden kann und fehlertolerant arbeitet. Auch die bidirektionale Datenübertragung ist Dank guter Unterstützung durch die Bibliothek der prototyping-Plattform problemlos möglich.

2.4.2 Segmentinterne Datenwege

Zur Kommunikation zwischen den Sensor- und Aktorelementen ist ein einfaches Bussystem zu realisieren, welches die Komponenten an den Mikrokontroller anbindet. Hier ist der auf dem Segment untergebrachte Controller der direkte Ansprechpartner der Sensor- und Aktortechnik. Die fixe Anzahl an anzusteuern Elementen macht eine einfache Übertragung möglich.

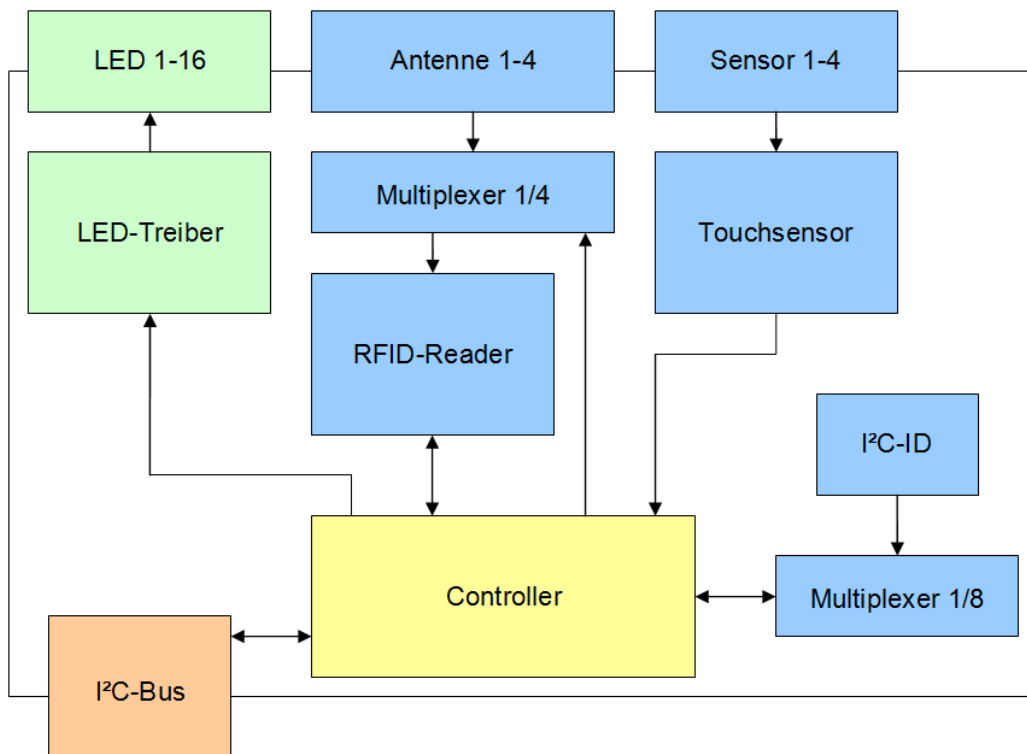


Abbildung 2.22: Schaubild der segmentinternen Kommunikationswege

Es sind folgende Elemente mit dem Mikrocontroller und dem externen Bussystem zu verbinden:

- **LED-Treiber**

Wie im Abschnitt LED-Treiberbausteine auf Seite 36 diskutiert, wird der TLC5940 Controller zur Ansteuerung der 16 LED-Kanäle eingesetzt. Dieser verfügt über eine serielle Schnittstelle welche fünf GPIO Pins benötigt. GPIO steht für General Purpose Input/Output und ist ein universell nutzbarer Ein- und Ausgabepin eines Mikrocontrollers. Die Leuchtdioden werden direkt an die Ausgänge des LED-Treibers angebunden.

- **RFID-Reader**

Der im Abschnitt 2.2.3 ausgewählte RFID-Reader des Typs ID-2 verfügt über ein serielles RS232 Interface und benötigt den RX-Pin des Mikrochip-UART-Contorlles -dies ist die integrierte RS232-Schnittstelle des Mikrocontrollers. Zudem ist es erforderlich den RFID-Reader während der Umschaltvorgänge der Antennen zurückzusetzen, was einen weiteren Pin erfordert. Das Umschalten der vier RFID-Antennen per Multiplexer belegt zusätzliche zwei digitale Pins.

- **Touch Sensoren**

Die Übertragung erfolgt durch Messen der Ausgangsspannung der Touchsensoren über A/D-Wandler (vgl. Abschnitt 2.1.2). Hierzu sind vier Wandlereingänge notwendig.

- **Interface Extern**

Eine Anbindung des Moduls erfolgt über die I2C Schnittstelle. Dies ist eine 2-Wire Schnittstelle und benötigt eine Clock und eine Datenleitung - SDA und SCL - welche vom Modulcontroller ausgehen. Die Wahl der I2C Schnittstelle erfolgt im Kapitel 2.4.1.

- **Schalter zur Wahl der Modul-ID**

Zur hardwareseitigen Wahl der Modul-ID ist es erforderlich einen Wahlschalter auf dem Modul unterzubringen. Die Abfrage dieses Schalters erfolgt über einen 1/8 Multiplexer, welcher drei Steuerungsleitungen und eine Rückgabelleitung erfordert.

2.4.3 Bussystem zur Ansteuerung der Modulkaskade

Da die zu kaskadierenden Module über keine Eigenintelligenz verfügen, ist es erforderlich ein Steuergerät zu entwickeln, welches die zentrale Koordination der Module übernimmt. Dieses muss sowohl mit dem modulexternen Datenbus ausgestattet sein, als auch mit einem PC-kompatiblen Bussystem, um die kaskadierten Module über einen PC steuern zu können.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass sich folgende drei Bussysteme potentiell eignen, um eine Verbindung von dem PC zu dem Modulkontroller zu ermöglichen.

- **USB**

Eine native USB-Unterstützung wäre der optimale Lösungsansatz, da eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit gewährleistet wäre und auch das Vorhandensein eines USB-Anschlusses an jedem aktuellen PC-System gegeben ist. Die Entwicklung einer nativen USB-Unterstützung ist im Rahmen dieser Ausarbeitung zu aufwändig, aber die Möglichkeit dieser Verbindung sollte erwähnt werden.

- **Seriell RS232**

Ein Kompromiss hierzu ist die Verwendung eines USB zu Seriell Moduls (vgl. [sprut, 2010](#)). Dies ließe sich mit den gängigen Hochsprachen ansprechen und könnte so die Grundlage einfacher Steuerungsprogramme bilden. Eine Serielle Geschwindigkeit von maximal 115.200 Bit/s reglementiert die maximal kaskadierbaren Module auf 10 statt der gewünschten 36. Eine Reduzierung der Datenmenge, wie im vorigen Kapitel beschrieben, könnte dieses Problem reduzieren, aber mit maximal 16 ansprechbaren Modulen nicht komplett lösen. Auch ob ein Betrieb mit reduzierter Farbtiefe und geringerer Sensorabtastrate den festgelegten Anforderungen genügen wird, kann erst die Realisierung zeigen.

Ein Vorteil der Seriellen Ansteuerung liegt in der einfachen Erweiterung um ein XBee Funkmodul zur drahtlosen Steuerung der Module. Jedoch ist auch hier die niedrige Datenrate von Nachteil.

- **Ethernet - TCP/IP**

Die Ansteuerung der Module über die Ethernetschnittstelle könnte den optimalen Kompromiss darstellen. Mit bis zu 100 Mbit/s Datenrate, welche von den gängigen Modulen unterstützt werden, ist die Übertragung ausreichend performant. Rechnerisch könnten Daten für bis zu 250 Kaskaden zu 36 Modulen zeitgleich übertragen werden. Zudem ist die Ansteuerung der Module über vorhandene Netzwerkinfrastruktur und das Internet möglich. Eine Ethernet Verbindung zu einem WLAN ließe sogar

die Möglichkeit offen, die Modulkaskade über WLAN fähige Endgeräte wie Mobiltelefone oder Smartphones anzusprechen.

Ein Prototyp zeigte, dass der Aufbau einer Socket-Verbindung, der Softwareschnittstelle einer Ethernet-Verbindung, über ein in JAVA geschriebenes Programm zu einem Atmel Mikrocontroller durchaus möglich ist.

Durch die Vorteile der Ethernetverbindung, wird diese in der Realisierung zum Einsatz kommen.

Aus dieser Auswahl ergibt sich die in der Grafik 2.23 veranschaulichte Verbindung der Module und deren Steuergerät.

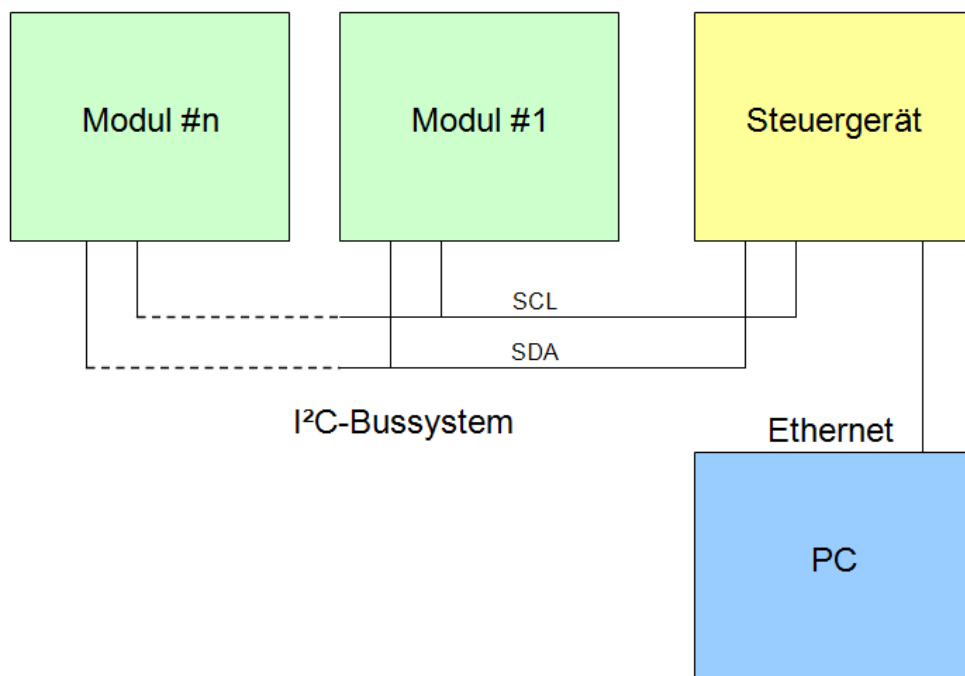


Abbildung 2.23: Schaubild der Modulkommunikation

2.5 Mikrocontroller

Zur Steuerung der Module wird ein Mikrocontroller benötigt, der im kommenden Kapitel ausgewählt wird. Hier ist die Verfügbarkeit der Mikrocontroller auf der Arduino Prototyping Plattform ein wichtiges Kriterium, da dies den einfachen Aufbau von Prototypen ermöglicht.

2.5.1 Anforderungen an der Mikrocontroller

Der Mikrocontroller zur Steuerung der Module muss den Anforderungen der Sensoren und Aktoren gewachsen sein und über die nötige Konnektivität verfügen um alle Elemente ansprechen zu können.

Im Kapitel 2.4.2 wurden die Verbindungen beschrieben, die der Mikrocontroller bereitzustellen hat. Zusammengefasst werden folgende Eigenschaften an den Controller gestellt:

- UART-Schnittstelle zur Kommunikation mit dem RFID-Lesegerät
- Ein I/O Pin zum Zurücksetzen des RFID-Readers
- I2C kompatibles Serielles Interface zur Kommunikation unter den Modulen
- Vier A/D-Wandler zum Einlesen der Touchsensorinformationen
- Fünf I/O Pins, davon drei PWM tauglich zur Steuerung der LED-Treiberchips
- Drei I/O Pins zur Steuerung der Multiplexer
- Ein I/O Pin zum Einlesen des Schalterrückgabewertes

2.5.2 Auswahl des Mikrocontrollers

In der folgenden Tabelle werden die in Frage kommenden Mikrocontroller miteinander verglichen.

Anforderung an den Mikrocontroller:	ATmega 328	ATmega1280
UART-Schnittstelle	Ja(1)	Ja (4)
I2C kompatibles Interface	Ja	Ja
10 I/O Pins, davon drei PWM tauglich	Ja	Ja
Vier A/D-Wandler	Ja	Ja
Package	DIP, TQPF	TQPF
Verfügbar als "Arduino"	Ja	Ja
Geschwindigkeit	16MHz	16MHz
SRAM	2KB	8KB

Hier fällt die Wahl auf den kostengünstigeren Atmel ATmega 328 als Controller zur Steuerung der Module. Auch die Verfügbarkeit im DIL-28-Package und im TQPF-Package ist von Vorteil, denn dies macht eine schnelle Portierung der Module von der through-hole technology zur surface-mounted device Bauweise möglich. Im Gegensatz zur surface-mounted Bauweise, bei der die Komponenten auf der Oberfläche verlötet werden, werden die Bauteile in der through-hole technology bedrahtet durch Bohrungen auf der Leiterbahn befestigt. Ein weiterer Vorteil dieses Mikrochips ist die Verwendung als Standardprozessor auf der prototyping-Plattform Arduino. Dies erlaubt den schnellen Aufbau von Prototypen unter gleichbleibenden Hardwarebedingungen auf Seiten des Mikrochips.

Auf die zum Betrieb notwendigen Komponenten und deren Beschaltung wird im Kapitel [3.3.1](#) der Realisierung eingegangen.

2.6 Steuergerät

In folgendem Kapitel werden die Komponenten des Steuergeräts spezifiziert. Dazu gehört der Mikrocontroller zur Steuerung des Geräts, die Schnittstellen zu den erforderlichen Bussystemen und die Ein- und Ausgabemöglichkeiten zur Gerätekonfiguration.

2.6.1 Mikrocontroller zur Modulansteuerung

Auch das Steuergerät benötigt einen Mikrocontroller zur Verarbeitung der ein- und ausgehenden Daten. Da es zur eigenständigen Steuerung der Module sowohl die Sensor als auch Aktordaten zwischenspeichern muss, steigt die Anforderung an die Speichergröße des Mikrocontrollers. Diese leitet sich aus den Datenmengen der Moduldaten, welche auf Seite [38](#) festgelegt wurden ab.

Sensordaten:

36 Module * (20Byte RFID-Daten + 1Byte Touchdaten) = 756Byte

Aktordaten:

36 Module * 16 LED-Einheiten * 3 Byte Farbinformationen = 1728 Byte

Daraus resultiert eine **Datenmenge von 2484 Byte**, welche von Mikrocontroller zwischenspeichern ist. Dazuzurechnen sind die für den Programmablauf erforderlichen Variablen. Diese werden auf rund 500 Byte geschätzt, was eine insgesamt zu speichernde Menge von rund 3KB ergibt.

Da der für die modulinterne Verarbeitung eingesetzte ATmega 328 lediglich einen SRAM von 2 KB besitzt, eignet sich dieser nicht für den Einsatz im Steuergerät. SRAM ist der Speicher eines Mikrochips, welcher die Daten des Programmablaufs aufnimmt, was genau diese Daten einschließt.

Hier fällt die Wahl auf den ATmega 1280, welcher ähnliche Eigenschaften wie der ATmega 328 besitzt, aber mit einen 8KB SRAM-Speicher ausgestattet ist (siehe Vergleich auf Seite [45](#)). Auch dieser ist mit einem I2C-Buscontroller ausgestattet, was den Betrieb eines I2C-Busses ohne externe Treiberbausteine ermöglicht. Lediglich zwei Pull-Up-Widerstände von 1,1kOhm auf die Daten- und Clockanschlüsse des Busses sind zum Betrieb erforderlich.

2.6.2 Ethernet Verbindung

Da der verwendete Atmel ATmega 1280 Controller keine integrierte Ethernet-Schnittstelle besitzt, muss diese durch externe Hardware angebunden werden. Hierzu wird das Ethernet-Shield der Arduino Community (vgl. arduino.cc, 2010) verwendet. Diese Ethernet-erweiterung wird über die SPI-Schnittstelle an den Atmelcontroller angebunden.

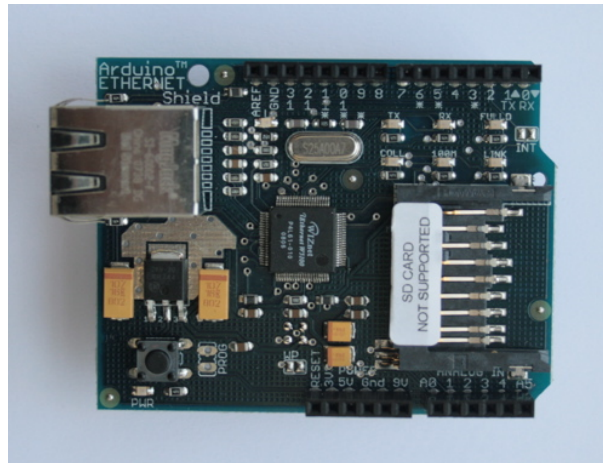


Abbildung 2.24: Ethernet Shield

2.6.3 Konfiguration des Steuergeräts

Um eine schnelle Konfiguration des Steuergeräts zu ermöglichen, wird dies mit einem 16 mal zwei Zeichen großen Display und vier nebenstehenden Tastern ausgestattet. So ist es möglich wichtige Parameter auch während des Laufenden Betriebs anzupassen. Die so zu konfigurierenden Funktionen werden in der Realisierung auf Seite 74 festgelegt.

Zusammengefasst werden für das Steuergerät folgende Komponenten benötigt:

- eine 12 V Spannungsversorgung
- ein Arduino MEGA mit einem Atmel 1280 Controller als Basis
- ein Ethernet-Shield um die Ethernet-Verbindung bereitzustellen
- drei Zwei-Farb-LED zum Anzeigen des Betriebszustandes
- ein 16x2 Display mit vier Tastern zur Änderung der Konfiguration

2.7 Fazit der Analyse

In der Analyse konnte, mit Ausnahme des RFID-Antennenmultiplexers, erfolgreich zu jeder Problemstellung einen Lösungsansatz gefunden werden. Durch den Bau entsprechender Prototypen wurden diese Ansätze auf eine mögliche Umsetzung und den Einsatz unter realen Bedingungen geprüft. Dies vermittelte einen guten Eindruck über die Einsatzfähigkeit der Sensor- und Aktorelemente.

So zeige die Analyse der Berührungserkennung, dass die kapazitive Messmethode durchaus vielversprechend angewandt werden kann. Hier wird in der Realisierung ein Oszillator in Kombination mit einem D-Flip-Flop zur Verwendung kommen. Diese ist neben den kommerziellen kapazitiven Sensoren die wohl geeignetste Methode, den gestellten Anforderungen an die Berührungserkennung gerecht zu werden.

Bei der RFID-Sensorik konnte mit einem Vortest die Umsetzung dieser Technik gezeigt werden. Aufgrund des fehlenden, leistungsfähigeren Multiplexers, war eine Anbindung der gewünschten vier Antennen an ein Lesegerät leider nicht möglich. In der folgenden Realisierung wird weiter an dieser Lösung gearbeitet, da zur Vervollständigung lediglich ein fehlendes Bauteil eingesetzt werden muss. Eine Markierung der zu erkennenden Objekte ist bei diesem Lösungsansatz erforderlich, aber in den Anforderungen gestattet.

Die Leuchtsegmente werden in der Umsetzung mit dem PWM-Verfahren gedimmt. Dies erfolgt mit dem darauf spezialisierten LED-Treiber des Typs TLC5940. Eine Verbindung drei dieser Chips erlaubt es die 16 dreifarb-LEDs anzusprechen und die Segmentoberfläche so gleichmäßig und in jeder erdenklichen Farbe zu beleuchten.

In den letzten Abschnitten der Analyse wurde auf die Busverbindungen eingegangen. Hier sind sowohl die internen Datenwege, die Verbindungen unter den Modulen als auch die Verbindung zur Modulsteuerung betrachtet worden. Auch in diesem Bereich konnten Ergebnisse erzielt werden und eine Auswahl erfolgen. So wird als Verbindung unter den Modulen der I2C-Bus und zur Steuerung der Modulkaskade der Ethernet-Bus zur Verwendung kommen.

Zur Datenverarbeitung auf dem Modul wird der Atmel ATmega 328 Mikrocontroller zum Einsatz kommen. Die Modulsteuerung übernimmt aufgrund der erhöhten Anforderung an den Programmspeicher der größere Bruder Atmel ATmega 1280.

Im kommenden Kapitel wird auf die Realisierung der Module unter diesen so geschaffenen Voraussetzungen eingegangen.

3 Realisierung

In diesem Kapitel wird die Realisierung der Module beschrieben. Hierzu gehört sowohl das Design der Modulhauptplatine als auch des Modulsteuergerätes. Zudem wird auf die Entwicklung der notwendigen Software auf den Modulen, der Modulsteuerung und der PC-Basierten Kontrollsoftware eingegangen.

3.1 Prototyp

Vor dem endgültigen Design der Modulplatinen soll ein Prototyp des kompletten Aufbaus etwaige Fehler im Design aufdecken. Auch macht dieser es möglich den Aufbau zu optimieren, ohne für jede Änderung eine neue Platine erstellen zu müssen.

Arduino Prototyping Plattform

Wie in Abschnitt 2.5 erwähnt, ist ein Kriterium der Mikrokontrollerauswahl die Verfügbarkeit dieser, auf der Prototyping-Plattform Arduino (im weiteren Verlauf nur Arduino genannt). Diese Plattform wird sowohl zum Bau des Prototypen der modulinternen Steuerung eingesetzt, als auch zum Bau des Steuergeräts.

Für diese Anwendungen kommen zwei Arduino Bauformen (vgl. [Odendahl, 2009](#), Seite 18) zur Verwendung.

- Der **Arduino Mega** ist der Leistungsstärkste Arduino. Bestückt ist dieser mit einem Atmel ATmega 1280 Mikrocontroller, welcher sowohl eine größere Speicherkapazität als auch eine deutlich erhöhte Anzahl an Verbindungen ermöglicht. Dieser Arduino wird für die Erstellung des Prototypen des Steuergeräts zur Verwendung kommen. (Grafik 3.1)
- Der **Arduino Duemilanove** ist die Standardplatine der Arduino-Serie und mit einem Atmel ATmega 328 ausgestattet. Hierauf aufbauend wird der Prototyp einer Modulplatine erstellt. (Grafik 3.2)

Ein Detaillierter Vergleich der auf diesen Boards aufgebrachten Controller ist auf Seite 45 zu finden.

Ergebnisse der Prototypenuntersuchung

Ein Prototyp der gesamten Modulkonstruktion zeigte, dass der Aufbau wie in der Analyse beschrieben möglich ist. Es konnten keine konzeptionalen Fehler gefunden werden. Hierauf basierend erfolgt in den kommenden Abschnitten der Hardwareaufbau und das Platiniendesign. Auch legen die für den Prototyp geschriebenen Testprogramme den Grundstein des endgültigen Softwaredesigns.

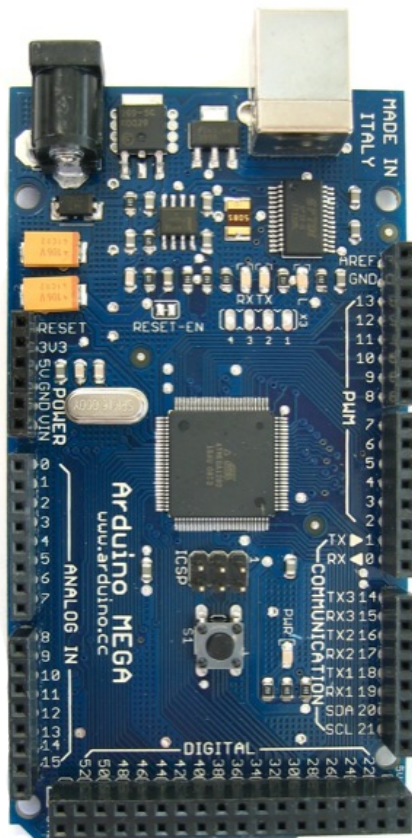


Abbildung 3.1: Arduino MEGA

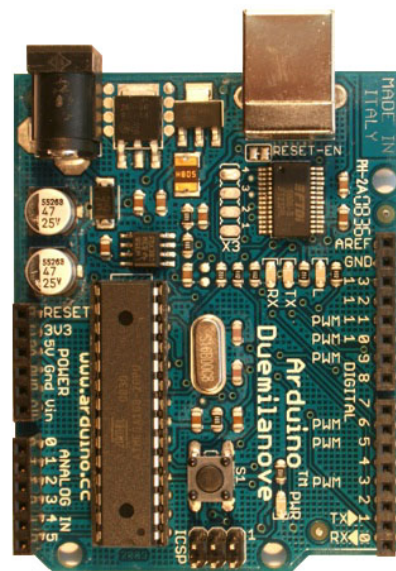


Abbildung 3.2: Duemilanove

3.2 Grundlagen zum Hardwareaufbau

Die anschließende Sektion beschreibt die Grundlagen der Realisierung der Modulplatinen und die Anforderungen an das Design dieser.

Zum Design der Platinen wird die Software "Eagle" des Herstellers CadSOFT verwendet. Mit dieser ist es möglich auch mehrlagige Platinen präzise zu erstellen und in einem Format auszugeben, welches von Platinenherstellern akzeptiert wird. Auch die in der HAW verwendete Software "Altium Designer" wurde hierzu in Betracht gezogen, aufgrund persönlicher Präferenzen aber nicht verwendet.

Vor dem Layout müssen jedoch die Spezifikationen des Platinenlayouts festgelegt werden. Auch sind die durch den Hersteller vorgegeben Restriktionen an das Layout zu beachten.

3.2.1 Platinenaufteilung

Die Grundfunktionalität der Module, hierzu gehören das Bussystem, die Leuchtdiodenanssteuerung samt der Dioden und die Spannungsversorgung werden fest auf der Hauptplatine verlötet. Die Sensorelektronik, also die RFID-Einheit und die Erkennungselektronik für die Berührung der Oberfläche, wird auf gesonderten Platinen untergebracht. Diese werden über Steckverbindungen mit der Hauptplatine verbunden und hierdurch sowohl mit Spannung versorgt als auch an die Datenübertragung angebunden.

Dieser teilmodulare Aufbau bringt einige Vorteile zum festen Aufbau auf der Modulplatine mit sich. So ist es möglich, schnell auf Neuerungen der Sensortechnik reagieren zu können, ohne ein aufwändiges Redesign der Hauptplatine erforderlich zu machen. Auch ein Tausch einer defekten Sensoreinheit wird so ermöglicht.

3.2.2 Anforderungen an das Platinendesign

Zur kostengünstigen Produktion der Platinen ist es erforderlich, sich auf ein zweilagiges Design zu beschränken. Das heißt, dass die Ober- und Unterseite der Epoxydplatine mit Leiterbahnen bestückt werden. Bei mehr als zwei Lagen befinden sich auch Leiterbahnen im Inneren der Platine, dies erfordert allerdings eine kostenintensivere Produktion.

Auch müssen für die Fertigung der Platinen Anforderungen an das Design eingehalten werden. Hierzu gehören unter anderem die minimale Leiterbahnbreite und der minimale Leiterbahnabstand. Auch die Größe der Bohrungen ist bei vielen Anbietern beschränkt.

Eine typische Layoutvorgabe eines Platinenherstellers:

Kleinster Bohrdurchmesser	0,40 mm
Kleinster Leiterbahnabstand	0,20 mm
Kleines Leiterbahnbreite	0,20 mm
Mindestrestring Pads	0,25 mm

Die Leiterbahnbreite der Platinen muss so dimensioniert werden, dass sie ausreichend breit ist um den maximalen Strömen risikolos standzuhalten. Eine Überdimensionierung soll aus Platzgründen vermieden werden. Der Platinenhersteller Multipcb stellt zur Auswahl der richtigen Dimensionierung folgende Grafik bereit (vgl. Grafik 3.3).

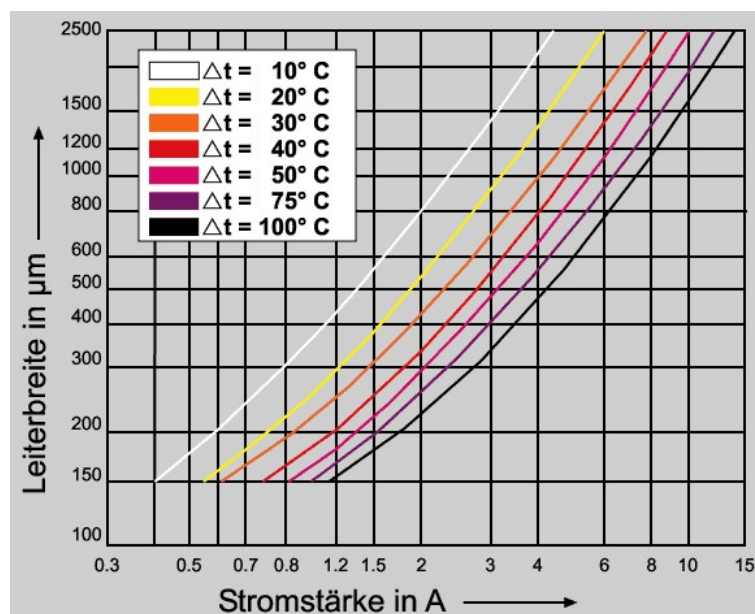


Abbildung 3.3: Strombelastbarkeit der Leiterbahnen (vgl. [Multipcb, 2010](#))

Zuerst jedoch ist der Stromverbrauch der Komponenten zu bestimmen um die Leiterbahnbreite ermitteln zu können. Sofern ein Datenblatt vorhanden ist, wird der Stromverbrauch der Komponenten diesem entnommen. Ist keine Angabe vorhanden, wurde der Strom durch eine Messung ermittelt. Ausgehend von einer Kupferbeschichtung der Platine von $35\mu\text{m}$ und einer minimalen Betriebstemperatur von rund 20 Grad ergeben sich in folgender Tabelle zusammengefasste Leiterbahnstärken der Zuleitungen. Berücksichtigt bei der resultierenden Breite ist die minimale, vom Platinenhersteller vorgegebene Leiterbahnbreite von 0,20mm.

Komponenten	Stromverbrauch	Breite minimal	resultierende Breite
RFID-Reader ID-2	13mA	0,10mm	0,20mm
vier Touchsensoren	60mA	0,10mm	0,20mm
drei LED-Treiber	450mA	0,17mm	0,20mm
Atmel 328 Controller	30mA	0,10mm	0,20mm
eine Leuchtdiode	25mA	0,10mm	0,20mm
weitere Komponenten	45mA	0,10mm	0,20mm
Zuleitungen			
LED-Gesamtzuleitung	1200mA	0,30mm	0,30mm
Stromverteilende Leiterbahn	1798mA	0,50mm	0,50mm

Die Strombelastungen der Daten- und Steuerleitungen sind hier zu vernachlässigen, da durch diese nur Ströme im einstelligen Milliamperebereich fließen.

Kumuliert ist ein Strombedarf des Moduls von rund 600mA bei einer Spannung von 5V und ein Gesamtstrombedarf auf der 12V Leiterbahn von 1,2A zu erwarten.

Die zur Verteilung des Stroms unter den Modulen bestimmte Leiterbahn wird pro Modul mit rund 1,8A belastet. Bei Versorgung der Modulkaskade aller 36 Module - ausgehend von einer Stromzuleitung - wäre eine Strombelastbarkeit der Leiterbahn von rund 65 Ampere notwendig. Dies ist mit einer maximal vertretbaren Leiterbahnbreite von 2,5mm und der daraus resultierenden Stromstärke von 6A nicht zu erreichen. Bei Kaskadierung der Module ist jedes dritte Modul extern mit Strom zu versorgen, da die Leiterbahn einer Mehrbelastung nicht standhalten würde.

Durch Verdopplung der Leiterbahndicke von $35\mu\text{m}$ auf $70\mu\text{m}$ lässt sich die maximale Strombelastbarkeit um den Faktor 1,4 erhöhen. Dadurch könnte eine Stromstärke von 8,4A geleitet und eine Versorgung von vier Modulen sichergestellt werden. Bei einer Dicke von $105\mu\text{m}$ wäre der Strombedarf von neun Modulen gedeckt. Dies würde einem Viertel der maximalen Modulanzahl entsprechen und so die Versorgung der gesamten Kaskade über vier Zuleitungen ermöglichen. Eine Leiterbahndicke von $105\mu\text{m}$ wird jedoch nur selten verwendet und ist preislich unattraktiv.

Eine Alternativlösung zum $105\mu\text{m}$ Leiterbahnmaterial ist das nachträgliche Aufbringen von Kupferdraht auf den entscheidenden Leiterbahnen. So könnte einerseits das kostengünstige $35\mu\text{m}$ Material verwendet werden und andererseits eine Versorgung der Betriebsspannung über eine einzige Zuleitung erfolgen.

Die Verlegung der Leiterbahn in direkter Anordnung um das Modul ist unter EMV-Gesichtspunkten kritisch anzusehen, da so eine Magnetfeld erzeugende Schleife um die Modulplatine erzeugt wird (vgl. [IT-Wissen, 2010](#)). Jedoch ist die Anordnung der Versorgungsspannung führenden Leiterbahnen alternativlos und die EMV-kritische Ansicht als nachrangig zu betrachten.

3.3 Hardwaredesign der Komponenten

Dieser Bereich erläutert den hardwareseitigen Aufbau der Modulkomponenten. Zum Tragen kommen hier die im vorigen Abschnitt spezifizierten Anforderungen an das Platinendesign. Die verwendeten Baugruppen wurden in der Analyse bestimmt und werden hier in das Platinenlayout eingearbeitet.

3.3.1 Hauptplatine

Schalter zur Wahl der Modul ID

Um die maximal 36 möglichen I2C-IDs abzufragen, ist eine Anzahl von sechs Schaltern notwendig. Diese erlauben es über eine Binärkombination dem Mikrokontroller bis zu 64 (2^6) Zustände zu übermitteln.

Beim Einlesen von sechs Schaltleitungen ist es sinnvoll einen 1/8-Multiplexer zu verwenden, da dieser die erforderlichen Anschlüsse von sechs auf vier reduziert. Zudem können in diesem Fall die Steuerleitungen dieses Multiplexers mit den Steuerleitungen des RFID-Antennen-Multiplexers geteilt werden, da die Schaltstellungen lediglich beim Start der Modulsoftware einmal eingelesen werden müssen. So sind während des Betriebs keine Interferenzen zu erwarten und es werden lediglich eine weitere Steuerleitung und ein Pin zum Einlesen der sechs Steuerleitungen benötigt.

Die zwei nicht verwendeten Anschlüsse des 1/8-Multiplexers könnten für einen weiteren zweipoligen Wahlschalter verwendet werden. Über diesen können weitere Betriebszustände oder Modulfunktionen angewählt werden, ohne hierzu zusätzliche Anschlüsse bereitstellen zu müssen.

Status LED

Auf der Rückseite der Modulhauptplatine wird eine Status-LED angebracht. Diese übernimmt die Aufgabe Betriebs- und Fehlerzustände anzuzeigen. Auch beim Debuggen der Platine ist eine zuverlässige Statusanzeige, welche ohne zusätzliche Hardware auskommt, von Vorteil.

Leuchtdioden

Drei Möglichkeiten zur gleichmäßigen Anordnung der Leuchtdioden auf der Modulplatine stehen zur Auswahl.

- **Die Anordnung der Module ohne Abstand zueinander (Grafik 3.4)**

Dies hat den Vorteil, eine geschlossene Platinenfläche zu erzeugen und die Module durch direkt aufgelötete Steckverbindungen zu verbinden. Die Leuchtdioden werden zur gleichmäßigen Verteilung zentral auf der Modulplatine untergebracht, was negativ den Platz zum Aufbau der Komponenten auswirkt.

- **Module mit kleinem Abstand zueinander angeordnet (Grafik 3.5)**

Hier wird Spielraum geschaffen, die Module auch leicht versetzt oder auf unebenen Flächen zu verlegen. Eine durchgängige Platinenfläche kann nicht geschaffen werden, da das direkte Aneinanderlegen der Module eine asymmetrische LED-Anordnung zur Folge hätte.

- **Die Module mit maximalem Abstand voneinander getrennt (Grafik 3.6)**

Um eine gleichmäßige Verteilung der Leuchtdioden zu erreichen, werden diese bis zum Platinenrand angebracht. Der Vorteil dieser Anordnung liegt darin, mit wenigen Modulen eine möglichst große Fläche zu bestücken.

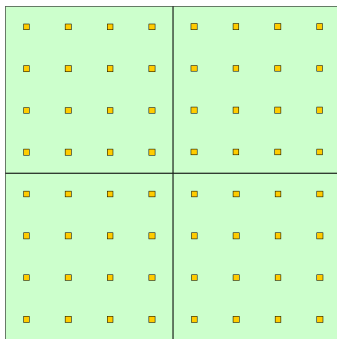


Abbildung 3.4: Option 1

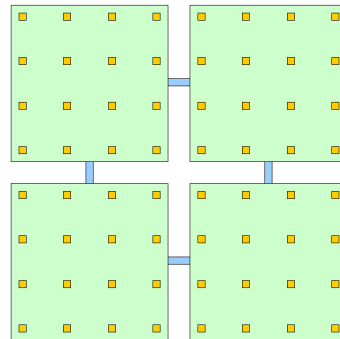


Abbildung 3.5: Option 2

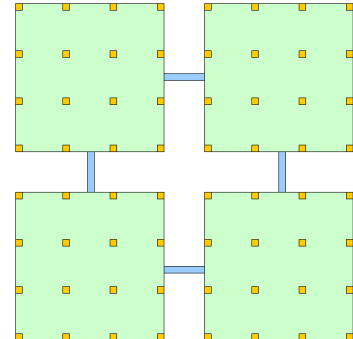


Abbildung 3.6: Option 3

Eine Alternativlösung wäre das Aufbringen der Leiterbahnen und Bohrungen für die Anordnung der Leuchtdioden auf zwei oder allen drei Positionen. Dies schafft die Flexibilität, die Anordnung der Leuchtdioden je nach Einsatzzweck anzupassen, verursacht durch zusätzliche Bohrungen aber geringe Mehrkosten auf Seiten der Platinenherstellung. Auch kosten die zusätzlichen Leiterbahnen Platz auf der Modulplatine.

Das Platinendesign wird die LED-Positionen nach Option 1 und Option 2 bereitstellen.

LED-Treiberbausteine

Auch wird auf der Hauptplatine der TLC5940 LED-Treiber in dreifacher Ausführung bereitgestellt. Dieser benötigt je nach Art und Menge der Leuchtdioden einen Referenzwiderstand zur Bestimmung des Maximalstroms der integrierten Konstantstromquelle, wie in der Analyse des LED-Treiberbausteins auf Seite 36 erwähnt.

Der Referenzwiderstand wird laut Datenblatt (vgl. [TexasInstruments, 2010](#), Seite 14) durch folgende Formel ermittelt. Hierbei ist der Wert 31.5 eine im Datenblatt festgelegte Konstante.

$$I_{(MAX)} = \frac{V_{(REF)}}{R_{(REF)}} * 31.5 \text{ mit } V_{REF} = 1,24V$$

Bei einer der hier eingesetzten LED mit einem Betriebsstrom von 25mA leitet sich folgende Formel her:

$$R_{(REF)} = \frac{V_{(REF)}}{I_{(MAX)}} * 31.5 \text{ mit } V_{(REF)} = 1,24V$$

$$R_{(REF)} = \frac{1,24V}{0,025A} * 31.5 = 1562\Omega$$

Dies bedeutet, dass ein Referenzwiderstand von 1,5 kOhm erforderlich ist, um die LED ohne Vorwiderstand an diesem LED-Treiber zu nutzen.

Zudem sieht das Datenblatt des TLC5940 zwei Betriebsspannung stabilisierende Kondensatoren in den Größen 100nF und 1,0μF vor. Diese sind vor jedem LED-Treiber anzubringen um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten.

Auch der weitgehend baugleiche TLC5941 LED-Treiber könnte in diesem Projekt verwendet werden. Dieser kann eine maximale Last von 80mA statt der 120mA des TLC5940-Reglers schalten, was bei benötigten 25mA immer noch vollkommen ausreichend ist. Durch die identische Ansteuerung der Regler und der Pin-Kompatibilität ist ein Tausch jederzeit möglich.

Stromversorgung des Moduls

Zur Stromversorgung der Module wird eine 12V Spannungsversorgung eingesetzt. Da einige Komponenten, wie der LED-Treiber, eine 5V Versorgung benötigen, wird diese mit einem Spannungsregler auf der Hauptplatine zur Verfügung gestellt.

Um den in Abschnitt 3.2.2 ermittelten Strombedarf von rund 600mA bei 5V aus der 12V-Versorgung bereitzustellen, kommt ein 7805 Regler zum Einsatz. Dieser Regler erzeugt bei einer Eingangsspannung von bis zu 25V eine 5V Spannung mit einem Maximalstrom von 1,5 Ampere. Die überschüssige Energie wird im Regler in Wärme umgewandelt, welche durch folgende Formel angenähert werden kann.

$$P_{MAX} = (V_{IN} - V_{OUT}) * I_{MAX}$$

Verlustleistung 7805: $P = (12V - 5V) * 0,6A = 4,2W$

Diese verhältnismäßig hohe Verlustleistung von 4,2W lässt sich nur durch Aufbringen eines Kühlkörpers an die Luft ableiten. Im Notfall wird eine Überhitzung des Reglers durch die "Thermal Shutdown" Funktion verhindert, welche den Regler bei Überhitzung deaktiviert. Dieser Fall sollte jedoch verhindert werden.

Um die Abwärme und damit die Größe des Kühlkörpers zu reduzieren, ist das Aufbringen einer Reihe Sperrdioden vor dem Linearregler eine gängige Lösung (siehe Grafik 3.7). Diese reduzieren den Eingangsstrom jeweils um 0,7V und senken, ausgehend von einer 12V Eingangsspannung, in einer Viererreihenschaltung die Spannung vor dem Regler auf 9,2V. Dies kann die maximal zu erwartende Verlustleistung mit 2,6W fast halbieren. Zudem erreicht man durch die Dioden einen Verpolschutz der Module, da der Strom nur unidirektional durch diese fließen kann.

Verlustleistung 7805 mit vorgeschalteten Dioden: $P = (9,2V - 5V) * 0,6A = 2,6W$

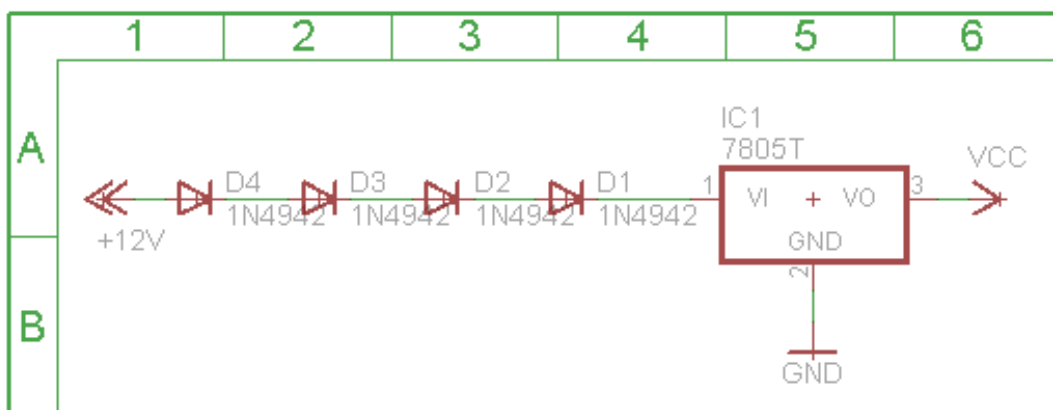


Abbildung 3.7: 7805 mit vorgeschalteten Dioden

Auch das Verschachteln von Linearreglern ist möglich. So kann mit einem vorgeschalteten 7810 Regler, welcher eine 10V Ausgangsspannung herstellt, die Verlustleistung auf zwei Regler und damit auf die doppelte Kühlerfläche verteilt werden (vgl. Grafik 3.8).

Verlustleistung 7810: $P = (12V - 10V) * 0,6A = 1,2W$

Verlustleistung 7805: $P = (10V - 5V) * 0,6A = 3,0W$

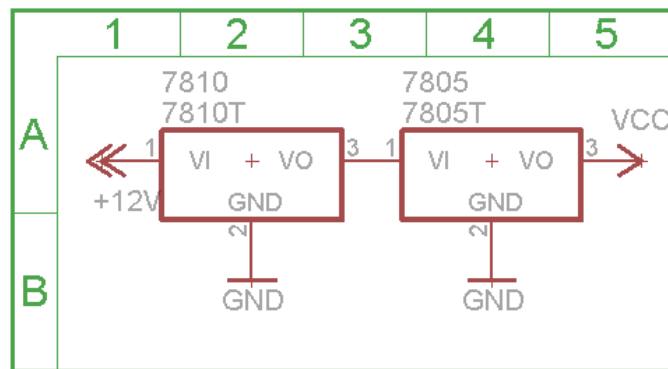


Abbildung 3.8: 7805 in Kombination mit 7810

Verwendete Lösung zur Spannungsversorgung des Moduls

Um die Temperatur der Regler auf dem Modul möglichst gering zu halten, kommen zwei getrennte 7805 Bausteine in Kombination mit je vier vorgeschalteten Sperrdioden zum Einsatz (vgl. Grafik 3.7). Dies erlaubt es, die durch die Dioden verringerte Abwärme, zusätzlich auf zwei Regler zu verteilen. Dadurch ergibt sich in Abhängigkeit des errechneten Modulstromverbrauchs eine Abwärme von 1,3W pro Linearregler, welche durch verhältnismäßig kleine Kühlkörper an die Luft abgegeben werden kann.

Verlustleistung 7805: $P = (9,2V - 5V) * (600mA/2 \text{ Regler}) = 1,3W$

Eine Stabilisierung der Ausgangsspannung und eine Absicherung gegen das Aufschwingen des Reglers erfolgt durch einen nachgeschalteten $10\mu F$ Kondensator.

Der optimale, aber auch kostenintensivste Lösungsansatz ist die Regelung der Spannung über ein DC/DC-Spannungsregler. Diese arbeiten verlustwärmefrei mit einer Effizienz von bis zu 94% (vgl. [RECOMElectronicGmbH, 2010](#), Seite 1) . Dies reduziert den Aufwand der Kühlung der Regler und senkt die Leistungsaufnahme der Module deutlich, da keine Umwandlung der überschüssigen Energie in Wärme erfolgt.

Durch den pinkompatiblen R-785.0-1.0-Regler der Firma RECOM (vgl. [RECOMElectronicGmbH, 2010](#)) ist eine Umstellung ohne eine Änderung des Platinendesigns jederzeit möglich.

Mikrocontrollerbeschaltung

Zum fehlerfreien Betrieb eines Mikrocontrollers ist es erforderlich die Versorgungsspannung (V_{cc}) gegen Störeinflüsse abzusichern. Dies wird mit einem vorgeschalteten Kondensator in der Größenordnung von 100nF erreicht.

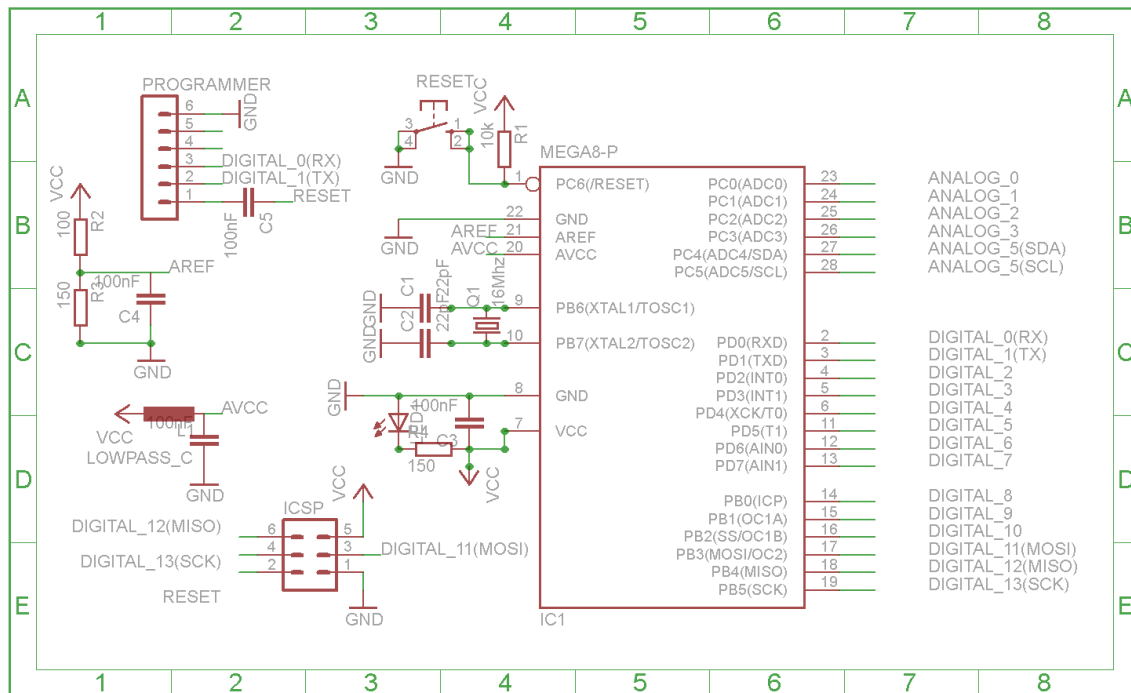


Abbildung 3.9: Basisbeschaltung eines Atmel ATmega 328

Der A/D-Wandler des Mikrocontrollers besitzt einen separaten Anschluss zur Spannungsversorgung (AV_{cc}), da dieser für präzise Messungen eine noch stabilere Versorgungsspannung erfordert. Das Datenblatt des Atmel Controllers sieht hier einen LC-Tiefpass als Störfilter vor (vgl. [Atmel, 2010c](#), Seite 258). Angegeben ist für diese LC-Schaltung eine Induktivität von $10\mu\text{H}$ bei einer Kapazität von 100nF.

Zum Einstellen des Wertebereichs der A/D-Messung stellt der Atmel-Controller einen weiteren Anschluss zur Verfügung (Aref) (vgl. Grafik 3.9). Dieser erlaubt es den 10Bit-Bereich des A/D-Wandlers (Dezimal 0 bis 1023) dem Spannungsbereich von 0V bis zur an Aref anliegenden Referenzspannung zuzuweisen. Die an Aref anliegende Spannung darf dabei die Versorgungsspannung von 5V nicht überschreiten. Beschaltet werden kann dieser Anschluss direkt mit der Versorgungsspannung, oder über einen Spannungsteiler Reduzierung der Referenzspannung. Dies erlaubt es dem A/D-Wandler sich dem Wertebereich angeschlossener Sensoren anzupassen. Bei einer zu messenden Sensorspannung von 3V und einer Referenzspannung von 5V wären Messergebnisse des A/D-Wandlers von 0 - 614 zu

erwarten. Der Messbereich von 615 bis 1023 wäre nicht zu erreichen. Durch Anlegen einer Referenzspannung von 3V ist eine Messung dieser Sensorspannung im Wertebereich von 0 - 1023 möglich und so deutlich präziser.

Auch ist ein ICSP-Anschluss zur Programmierung und ein Taster zum Resetten des Mikrocontrollers erforderlich. ICSP steht für In-Circuit Serial Programming und erlaubt das Programmieren des Controllers mit einem ICSP-Programmiergerät. Die Programmierung des Controllers kann auch über einen USB zu RS232-Adapter erfolgen. Hierzu ist softwareseitig ein Bootloader auf dem Controller zu brennen und auf Seiten der Hardware ein Verbindungsstecker anzubringen. Vor jedem Programmiervorgang ist der Mikrocontroller zu resetten. Um diesen Vorgang zu automatisieren, stellt der USB zu RS232-Adapter einen Reset-Pin namens DTS zur Verfügung. Dieser wird über einen 100nF Kondensator mit dem Reset-Pin des Controllers verbunden und ermöglicht so das automatische Zurücksetzen des Mikrochips über den Programmieradapter.

Der Basisaufbau einer solchen Schaltung ist im Schaltplan [3.9](#) zu erkennen. Eine Detaillierte Übersicht über die genaue Beschaltung des Mikrocontrollers auf dem Modul ist auf Seite [77](#) zu finden.

Busverbindungen

Mittig an jeder Seite der Modulhauptplatine werden Steckverbindungen für die Betriebsspannungsvorsorgung und den Zugang zum I2C-Bussystem angebracht. In Grafik [3.6](#) sind diese Verbindungen blau angedeutet. Diese Vierfachauslegung der Zugänge erlaubt das einfache Kaskadieren der Module ohne deren Verbinden dieser über einen zentralen Kabelbaum. Zwei der vier Verbindungsstecker (oben und rechts) sind um 180 Grad gedreht auf der Platine aufgebracht. Dies erlaubt die Kaskadierung der Module mit "1 zu 1"-Kabelbrücken, verbietet aber das Drehen der Module, da es ansonsten zu einem Kurzschluss kommen würde. Als Steckverbindung kommen sechspolige (2 x 3) Wannenstecker mit einem Rastermaß von 2,54mm zum Einsatz, welche durch eine Einkerbung das Problem der Verpolung ausschließen. Zwei der sechs Kontakte der Steckverbindung bleiben hierbei offen für zukünftige Modulerweiterungen, da die Versorgungsspannung und das Bussystem nur vier Verbindungen benötigt. Auch werden sechspolige Buchsen zum Verbinden der Sensorikplatinen auf der Hauptplatine untergebracht.

Zu beachten ist, dass nur mit einer zusätzlichen Verstärkung der Versorgungsspannung führenden Leiterbahnen nach [3.2.2](#) eine Versorgung aller 36 Module über einen Zugangspunkt möglich ist.

Pinkompatible Busverbindung nach "Brilldea LED Painter PCB"

Eine Besonderheit im Platinendesign liegt in der Möglichkeit die Modulplatine als Alternative zur Brilldea LED Painter Printed Circuit Board (vgl. Brilldea, 2010) zu nutzen (siehe Grafik 3.10). Hierzu wurden auf der Modulplatine pinkompatible Steckverbindungen zum Brilldea Painter aufgebracht.

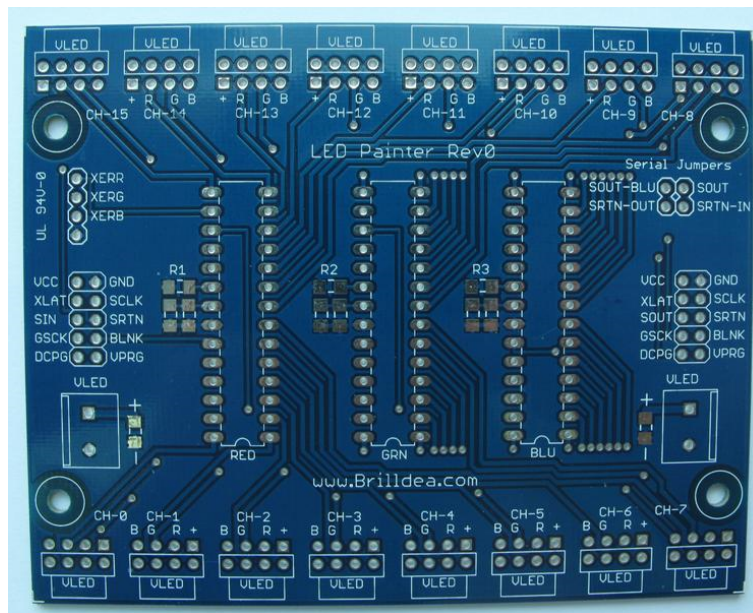


Abbildung 3.10: Brilldea LED Painter PCB (vgl. Brilldea, 2010)

Folgende Möglichkeiten zur Nutzung dieser Anschlüsse sind vorgesehen:

- Ein Aussparen des Modulcontrollers und der Sensorplatinen wandelt die Modulplatine in eine passive TLC5940-Adapterplatine. Eine Steuerung der Leuchtdioden erfolgt über den zehnpoligen "TLC IN" Verbindungsstecker über einen externen Controller. Die in der Kaskade folgende Modulplatine wird über den "TCL OUT" Port angebunden.
- Werden lediglich die Sensorplatinen ausgespart, besteht die Möglichkeit, dass der Modulcontroller weitere passive Modulplatinen über den "TLC OUT" Port steuert. Hierzu ist der Modulkontroller mit einer dafür ausgelegten Software zu beschreiben.

Zur Kaskadierung der Module werden sowohl die regulären sechspoligen Verbindungen zur Spannungsversorgung, als auch die zehnpoligen Brilldea Painter Verbindungsstecker zur Datenverbindung benutzt. Theoretisch ist eine Kaskade von bis zu 13 Modulen zu realisieren, in der Praxis zeigte sich aber, dass eine sichere Datenübertragung nur bis zu vier verschachtelter Module gewährleistet ist.

Abmessungen des Moduls

Den Vorgaben entsprechend lassen sich nun die Abmessungen des Moduls bestimmen. Die Grundfläche ist mit 200 mal 200 Millimetern fest vorgegeben. Die Bauhöhe resultiert aus den jeweils größten übereinanderliegenden Komponenten.

Komponente	Bauhöhe
RFID-Antennen	8,0 mm
Abstandhalter der Antennen	2,0 mm
Modulplatine	1,5 mm
Elektrische Verbindungen zur den Sensorplatinen	8,0 mm
Sensorplatine	1,5 mm
Komponenten der Sensorplatinen	10,0 mm

Kumuliert ergibt sich eine minimale Bauhöhe von 31 Millimetern. Zu dieser ist ein Abstand der Leuchtdioden zur Moduloberfläche einzurechnen. Diese Weite ergibt sich aus den Öffnungswinkeln der Leuchtdioden, da eine gleichmäßige Ausleuchtung der Moduloberfläche bei einem zu geringen Abstand nicht gewährleistet ist. 50 Millimeter dürfen aber nicht überschritten werden, da dies die vorgegebene maximale Distanz der Berührungserkennung und Objektidentifikation ist.

Platinenlayout

Den Vorgaben dieses Kapitels entsprechend wird die Modulplatine gelayoutet. Auf der Modulvorderseite werden vier Kupferflächen (vgl. Grafik 3.11) möglichst von Leiterbahnen unangetastet gelassen, um diese als Sensorelektroden der Berührungserkennung zu nutzen. Wobei diese um weitere Sensorfläche erweitert werden müssen, um die erforderliche Reichweite von fünf Zentimetern zu erreichen. Die Atmel CPU wurde im Zentrum der Modulhauptplatine, die Spannungsversorgung am den rechten und linken Rand aufgebracht.

Auch wurde die Entscheidung getroffen, mit Ausnahme der LED-Treiberbausteine, alle Komponenten auf der Rückseite anzubringen. Dies soll Schattenwurf entgegenwirken, der sich auf der Segmentoberfläche abzeichnen könnte.

Die Hauptplatine stellt sowohl Bohrungen als auch elektrische Verbindungen bereit, um die Sensorplatinen auf der Rückseite aufnehmen zu können. Hierbei wurden die Anschlüsse der Platinen deckungsgleich angebracht, so dass ein aufstecken der Sensorplatinen genügt um diese mit der Modulhauptplatine zu verbinden. Dies macht Anschlusskabel überflüssig.

In Grafik 3.11 und 3.12 sind die Vorder- und Rückseite des fertigen Modulplatinenlayouts zu sehen.

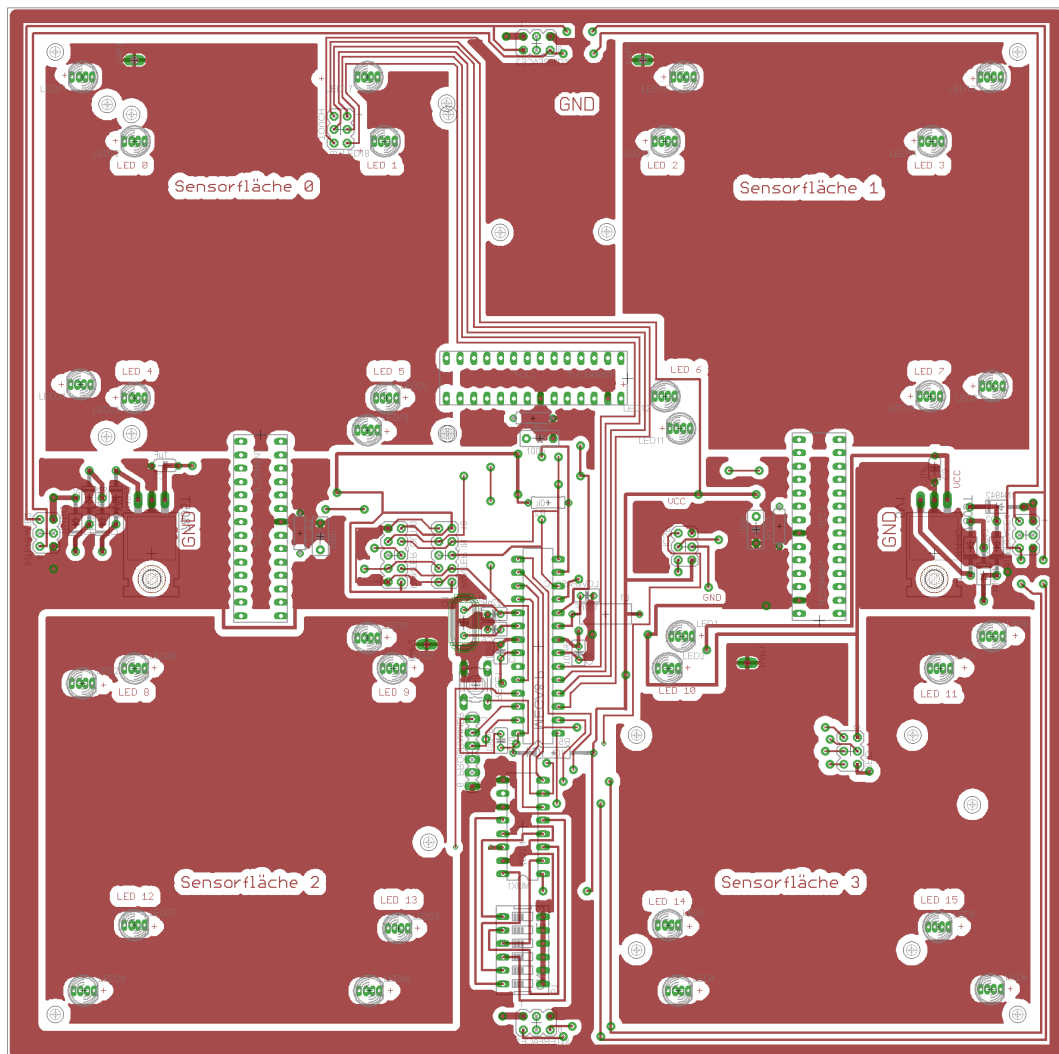


Abbildung 3.11: Mainboardlayout Toplayer

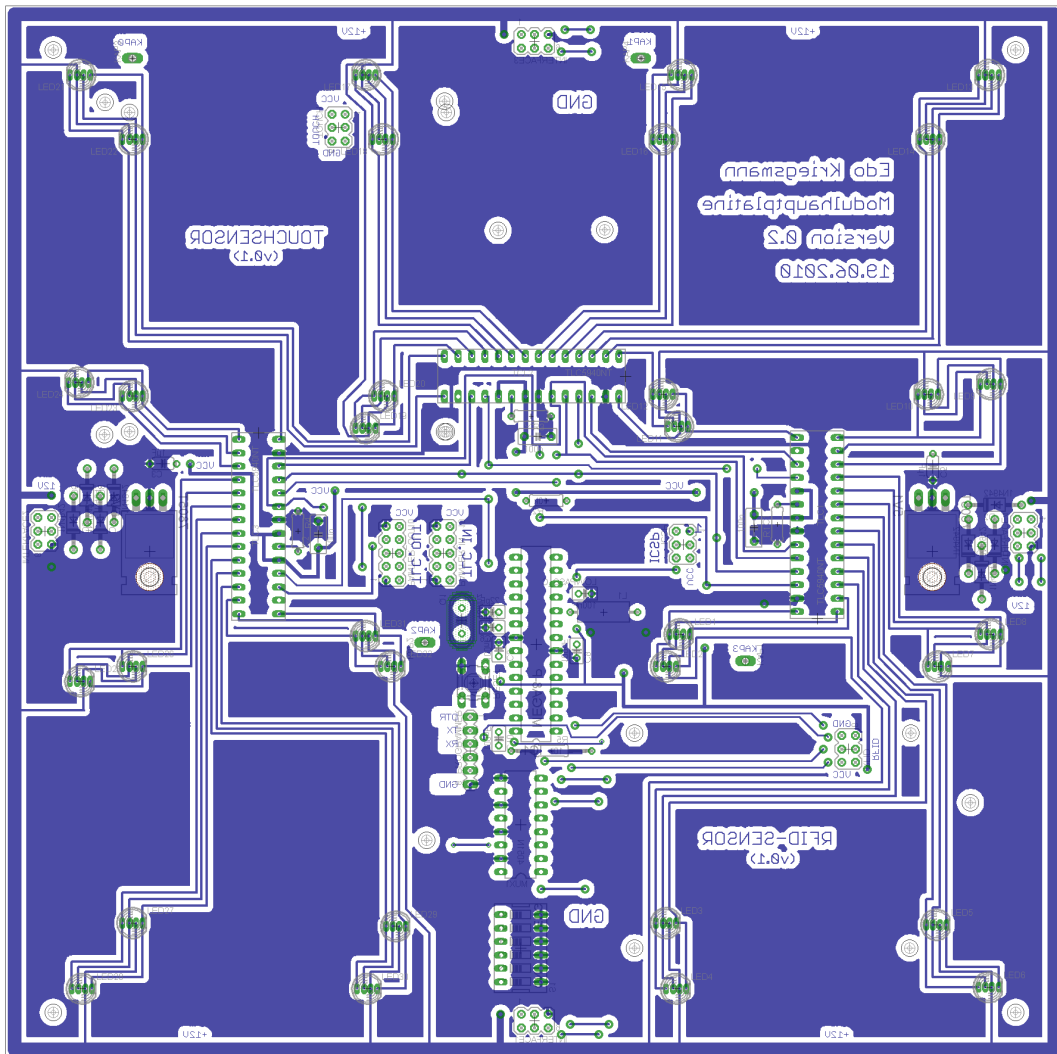


Abbildung 3.12: Mainboardlayout Bottomlayer

3.3.2 Sensorikplatine zur Berührungserkennung

Wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, wird die Sensorelektronik zur Berührungserkennung auf einer gesonderten Platine untergebracht. Der Aufbau basiert auf der im Kapitel 2.1.2 beschriebenen Sensortechnik und dem hierzu erstellten Prototypen. Zur Sensorschaltung werden auch Potentiometer und Kontrolleuchten zur Kalibrierung der Empfindlichkeit angebracht (Grafik 3.15 A-E/5). Ebenfalls auf der Sensorplatine aufgebracht sind die in Kapitel 2.1.2 beschriebenen RC-Tiefpässe (Grafik 3.15 A-E/6), die die Ausgangssignale für die Modulsteuerung filtern.

3.3.3 Sensorikplatine zur Objektidentifizierung

Die Schaltung zur Objektidentifizierung wird (vgl. Abschnitt 3.2.1) auf einer getrennten Platine untergebracht. Auf dieser befinden sich alle Bauteile um den ID-2-Reader zu betreiben und die vier Antennen an diesen anzubinden. Zur Statusanzeige ist eine Leuchtdiode untergebracht, welche das erfolgreiche Erkennen eines Transponders signalisiert. Da der im Kapitel 2.2.3 beschriebene Multiplexer bis zur Abgabe dieser Ausarbeitung nicht eintraf, wird mit nur einer Antenne gearbeitet. Sowohl auf Seiten der Soft- als auch Hardware werden alle Vorbereitungen getroffen, diesen Misstand mit Eintreffen des Multiplexers zu beheben.

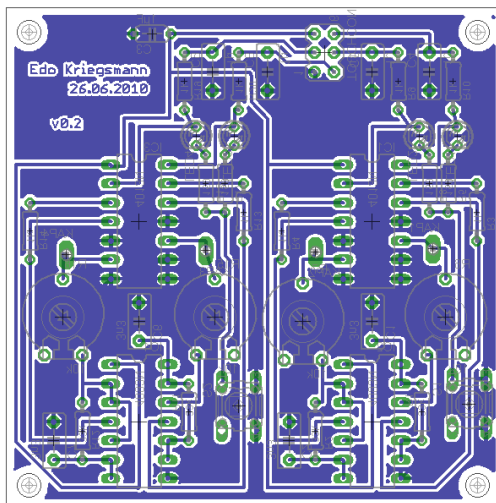


Abbildung 3.13: Layout Touchsensor

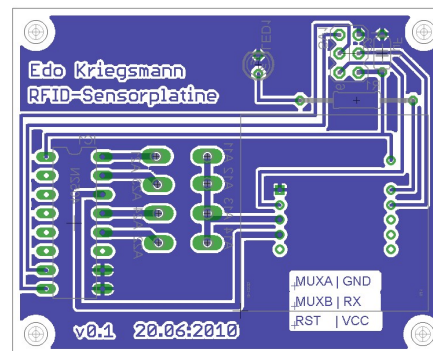


Abbildung 3.14: Layout RFID

(Platinen in Originalgröße abgebildet und zur besseren Lesbarkeit gespiegelt.)

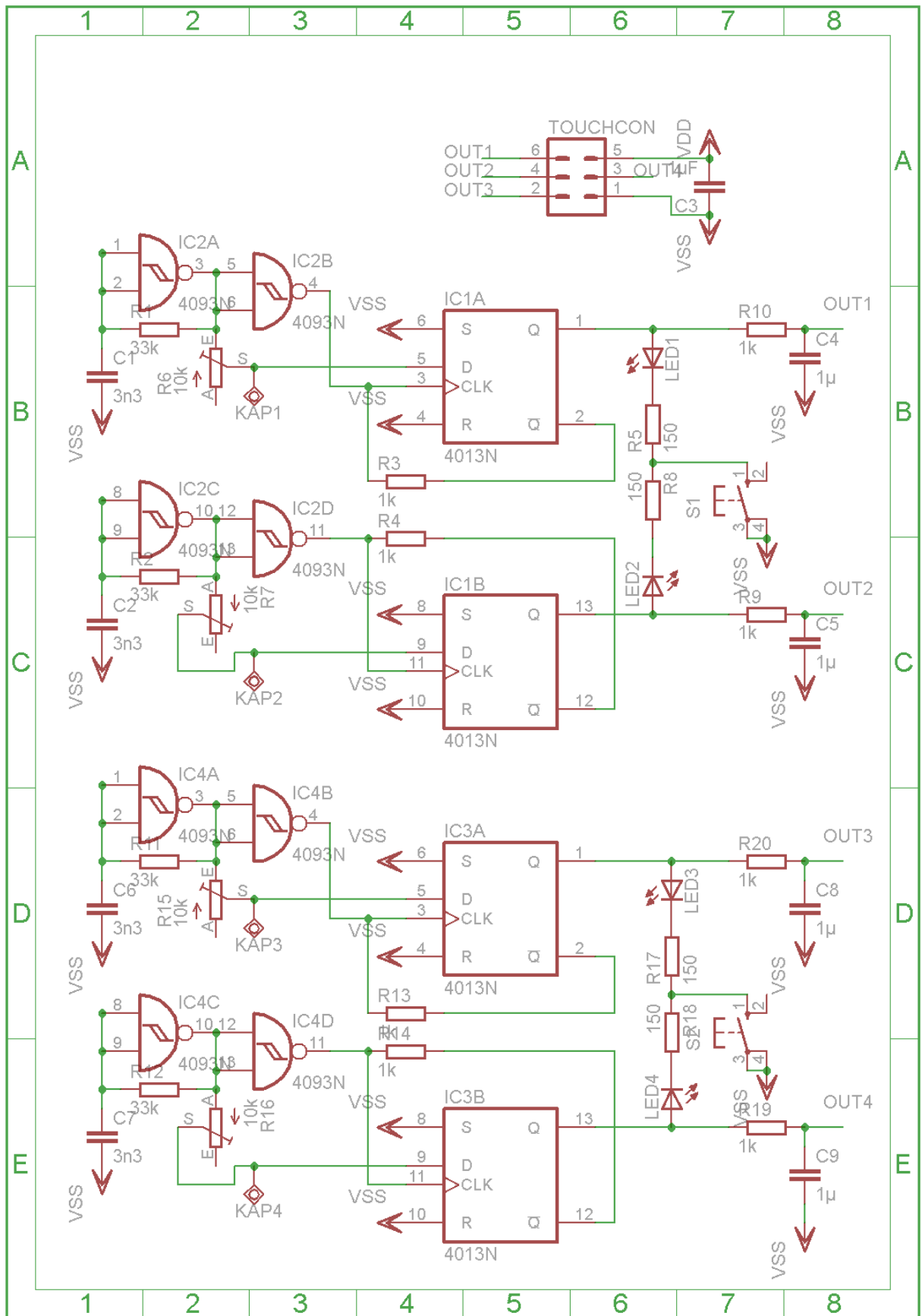


Abbildung 3.15: Schaltplan der 4 kapazitiven Sensoren

Anforderungen an das Antennendesign

Laut Datenblatt des ID-2 Readers (vgl. [ID-Innovations, 2010](#)) werden folgende Anforderungen an das Antennendesign gestellt.

	Dimensionierung
Induktivität	1.08 μH
Kondensatorkapazität	1,5nF
Maximale Spulengröße	15cm x 15cm

Auch angegeben ist, dass dies mit einem Spulendurchmesser von 12cm bei 63 Wicklungen zu erreichen ist. (vgl. [ID-Innovations, 2010](#), Seite 6)

Antennendesign

Mit maschinell hergestellten Luftspulen des Lieferanten Pollin (vgl. [Pollin, 2010](#)) lassen sich keine brauchbaren Ergebnisse erzielen, da die Anforderung an die Induktivität mit 1,62 mH nicht exakt eingehalten ist. So konnte lediglich eine Reichweite zur Erkennung der Transponder von wenigen Zentimetern erreicht werden.

Um diese Reichweite zur Transpondererkennung zu optimieren ist es notwendig qualitativ hochwertigere Spulen einzusetzen. Das Hauptplatinendesign erlaubt den Einsatz einer quadratischen Spule mit einer Kantenlänge von bis zu acht Zentimetern.



Abbildung 3.16: Ringkern-Rechner 1.2

Um aus dieser gewünschten Spulengröße und der erforderlichen Induktivität von $1.08 \mu\text{H}$ die Drahtstärke und der Anzahl Wicklungen zu ermitteln wird die Software "Ringkern-Rechner 1.2" eingesetzt. Als Basis zur Berechnung dieser Daten benötigt die Software die Induktivität, den Durchmesser der Spule und deren gewünschte Höhe. Bei einer Quadratischen Spule ist der Umfang zum Kreisdurchmesser umzurechnen. Dies ergibt bei einer Kantenlänge von acht Zentimetern einen Durchmesser von 102 Millimeter. Als Spulenhöhe werden acht Millimeter angesetzt.

$$d = (a * 4) / \pi$$

$$d = (80\text{mm} * 4) / \pi = 102\text{mm}$$

Die Berechnung ergab, dass eine Anzahl von exakt 70 Windungen bei einem maximalen Drahtdurchmesser von 0,114 Millimetern (siehe Grafik 3.16) zu dem gewünschten Ergebnis führt. Die erforderliche Drahtlänge wird mit rund 22,5 Metern angegeben. Bei vier Antennen pro Modul werden rund 90 Meter Kupferlackdraht benötigt.

Ein Nachrechnen der im Datenblatt empfohlenen Werte von 63 Windungen bei 120 Millimeter Spulendurchmesser bestätigte diese Angaben der Software (siehe Grafik 3.17).



Abbildung 3.17: Ringkern-Rechner 1.2

Um eine hohe Güte der Antennen zu gewährleisten, wurde ein Adapter erstellt, auf dem die Antennen präzise gewickelt werden können. So konnten die errechneten Antennenmaße exakt eingehalten werden. Auch hätte es dieser Adapter erlaubt, die nicht für kernlose Spulen ausgelegte Antennenwickelmaschine zu nutzen, welche der HAW zur Verfügung steht. Diese Maschine wurde jedoch außer Betrieb genommen.

3.3.4 Steuergerät

Das Steuergerät verbindet, wie im Schaubild 2.23 zu sehen, den PC mit der Modulkaskade. Hierzu werden die in Kapitel 2.6 beschriebenen Komponenten in einem Aluminiumgehäuse (Grafik 3.18) zusammengefasst.

Beim diesem Steuergerät handelt es sich um einen Prototypen, welcher lediglich die Möglichkeiten zur Ansteuerung der Module demonstrieren soll. Auch die Tatsache, dass ein Arduino Mega die Basis des Steuergeräts bildet, unterstreicht das Prototypenstadium.



Abbildung 3.18: Steuergerät

Alternativ bietet die Modulhauptplatine die Möglichkeit, die Grundkomponenten des Steuergeräts direkt auf dieser aufzubringen. Hierzu zählen der Arduino MEGA und das darauf aufbauende Ethernet-Shield. Nachteilig ist sowohl die fehlende Konfigurationsmöglichkeit über die Menüsteuerung als auch eine erhöhte Bauhöhe. Dafür spricht aber der Aufbau der Modulkaskade "aus einem Guss", ohne externe Komponenten verbinden zu müssen.

Die folgende 3D-generierte Grafik 3.19 zeigt diese Aufbaumöglichkeit auf der Modulhauptplatine.

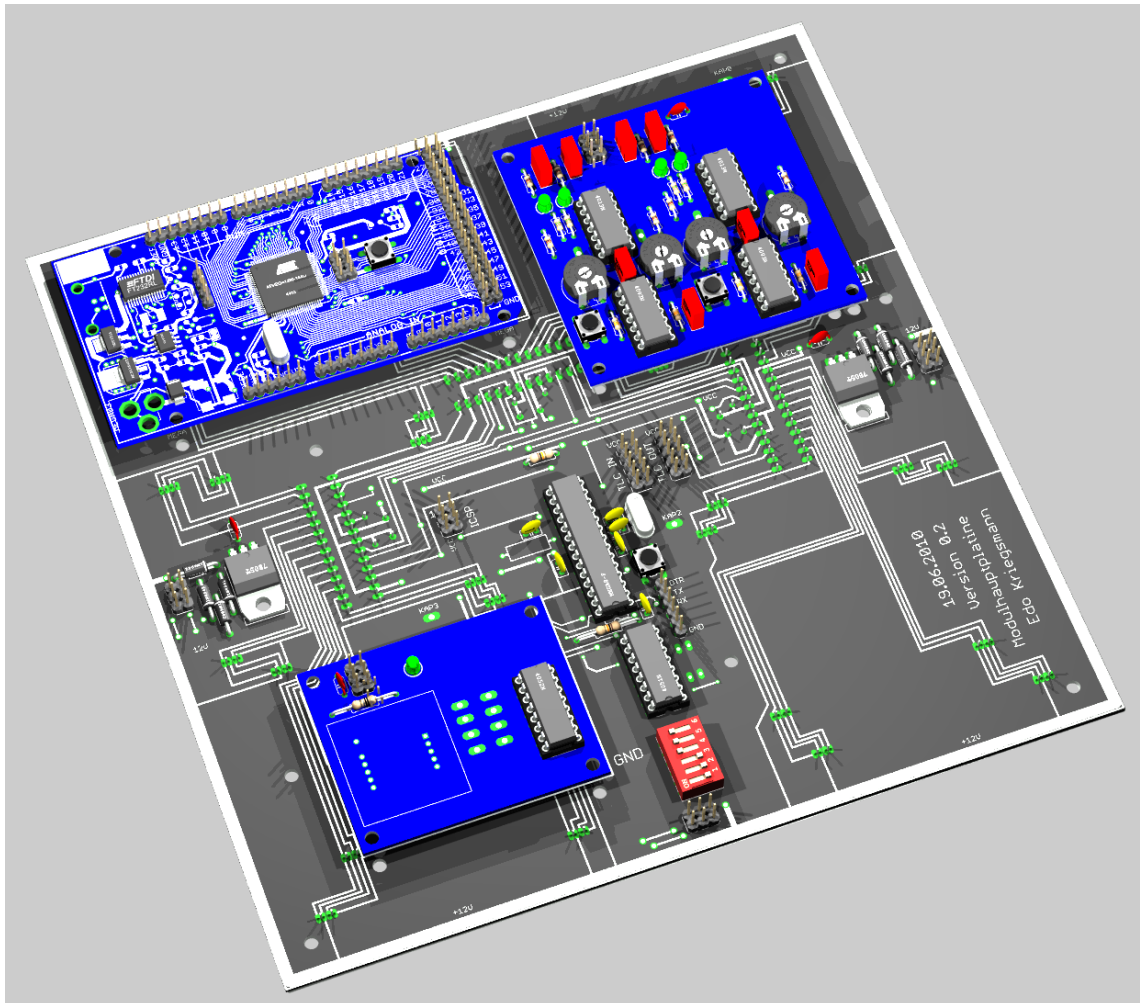


Abbildung 3.19: Modulhauptplatine mit Steuergerät

3.4 Softwaredesign

Der folgende Abschnitt befasst sich mit dem Design der Software, die für den Betrieb der Module notwendig ist. Zu diesen Programmen gehören die Firmware auf dem Modul, dem Steuergerät und einer PC basierenden Software zur externen Kontrolle des Steuergerätes.

Es wird auf die relevanten Abschnitte dieser Programme eingegangen und deren Ablauf erläutert. Der vollständige Programmcode ist im Anhang angefügt.

3.4.1 Software zur Modulsteuerung

Zur modulinternen Steuerung ist eine auf dem Atmel ATmega 328 lauffähige Software zu entwickeln. Die relevanten Abschnitte dieser Software werden in folgender Sektion beschrieben.

Schalter zur Wahl der Modul-ID

Aus der Verbindung des Multiplexers an den Wahlschalter resultiert die softwareseitige Nummerierung dieser Bauteile. Das Mapping der IDs übernimmt die Software anhand einer im Programmcode fixierten Wertetabelle.

ID-Schalter Nr.:	0	1	2	3	4	5	6	7
Multiplexer Nr.:	3	0	1	2	4	6	7	5

Leuchtdioden

Aufgrund der hardwareseitigen Anbindung der Leuchtdioden an die LED-Treiber, kommt es zu einer auf den ersten Blick willkürlichen Nummerierung der LEDs. Um eine eingängige Adressierung der Leuchtdioden gemäß Grafik 3.20 zu ermöglichen, ist in der Modulsoftware folgendes Mapping vorzunehmen. Auch dieses wird in einer Wertetabelle in der Modulsoftware abgelegt.

Hardware ID	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Software ID	10	8	7	6	11	9	5	4	3	15	0	3	13	14	1	2

I2C-Datenübertragung

Die Annahme der Aktordaten und das Senden der Sensordaten erfolgt eventbasiert. Sobald das Steuergerät einen Sensordatensatz anfragt, wird in der Modulsteuerung eine Routine zum Senden dieser Daten gestartet. Das Empfangen der aktualisierten Aktordaten erfolgt analog hierzu.

RFID

Sobald der ID-2-Reader ein Tag erkannt hat, sendet dieser die ID-Informationen über die RS232-Schnittstelle zum Mikrocontroller. Hier werden die Daten im Zwischenspeicher der Hardware UART-Schnittstelle gesichert. Die Modulsoftware generiert aus diesen Daten eine Prüfsumme, mit deren Hilfe die empfangene ID auf Konsistenz getestet wird. Ist dieser Test erfolgreich, können die ID-Daten weiter verarbeitet werden.

Um zu erfassen, ob sich der Transponder weiterhin auf der Oberfläche befindet, muss der ID-2-Reader gezielt zurückgesetzt werden. Hierzu stellt der Reader einen LOW-aktiven Resetpin zur Verfügung, der zum Zurücksetzen des Moduls eine kurze Zeit auf Masse gezogen wird. Sollte sich der Transponder weiterhin im Empfangsbereich befinden, sendet der Reader erneut die ID über die serielle Schnittstelle.

Die Transponder-ID wird im Speicher gesichert. Aus der Speicherposition lässt sich ermitteln auf welcher Sensorfläche sich der Transponder befindet.

Touchsensor

Die Erfassung der Touchsensordaten erfolgt in festen Abständen von rund 50ms. Hierzu werden die Sensoreingänge über die A/D-Wandler ausgelesen und die Daten im Speicher des Moduls abgelegt. So liegen die Sensordaten jederzeit für die Weiterverarbeitung und die Übertragung bereit ohne vorher ausgelesen werden zu müssen.

Fehlerzustände

Aufgrund der fest installierten Komponenten auf der Modulplatine kann es lediglich zu Fehlern in der I2C-Übertragung kommen. Diese können durch den Einsatz von Software erkannt und deren Folgen minimiert werden.

Bei jeder sendenden und empfangenden I2C-Übertragung wird deren Zeit gesichert. Bei Unterbrechung der I2C-Übertragung kann nach einem Timeout ein Fehlerzustand aktiviert werden, um das Modul stets in einem definierten Zustand zu halten. Sobald dieser Zeitstempel durch eine erfolgreiche Übertragung aktualisiert wird, geht die Software wieder in den regulären Betriebszustand über.

3.4.2 Software auf dem Steuergerät

Die Software auf dem Steuergerät übernimmt die zentrale Koordination aller angeschlossener Module. Um sowohl einen extern gesteuerten als auch einen eigenständigen Betrieb der Module zu ermöglichen, ist es erforderlich unterschiedliche Betriebsmodi in der Software zu implementieren.

Ein Fehlerhandlungssystem wird in jedem Betriebszustand integriert, um die im Kapitel [3.4.2](#) beschriebenen Fehler bestmöglich zu unterbinden.

Direkte Übertragung

Das Steuergerät dient ausschließlich als Übersetzer zwischen dem Ethernet und dem I2C Bussystem. Es werden keine Daten im Steuergerät gespeichert oder manipuliert.

Vorteile: Keine unnötige Datenlast auf dem Bussystem.

Nachteile: Bei jeder Ethernetübertragung wird auch die Latenzzeit der I2C-Verbindung addiert. Dies kostet Zeit bei der Übertragung der Daten.

Gepufferte Übertragung

Das Steuergerät aktualisiert in festen Abständen die Daten der Module und speichert diese im eigenen Speicher zwischen. Hierzu werden alle angeschlossenen Module ermittelt und deren Sensordaten abgefragt. Sollten über Ethernet aktualisierte LED-Daten im Speicher vorhanden sein, werden diese zeitgleich auf die Module übertragen. Die Ethernetverbindung greift asynchron auf die im Speicher des Steuergeräts liegenden Sensordaten zu oder schreibt neue Aktordaten in diesen Speicher.

Vorteile: Schnelle TCP-Übertragung der Daten ohne die Latenzzeit der I2C-Übertragung.

Nachteile: Geringe Zeitverzögerung in der Übermittlung der Moduldaten, welche durch das Zwischenspeichern der Daten entsteht.

Stand-alone-Betrieb

Im letzten Betriebszustand erfolgt keine Steuerung der Module über die Ethernetschnittstelle. Hierbei agiert es seitens der I2C-Übertragung wie die "Gepufferte Übertragung", jedoch manipuliert es die im Speicher liegenden Daten eigenständig und übernimmt so die Kontrolle der Module.

Vorteile: Keine Zeitverzögerung durch die Ethernetübertragung

Nachteile: Ausschließlich auf dem Mikrokontroller gespeicherte Programme sind abrufbar.

Konfiguration des Steuergeräts

Zur Konfiguration des Steuergeräts wird an dieses eine displaybasierte Menüsteuerung eingebaut. Festgelegt wurde dieser Aufbau in der Analyse und ist der Hardwaresektion auf Grafik 3.18 zu sehen. Die Menüsteuerung erlaubt es, die relevanten Einstellungen oder den Betriebszustand des Steuergeräts zu verändern.

Auch ein Abrufen der Basiskonfiguration wie die IP-Adresse und der Port des Ethernet-Servers des Steuergeräts sind möglich.

Fehlerzustände

Durch mögliche Störungen in der Datenübertragung sowohl auf der Ethernet als auch auf der I2C-Bussystemseite muss die Software mit einem Fehlerhandling ausgestattet werden. Zudem könnte eine Hot-Swap-Fähigkeit integriert werden. Dies ist die Fähigkeit, die Modulkaskade während des Betriebs um Module zu reduzieren oder zu erweitern, ohne den laufenden Betrieb zu stören. Dies darf ebenfalls nicht zum Absturz des Systems führen.

Auf Seiten der Ethernet-Schnittstelle ergeben sich folgende Fehlerquellen:

- Ziehen des Netzkabels
- Softwareseitige Unterbrechung des Datenstroms
- Nichteinhaltung des Dateninterfaceformats
- Ansprechen nicht vorhandener Kommandos oder Modul-IDs

Auf Seiten der Datenübertragung über das I2C-Bussystem zu den Modulen könnten folgende Fehlerzustände eintreffen:

- Entfernen eines Clients
- Entfernen aller I2C Busteilnehmer
- Formatfehler in der Datenübertragung
- Nicht vorhandene Kommandos oder Modul-IDs

3.4.3 PC-Steuerungssoftware

Eine einfache Software zur Steuerung der Module in JAVA zeigt die Möglichkeiten der externen Steuerung. Die Software zur Funktionsdemonstration fragt die Sensordaten der angebundenen Module ab und spricht bei Erkennung einer Berührung die korrespondierenden Leuchtdioden an.

3.5 Interface

Um eine Kommunikation der Komponenten über die gewählten Bussysteme zu ermöglichen, ist es erforderlich die zu übertragenden Daten einem festen Schema zuzuordnen. Diese Interfacedefinition muss sowohl für die Datenübertragung des I2C- des Ethernet-, als auch des modulinteren Bussystems erfolgen. Nur durch definierte Schnittstellen untereinander ist eine Kommunikation möglich, da ansonsten ein Datenchaos jegliche Datenübertragung unmöglich macht. Auch für ein Zugriff auf die Module zur Nutzung dieses Systems in anderen Projekten wie dem "Living Place", ist die Offenlegung der Datenwege essentiell.

Zu dieser definierten Datenübertragung ist eine einheitliche Adressierung der Module und der Modulkomponenten erforderlich, welche ebenfalls in diesem Kapitel festgelegt wird.

Auch die Anbindung der Bauelemente und Busverbindungen des Moduls wird in diesem Abschnitt den Anschlüssen des des Mikrokontrollers zugeordnet.

Alle Zahlenangaben dieses Abschnittes liegen in dezimaler Form vor.

3.5.1 Adressierung

Auf Seiten des Moduls erfolgt die Wahl der ID über den aufgebrachten ID-Wahlschalter mit den IDs 0 bis 35. Die Adressierung über den I2C-Bus erfolgt abweichend dazu mit den IDs 4 bis 39. Dies ist bedingt durch Adressbereiche im I2C-Bussystem, welche nicht frei vergeben werden dürfen - hierzu zählen die IDs null bis drei. Die auf dem Modul durch den Modulwahlschalter eingestellte ID wird statisch von 0 bis 35 auf die I2C-Adressen 4 bis 39 abgebildet.

Wichtig bei der Zuweisung der Ethernet-IDs zu den Modul-IDs: Diese erfolgt nicht statisch, sondern durch automatische, dynamische Adressierung über das Steuergerät. Hierbei erhält die kleinste am Steuergerät angeschlossene Modul-ID die Ethernet-ID "0" - die nächstgrößere Modul-ID erhält die Ethernet-ID "1". Dies setzt sich fort bis alle 36 Modul-IDs vergeben sind und sich ein Ethernet-Adressbereich von 0 bis 35 ergibt.

Die Adressierung der Leuchtdioden erfolgt nach dem Schema gemäß Grafik 3.20. Die Sensoradressierung, sowohl der Berührungs- als auch der RFID-Sensoren, erfolgt nach Grafik 3.21.

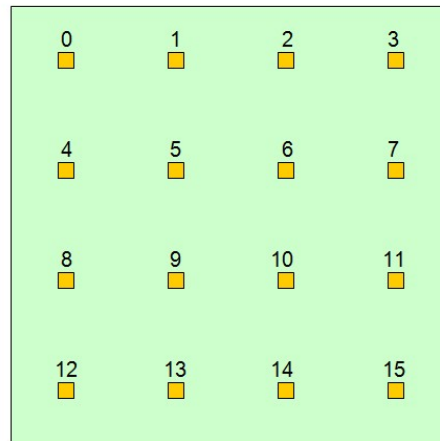


Abbildung 3.20: Adressierung der Leuchtdioden

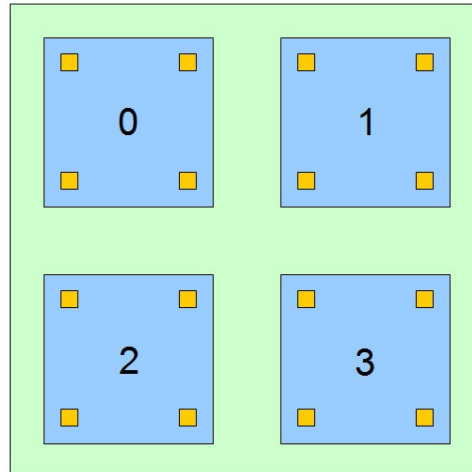


Abbildung 3.21: Adressierung der Sensoren

3.5.2 Mikrocontrollerverbindungen

Die Zuordnung der Komponenten an der Mikrocontroller resultiert aus dem Platinendesign und den vorgegebenen Komponentenspezifikationen. Entscheidend sind diese Informationen sowohl für das Softwaredesign, das Debuggen der Modulplatine als auch den eventuellen Nachbau des Moduls.

Als Schaltplan aufbereitet sind diese Busverbindungen in Grafik 3.22 zu sehen.

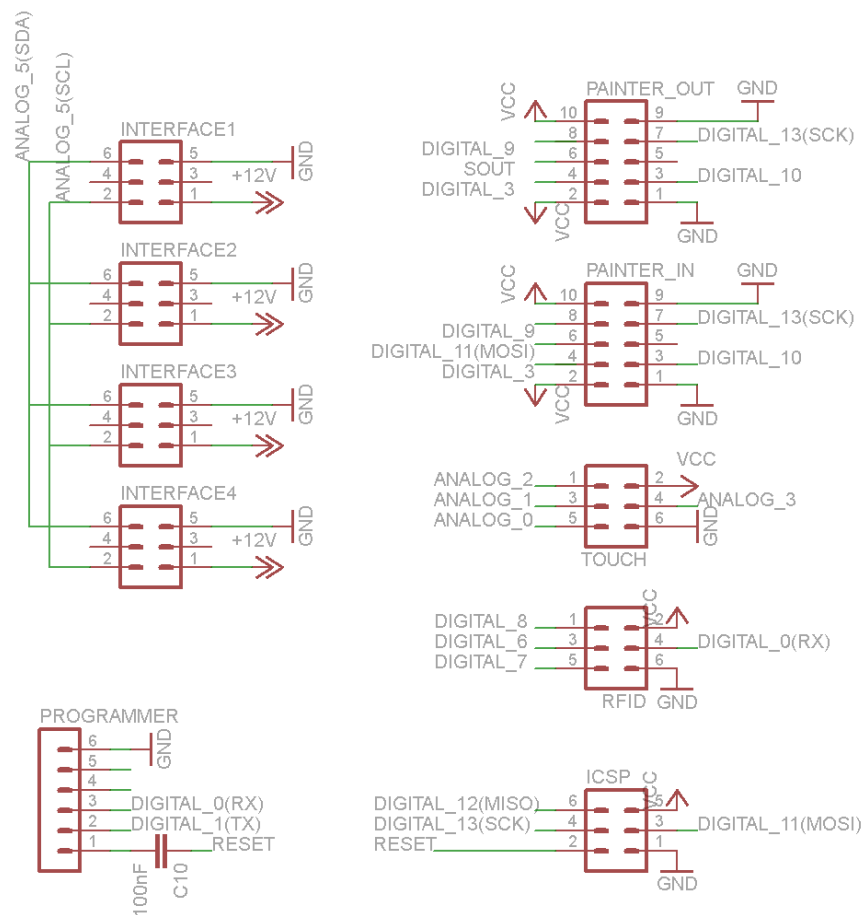


Abbildung 3.22: Busverbindungen des Moduls

Eine komplette Übersicht dieser Verbindungen ist im Anhang auf Seite 93 zu finden.

3.5.3 I2C Interface zur Modulkommunikation

Dieser Teil beschreibt das Interface auf Seiten des I2C-Bussystems unter den Modulen und dem Modulsteuergerät.

Abfragen der Sensordaten vom Modul.

Nach dem Aufbau der I2C-Verbindung mit der entsprechenden I2C-ID - diese wurde softwareseitig auf den Wertebereich von 4 bis 39 beschränkt (vgl. Abschnitt 3.5.1) - sendet das Modul folgende Sensorinformationen.

	Information	kleinster Wert	größter Wert
Byte 1, Bit 1 (LSB)	Touchsensor 1	0	1
Byte 1, Bit 2	Touchsensor 2	0	1
Byte 1, Bit 3	Touchsensor 3	0	1
Byte 1, Bit 4	Touchsensor 4	0	1
Byte 1, Bit 5-8	Keine Verwendung	0	0
Byte 2-6	RFID-Sensor 1	0	255
Byte 7-11	RFID-Sensor 2	0	255
Byte 12-16	RFID-Sensor 3	0	255
Byte 17-21	RFID-Sensor 4	0	255

Zur Reduzierung der Datenlast werden die Informationen der vier Berührungssensoren in einem Byte untergebracht. Die Einzelinformationen lassen sich durch Bitmasken oder durch Herausshiften der Bits wieder extrahieren. Auch die hexadezimale Interpretation des ersten Nibble des ersten Bytes ist möglich. In folgendem Quellcodebeispiel ist sowohl die Datenübertragung als auch das Extrahieren der Touchinformation zu sehen.

Listing 3.1: Quellcode zum Abfragen der Sensordaten

```

1 Wire.requestFrom( modul_id , 21);

3 byte touch = Wire.receive();
  for(int nr = 0; nr < TOUCH_MODULES; nr++)
5     modul[modul_id].touch_memory[nr] = (((touch & (1 << nr))>0)?1:0);

7   for(int sensor_nr = 0; sensor_nr < RFID_MODULES; sensor_nr++)
     for(int id = 0; id < RFID_ID_LENGTH; id++)
9       modul[modul_id].rfid_memory[sensor_nr][id] = Wire.receive();

```

Setzen der Aktordaten im Modul.

Nach dem Aufbau der sendenden I2C-Verbindung des Bussystemmasters erwartet das Modul folgende 48 Byte an Aktorinformationen.

	Information	kleinster Wert	größter Wert
Byte 1	LED 1 - Helligkeit ROT	0	255
Byte 2	LED 1 - Helligkeit BLAU	0	255
Byte 3	LED 1 - Helligkeit GRÜN	0	255
Byte 4	LED 2 - Helligkeit ROT	0	255
...
Byte 48	LED 16 - Helligkeit GRÜN	0	255

Eine I2C-Verbindung zum Übertragen der Aktordaten erfolgt analog zu nachfolgenden Quellcodebeispiel.

Listing 3.2: Quellcode zum Setzen von Aktordaten

```
Wire.beginTransmission( modul_id );  
2  
for(int lednr = 0; lednr < LED_MODULES; lednr++)  
4     for(int color = 0; color < COLORS; color++)  
        Wire.send( led[lednr][color] );  
6  
Wire.endTransmission();
```

Die Interpretation der Werte erfolgt in Abschnitt [3.5.5](#).

3.5.4 TCP-Interface zur Modulkommunikation

Um eine externe Steuerung über die TCP-Schnittstelle zu ermöglichen, wurde ein Interface definiert, welches im folgenden Abschnitt spezifiziert wird. Dies erlaubt das Ansprechen des Steuergeräts über die Ethernet Schnittstelle. Eine solche Übertragung beginnt grundsätzlich mit einem Kommando-Byte, welches die Art der Datenübertragung definiert. Dies bewirkt das Starten einer passenden Routine im Steuergerät, welche dann mit einer Datenübertragung antwortet, oder weitere Daten einfordert.

Kommando zum Steuergerät zum Herstellen der Verbindung: 111

Erwarteter Rückgabewert vom Steuergerät ist nun ein Handshake-Byte, welches den erfolgreichen Verbindungsaufbau anzeigt.

	Information	Wert
Byte 1	Handshake OK	111

Dieser Verbindungsaufbau wird vereinfacht im folgenden Quellcode verdeutlicht (siehe Listing 3.3). Die Nutzung der weiteren Kommandos erfolgt analog zu diesem Beispiel.

Listing 3.3: Quellcode einers TCP-Verbindungsaufbaus

```
1 void connect() throws IOException {
    String ip = "192.168.2.222";
3    int port = 80;

5    java.net.Socket socket = new java.net.Socket(ip, port);

7    Ethernet_out printWriter = new PrintWriter(
        new OutputStreamWriter( socket.getOutputStream()));
9
    Ethernet_in bufferedReader = new BufferedReader(
11    new InputStreamReader( socket.getInputStream()));

13    Ethernet_out.write(111);
    Ethernet_out.flush();

15
    char rcv_buffer[] = new char[1];
17    Ethernet_in.read(rcv_buffer, 0, 1);

19    if ((int) rcv_buffer[0] == 111) System.out.println("Handshake_OK!");
    else System.out.println("_ERROR!");
21 }
```


Kommando zum Modul zum Abfragen der Sensordaten: 10

Nach Senden dieses Kommandos erwartet das Steuergerät die anzusprechende Modulnummer.

	Information	kleinster gültiger Wert	größter gültiger Wert
Byte 1	Modulnummer	0	35

Erwartete Rückgabewerte vom Steuergerät sind nun 24 Byte Sensordaten und ein abschließendes "ENDE-BYTE".

	Information	kleinster Wert	größter Wert
Byte 1	Touchsensor 1	0	1
Byte 2	Touchsensor 2	0	1
Byte 3	Touchsensor 3	0	1
Byte 4	Touchsensor 4	0	1
Byte 5-9	RFID-Sensor 1	0	255
Byte 10-14	RFID-Sensor 2	0	255
Byte 15-19	RFID-Sensor 3	0	255
Byte 20-24	RFID-Sensor 4	0	255
Byte 25	ENDE-BYTE	111	111

Bei Senden einer nicht vorhandenen Modulnummer antwortet das Steuergerät mit folgendem Fehlercode:

	Information	Wert
Byte 1	Fehlercode	222

Kommando zum Steuergerät zum Setzen der Leuchtdioden: 30

Nach dem Senden dieses Kommandos erwartet das Steuergerät die anzusprechende Modulnummer und die 48 Byte an RGB-LED-Helligkeitsinformationen.

	Information	kleinster Wert	größter Wert
Byte 1	Modulnummer	0	35
Byte 2	LED 1 - Helligkeit ROT	0	255
Byte 3	LED 1 - Helligkeit BLAU	0	255
Byte 4	LED 1 - Helligkeit GRÜN	0	255
Byte 5	LED 2 - Helligkeit ROT	0	255
...
Byte 49	LED 16 - Helligkeit GRÜN	0	255

Auch hier antwortet das Steuergerät bei nichtvorhandensein der Modulnummer mit folgendem Fehlercode:

.	Information	Wert
Byte 1	Fehlercode	222

Die Interpretation der Werte erfolgt in Abschnitt [3.5.5](#).

3.5.5 Interpretation der Sensor- und Aktordaten

Dieser Teil der Interfacedefinition soll Aufschluss über die Interpretation der Sensor- und Aktordaten geben. Es werden festgelegt, welche Werte die Daten annehmen können und welche Bedeutung diese Information im System hat.

Bei den Sensordaten handelt es sich um die Rückgabewerte der Modulplatine. Der Touchsensor kann ausschließlich einen wahr oder falsch Wert zurückgeben, der durch null oder eins übermittelt wird. Bei der Objektidentifizierung werden fünf Byte übertragen, in denen die fünf ID-Teile mit Werten von 0 bis 255 übermittelt werden.

Sensordaten

	Wert	Bedeutung
Touchsensor	0	Sensor ist nicht aktiviert
Touchsensor	1	Sensor ist aktiviert
RFID-Sensor Byte 1	0-255	Transponder-ID Byte 1
RFID-Sensor Byte 2	0-255	Transponder-ID Byte 2
RFID-Sensor Byte 3	0-255	Transponder-ID Byte 3
RFID-Sensor Byte 4	0-255	Transponder-ID Byte 4
RFID-Sensor Byte 5	0-255	Transponder-ID Byte 5
RFID-Sensor Byte 1-5	2	RFID-Fehler
RFID-Sensor Byte 1-5	0	Kein Transponder gefunden

Die Aktordaten bestehen ausschließlich aus den Helligkeitswerten der RGB-Leuchtdioden. Hier sind Werte von 0 bis 255 vorgesehen, wobei 255 eine volle Ansteuerung der Leuchtdiode bewirkt.

Aktordaten

	Wert	Bedeutung
LED x - Helligkeit ROT	0-255	Helligkeit der roten Leuchtdiode Nr. x von 0 (0%) bis 255 (100%)
LED x - Helligkeit BLAU	0-255	Helligkeit der blauen Leuchtdiode Nr. x von 0 (0%) bis 255 (100%)
LED x - Helligkeit GRÜN	0-255	Helligkeit der grünen Leuchtdiode Nr. x von 0 (0%) bis 255 (100%)

3.6 Fertigung

Der abschließende Teil des Kapitels beschreibt die Fertigung der Modulplatinen.

3.6.1 3D-Simulation zur Validierung des Platinendesigns

Vor der Herstellung der Platinen wird das Design dieser durch eine 3D-Simulation und der Überprüfung dieser Grafiken validiert. Dies ermöglicht es Fehler in der Anordnung der Bauteile zu erkennen, welche durch die alleinige Betrachtung des Schaltplans nicht zu erkennen wären. Hierzu wurden die erstellten Platinenlayouts mit der Software Eagle3D in gerenderte Grafiken umgewandelt. Durch den einstellbaren Blickwinkel ließe sich jede Bauteilüberschneidung oder zu geringe Bauteildistanz erkennen. Gerade durch den teilmodularen Aufbau der Modulplatine ist es wichtig zu überprüfen, ob die Sensorplatinen und deren Verbindungselemente passgenau mit der Hauptplatine abschließen.

RFID-Sensorplatine

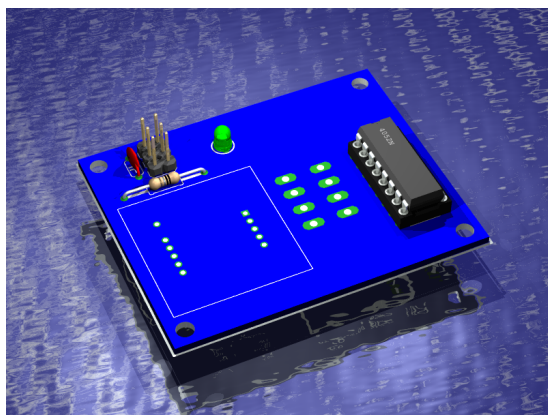


Abbildung 3.23: 3D RFID-Platine - Oben

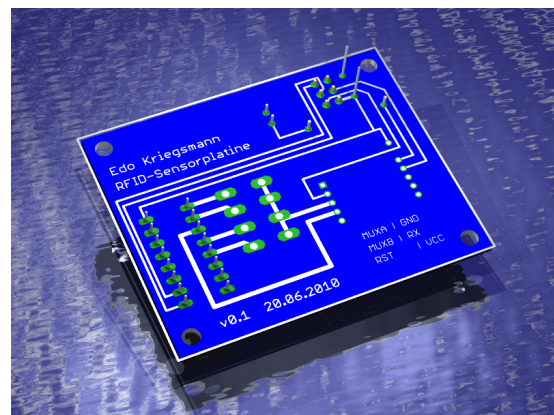


Abbildung 3.24: 3D RFID-Platine - Unten

Touch-Sensorplatine

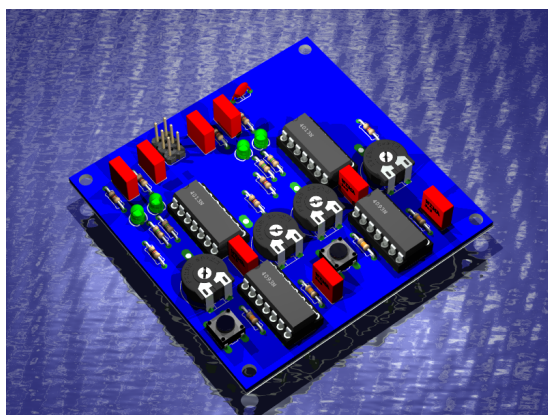


Abbildung 3.25: 3D Touch-Platine - Oben

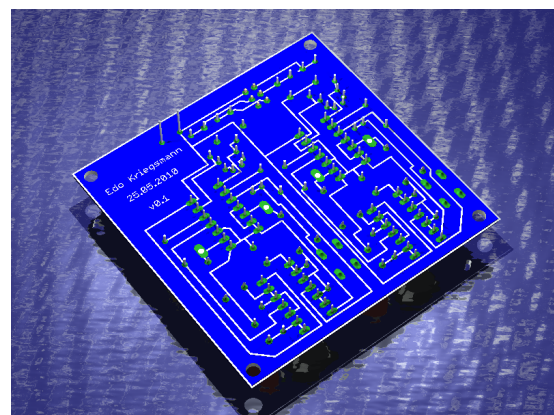


Abbildung 3.26: 3D Touch-Platine - Unten

Hauptplatine

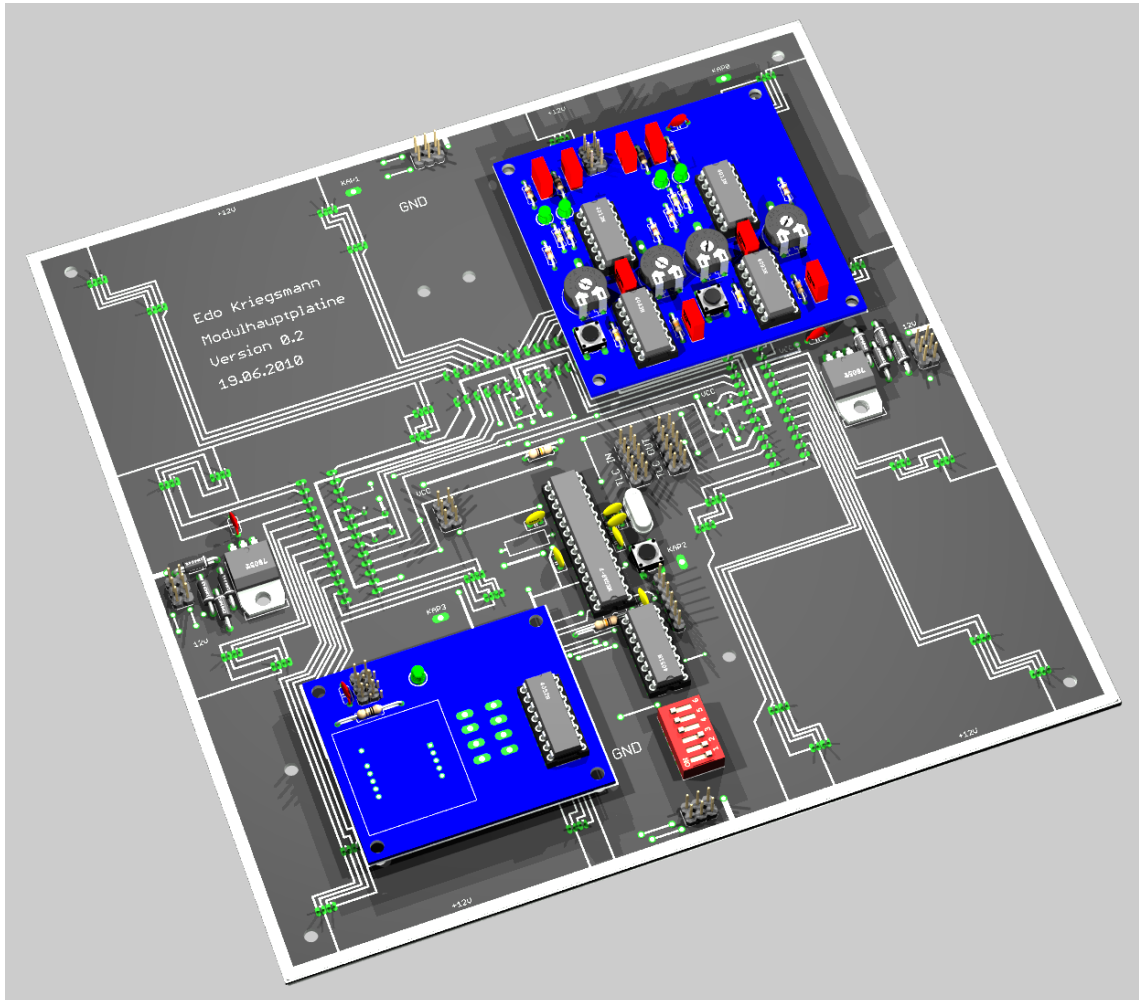


Abbildung 3.27: 3D-generiertes Mainboard mit bestückten Sensorplatinen

Fazit

Die 3D-Analyse hat sich als interessantes Instrument zur Validierung des Platinendesigns erwiesen. So konnten einige, wenn auch kleine Fehler im Platinendesign entdeckt werden. Hierzu zählten fehlerhaft gespiegelte Bauteile, die aus der Unübersichtlichkeit einer beidseitig bestückten Platine resultierten. Auch ein zu geringer Abstand zwischen zwei Modulkomponenten konnte so entdeckt und behoben werden.

Einer Herstellung der Platinen steht so nichts mehr im Weg. Dies übernimmt der Dienstleister Platinenbelichter.

3.6.2 Fertigung der Bauteile

Nach Herstellung der Platinen durch die Firma Platinenbelichter werden diese von Hand mit Bauteilen bestückt. Ein Beispiel einer fertig bestückten Platine, in diesem Fall die Sensorplatine zur Berührungserkennung, ist auf Grafik 3.28 zu sehen. Eine Bauteilliste befindet sich im Anhang der Bachelorarbeit.

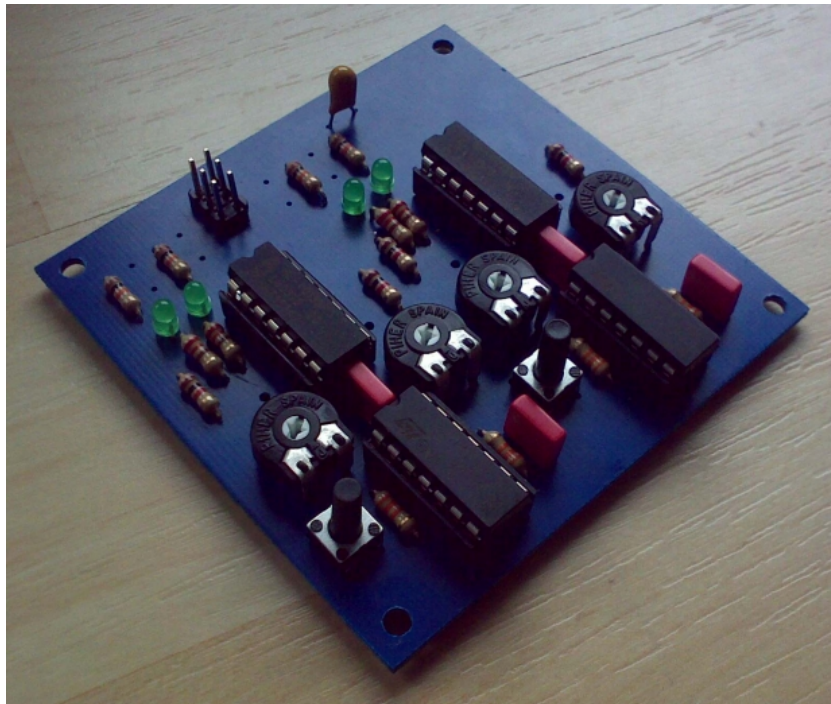


Abbildung 3.28: Bestückte Sensorplatine

4 Abschließende Betrachtung

Im letzten Abschnitt der Bachelorarbeit wird das erstellte System abschließend betrachtet und deren Funktion bewertet. Hierbei wird auf die einzelnen Punkte der Anforderungsanalyse eingegangen und etwaige Fehler beschrieben.

Der Abschließende Teil der Ausarbeitung ist den Erweiterungsmöglichkeiten des Moduls gewidmet. So werden mögliche Optionen zur Verbesserung des Systems aufgezeigt.

4.1 Fazit

Diese Bachelorarbeit beschreibt den Aufbau kaskadierbarer Modulplatinen, welche die Sensor- und Aktormöglichkeiten eines Wohnraums erweitern. So lassen sich beliebig große Flächen erstellen, welche sowohl Berührungen einer Person erfassen als auch Objekte und deren Position auf der Fläche ermitteln können. Das System kann diese Daten sowohl dazu nutzen, den Wohnraum benutzerspezifisch anzupassen, als auch ein direktes Feedback über rückwärtig angebrachte, mehrfarbige Leuchtsegmente zu geben.

Dieser Zielsetzung entsprechend konnten in der Analyse zu den gestellten Anforderungen passende Lösungen gefunden werden. Auch in der Realisierung zeigten sich kaum Probleme in der Umsetzung. Den Großteil der Schwierigkeiten bereitete das Umschalten der RFID-Antennen, welches bis heute nicht komplett gelöst ist. So war es mit den vorhandenen Multiplexern nicht möglich zwei oder mehr Antennen an einen RFID-Reader anzubinden. Dadurch resultiert auch das Problem, im aktuellen Stand, keine Position der erkannten Objekte ermitteln zu können.

Auf Seiten der Sensorik zur Berührungserkennung konnte eine sehr passable Lösung gefunden werden, welche fehlertolerant arbeitet. Auch in der weiteren Nutzung der Sensorik tauchten keine Probleme auf.

Die Aktortechnik, in diesem Fall die 16 auf der Vorderseite angebrachten Leuchtdioden, konnten durch den gewählten LED-Treiberchip einwandfrei angesprochen werden. Es konnten keine Fehler im Betrieb ausgemacht werden. Auch die in der Analyse als hoch eingestufte Leistungsaufnahme und die damit verbundene Abwärme des LED-Treibers stellten kein Problem da.

Im Zusammenspiel mit der Modulsoftware ist es möglich alle Anforderungen zu erfüllen. So kann über eine einfache, in JAVA geschriebene Software, das Steuergerät angesprochen und die gewünschten Sensor- und Aktordaten ausgelesen beziehungsweise gesetzt werden.

Schwierigkeiten im Bereich der Datenübertragung bereitete die Ethernet-Verbindung, welche bei sehr schneller Übertragung von Nutzdaten Zeitverzögerungen zwischen den einzelnen Datenübertragungen erzeugte. Dies verzögerte die Sensor- und Aktordatenaktualisierung. Dieser Fehler lässt sich aber sicher durch Modifizierung der Software beseitigen. Der I2C-Bus arbeitet auch in der jetzigen Software-Version einwandfrei.

4.2 Entwicklungsmöglichkeiten

Eine Optimierung der Modulplatinen durch die Umgestaltung dieser von der DIP auf die SMD-Bauweise wäre hardwareseitig möglich. Die Vorteile liegen hier im geringeren Platzverbrauch als auch in der kostengünstigeren Herstellung der Platinen, da keine Bohrungen erforderlich sind. Alle verwendeten Baugruppen wurden auf die Verfügbarkeit im SMD-Format ausgewählt, was diese Optimierung ohne einen Wechsel von Komponenten oder die Änderung des Schaltplans ermöglicht (vgl. Abschnitt [2.3.2](#) und [2.5.2](#)).

Die Lichtleistung der Leuchtdioden könnte durch Anpassung dieser vergrößert werden. Hier sind Leuchtdioden mit bis zu 1W Leistung denkbar. Eine weitere Optimierung der Leuchtsegmente liegt dessen Farbwiedergabe. Im aktuellen Stadium der Arbeit werden lediglich die drei Grundfarben ohne Anpassung der Farbkurven gemischt. Ein Algorithmus zur Verbesserung der Farbwiedergabe könnte, gerade in der Wiedergabe von Bild oder Videomaterial, die Farbreinheit deutlich erhöhen.

Zu den Optimierungsmöglichkeiten der Sensorik zählt die Umstellung der kapazitiven Berührungserkennung auf eine kommerzielle Lösung. Dies könnte die schon gute Erkennungsrate noch einmal steigern. Durch den Modularen Aufbau der Modulplatine ist dies leicht zu bewerkstelligen.

Auch eine Ausgestaltung des Steuergeräts auf einer dedizierten Platine wäre ein Entwicklungsschritt nach vorne. So wäre ein Aufbau dieses Geräts ohne die Verwendung der Prototyping-Plattform Arduino möglich. Hier ist zu erwähnen, dass ein Ethernet Adapter zu entwickeln ist, da ansonsten die Nutzung des Arduino Ethernetshields weiter notwendig ist. Alternativ könnte die in der Analyse erwähnte Möglichkeit der nativen USB-Unterstützung eine Alternative oder Erweiterung der Ethernet-Schnittstelle darstellen.

Auf Seiten der Software sind die Erweiterungsmöglichkeiten dieser Bachelorarbeit vielzählig. Eine umfangreiche Software zur Modulkaskadensteuerung wäre hier wünschenswert.

Anwendungsgebiete auf Seiten der Leuchtelemente wie die Wiedergabe von Bild- und Videomaterial sind genauso denkbar, wie die Entwicklung von Spielen.

Gerade auch die in der Motivation beschriebene Möglichkeit der Integration dieses Systems in vorhandene Infrastruktur einer Wohnung wäre weiter auszuarbeiten. Besonders spannend könnte die Entwicklung einer Steuergerätsweiterung um einen Hausbus wie das KNX-System darstellen (vgl. [KNX, 2010](#)). Dies wäre der Schritt das Modulsystem nicht nur in Testprojekten einzusetzen, sondern eine Nutzung unter realen Bedingungen zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [acleone 2010] ACLEONE: *Arduino TLC5940 Lib.* 2010. – URL <http://code.google.com/p/tlc5940arduino/>. – Zugriffsdatum: 16.06.2010
- [Arduino 2010a] ARDUINO: *Arduino Lily Pad.* 2010. – URL <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardLilyPad>. – Zugriffsdatum: 02.08.2010
- [Arduino 2010b] ARDUINO: *Arduino prototyping-Plattform.* 2010. – URL <http://arduino.cc>. – Zugriffsdatum: 01.08.2010
- [arduino.cc 2010] ARDUINO.CC: *Ethernet Shield Lib.* 2010. – URL <http://arduino.cc/en/Reference/Ethernet>. – Zugriffsdatum: 16.06.2010
- [Atmel 2010a] ATMEL: *Atmel QT100A.* 2010. – URL http://www.atmel.com/dyn/products/product_card.asp?part_id=4451. – Zugriffsdatum: 28.07.2010
- [Atmel 2010b] ATMEL: *Atmel QT100A Datasheet.* 2010. – URL <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/164237/QUANTUM/QT100.html>. – Zugriffsdatum: 28.07.2010
- [Atmel 2010c] ATMEL: *Atmel ATmega328 Datasheet.* 2010. – URL http://www.disam.upm.es/~cybertech/Nacional/Documentos/Componentes/AtmelATmega328_168.pdf. – Zugriffsdatum: 25.06.2010
- [Badger 2010] BADGER, Paul: *Capacitive Sensing Library.* 2010. – URL <http://www.arduino.cc/playground/Main/CapSense>. – Zugriffsdatum: 14.05.2010
- [Brilldea 2010] BRILLDEA: *Brilldea LED Painter PCB.* 2010. – URL http://www.brilldea.com/product_LEDPainter.html. – Zugriffsdatum: 21.07.2010
- [www.i2c bus.org 2010] BUS.ORG www.i2c: *I2C-Bussystem.* 2010. – URL <http://www.i2c-bus.org/de/i2c-bus/>. – Zugriffsdatum: 07.05.2010
- [HAW-Hamburg 2010] HAW-HAMBURG: *Romantische Maschinen.* 2010. – URL <http://regulategentrification.wordpress.com/2010/04/22/vernissage-romantische-maschinen-installationen-und-objekte/>. – Zugriffsdatum: 02.08.2010

- [ID-Innovations 2010] ID-INNOVATIONS: *ID-2 RFID-Reader Datasheet*. 2010. – URL <http://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ID-12-Datasheet.pdf>. – Zugriffsdatum: 23.06.2010
- [IT-Wissen 2010] IT-WISSEN: *EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit)*. 2010. – URL <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/EMC-Elektromagnetische-Vertraeglichkeit-EMV-electromagnetic-compatibility.html>. – Zugriffsdatum: 05.07.2010
- [KNX 2010] KNX: *KNX Haus- und Gebäudevernetzung*. 2010. – URL <http://www.knx.de/>. – Zugriffsdatum: 25.07.2010
- [Medienmuseum 2010] MEDIENMUSEUM, ZKM: *ZKM Medienmuseum*. 2010. – URL <http://on1.zkm.de/zkm/institute/medienmuseum>. – Zugriffsdatum: 05.08.2010
- [Multipcb 2010] MULTIPCB: *Leiterbahndimensionierung nach multipcb*. 2010. – URL <http://www.multipcb.de/ger/sites/pool/index.html?/ger/sites/leiterplatte/strombelastbarkeit.html>. – Zugriffsdatum: 05.07.2010
- [Naundorf 2004] NAUNDORF, Uwe: *Digitale Elektronik: Theoretische Grundlagen und Schaltungsanalyse*. Oldenbourg, 2004
- [Nullohm 2010] NULLOHM: *LED-Kennlinien*. 2010. – URL <http://www.nullohm.de/berichte/ledex.htm>. – Zugriffsdatum: 25.06.2010
- [Odendahl 2009] ODENDAHL, Manuel: *Arduino- Physical Computing für Bastler, Designer und Geeks*. O'Reilly, 2009
- [Pollin 2010] POLLIN: *Luftspule*. 2010. – URL http://www.pollin.de/shop/dt/NTc2OTQ3OTk-/Bauelemente/Passiv/Spulen_Filter/Luftspule.html. – Zugriffsdatum: 21.06.2010
- [Rahimi 2010] RAHIMI, Voigt: *HAW Living Place*. 2010. – URL <http://users.informatik.haw-hamburg.de/~ubicomp/projekte/master09-10-proj/rahimi-vogt.pdf>. – Zugriffsdatum: 02.06.2010
- [RECOMElectronicGmbH 2010] RECOM ELECTRONIC GMBH: *RECOM DC/DC Regler*. 2010. – URL <http://www.recom-international.de/pdf/Innoline/R-78xx-1.0.pdf>. – Zugriffsdatum: 17.06.2010
- [Schoblick 2005] SCHOBlick: *RFID Radio Frequency Identification*. Franzis, 2005

- [Sensacell 2010a] SENSACELL: *Sensacell Fläche in Benutzung*. 2010. – URL <http://www.sensacell.com/Pix/Photos-movies-PIX/Sensa-Seq1-cropped.jpg>. – Zugriffsdatum: 05.07.2010
- [Sensacell 2010b] SENSACELL: *Sensacell HSI64-36-RGB*. 2010. – URL <http://www.sensacell.com/Sensa%20Module%20HSI64-36-RGB%20Rev%202.4.pdf>. – Zugriffsdatum: 02.08.2010
- [Sextro 2008] SEXTRO, Walter K.: *Schwingungen: Eine Einführung in physikalische Grundlagen und die theoretische Behandlung von Schwingungsproblemen*. Vieweg+Teubner, 2008
- [sprut 2010] SPRUT: *EIA232-Bussystem*. 2010. – URL <http://www.sprut.de/electronic/interfaces/rs232/rs232.htm>. – Zugriffsdatum: 24.05.2010
- [Teuteberg 2010] TEUTEBERG, Hans-Dieter: *Kapazitive Sensorschaltung*. 2010. – URL <http://www.atx-netzteil.de>. – Zugriffsdatum: 07.05.2010
- [TexasInstruments 2010] TEXASINSTRUMENTS: *TCL5940 Datasheet*. 2010. – URL <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tlc5940.pdf>. – Zugriffsdatum: 16.06.2010
- [www.dtic.upf.edu 2010] WWW.DTIC.UPF.EDU: *Funktionsweise der PWM*. 2010. – URL <http://www.dtic.upf.edu/~jlozano/interfaces/PWM.gif>. – Zugriffsdatum: 25.06.2010
- [www.interfacebus.com 2010] WWW.INTERFACEBUS.COM: *EIA485-Bussystem*. 2010. – URL http://www.interfacebus.com/Design_Connector_RS485.html. – Zugriffsdatum: 24.05.2010

A Anhang

A.1 Modulverbindungen

LED-Treiber

	Name Schaltplan	Pinname Atmel
TLC GSCLK	DIGITAL_3	PD3(INT1)
TLC DCPRG	VCC	VCC
TLC VPRG	GND	GND
TLC BLANC	DIGITAL_10	PB2(SS/OC1B)
TLC SCLK	DIGITAL_13(SCK)	PB5(SCK)
TLC SIN	DIGITAL_9	PB1(OC1A)
TLC XLAT	DIGITAL_11(MOSI)	PB3(MOSI/OC2)

ID-Wahlschalter

	Name Schaltplan	Pinname Atmel
ID-Multiplexer A	DIGITAL_5	PD5(T1)
ID-Multiplexer B	DIGITAL_6	PD6(AIN0)
ID-Multiplexer C	DIGITAL_7	PD7(AIN1)
Multiplexer Ausgang	DIGITAL_2	PD2(INT0)

Status-LED

	Name Schaltplan	Pinname Atmel
Status LED	DIGITAL_4	PD4(T0)

RFID-Sensorplatine

	Name Schaltplan	Pinname Atmel
RFID Multiplexer A	DIGITAL_5	PD5(T1)
RFID Multiplexer B	DIGITAL_6	PD6(AIN0)
RFID Reset	DIGITAL_8	PB0(ICP)
RFID RX	DIGITAL_0	PD0(RXD)
RFID GND	GND	GND
RFID VCC	VCC	VCC

Touchsensorplatine

	Name Schaltplan	Pinname Atmel
Touchsensor 1	ANALOG_2	PC2(ADC2)
Touchsensor 2	ANALOG_1	PC1(ADC1)
Touchsensor 3	ANALOG_0	PC0(ADC0)
Touchsensor 4	ANALOG_3	PC3(ADC3)
Touchsensor GND	GND	GND
Touchsensor VCC	VCC	VCC

ICSP-Programmierschluss

	Name Schaltplan	Pinname Atmel
ICSP MISO	DIGITAL_12(MISO)	PB4(MISO)
ICSP VCC	VCC	VCC
ICSP SCK	DIGITAL_13(SCK)	PB5(SCK)
ICSP MOSI	DIGITAL_11(MOSI)	PB3(MOSI/OC2)
ICSP RESET	RESET	PC6(/RESET)
ICSP GND	GND	GND

RS232-Programmierschluss

	Name Schaltplan	Pinname Atmel
PROGRAMMER GND	GND	GND
PROGRAMMER TX	DIGITAL_0(RX)	PD0(RXD)
PROGRAMMER RX	DIGITAL_1(TX)	PD1(TXD)
PROGRAMMER DTS	RESET	PC6(/RESET)

Busverbindung unter den Modulen

	Name Schaltplan	Pinname Atmel
INTERFACE 1-4 SDA	ANALOG_4(SDA)	PC4(ADC1/SDA)
INTERFACE 1-4 SCL	ANALOG_5(SCL)	PC1(ADC1/SCL)
INTERFACE 1-4 12V	+12V	-.-
INTERFACE 1-4 GND	GND	GND

Brildea LED-Painter Port

	Name Schaltplan	Pinname Atmel
Painter GSCLK	DIGITAL_3	PD3(INT1)
Painter DCPRG	VCC	VCC
Painter VPRG	GND	GND
Painter BLANC	DIGITAL_10	PB2(SS/OC1B)
Painter SCLK	DIGITAL_13(SCK)	PB5(SCK)
Painter SIN	DIGITAL_9	PB1(OC1A)
Painter SOUT	SOUT	-.-
Painter XLAT	DIGITAL_11(MOSI)	PB3(MOSI/OC2)

A.2 Quellcode des Modulsteuergeräts und der Modulsteuerung

Diese Daten befinden sich auf der beigelegten CD.

Versicherung über Selbständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §24(5) ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Hamburg, 18. August 2010

Ort, Datum

Unterschrift