



Dipl.-Ing. Christian Mentin, BSc

Entwurf, Aufbau und Analyse einer skalier- und erweiterbaren Systemplattform zur Entwicklung eines Smart Energy Managers

MASTERARBEIT

Zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Elektrotechnik

Eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Gunter Winkler, Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.

Institut für Elektronik

Graz, Februar 2016

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Durch den steigenden Energiebedarf sowie der zunehmenden Bedeutung von dezentraler und erneuerbarer Energiegewinnung wird intelligentes Energiemanagement auf der übergeordneten Netzebene, sowie direkt in den Endverbraucher Haushalten immer wichtiger. Analog zu Prognosesystemen auf Netzmanagementebene wird insbesondere die zuverlässige Prognose von Energieverbrauch sowie -produktion im Haushalt zukünftig eine wesentliche Rolle spielen, wodurch Nutzenergie optimal und kostengünstig eingesetzt werden kann. Smart-Meter und variable Tarifmodelle sind nur der erste Schritt zu Zeit- und Dargebots abhängigen Strompreisen. Eine bevorzugte Nutzung verfügbarer elektrischer Energie zu Zeitpunkten von Überproduktion, sowie explizites Energiesparen zu Hochlastzeiten, liegt nicht nur im Sinne des Netzbetreibers da Übertragungsnetze merklich entlastet werden können, sondern auch im Interesse des Endverbrauchers der sich dadurch viel Geld spart. Dabei wird es in Zukunft notwendig sein die Potentiale der intelligenten Einbindung erneuerbarer Energien optimal ausnutzen zu können, egal ob durch günstige Strompreise oder der eigenen Photovoltaikanlage. Die Masterarbeit hat es sich zum Ziel gesetzt ein Gerät zu konzeptionieren und entwickeln, welches sich optisch gut in den Wohnraum integriert und zudem nicht nur in der Lage ist, dem Benutzer ein Bedieninterface zu Verfügung zu stellen, welches er von handelsüblichen Tablet und Smartphones gewohnt ist, sondern auch durch einbringen künstlicher Intelligenz in der Lage sein soll selbstständig Nutzergewohnheiten zu erlernen und somit verfügbare Energie bevorzugt aus erneuerbaren Energiequellen optimal einzusetzen. Durch Verwendung neuester Technologien und Konzepte, Software als auch Hardware betreffend, soll es möglich werden ohne Einschränkung aktuelle und auch zukünftige Hausautomatisierungssysteme mit dem entwickelten Gerät zu verbinden um die, dem Endanwender entstehenden, Energiekosten effizient zu reduzieren. Die Hardware für das dazu benötigte zentrale Steuer- und Bediengerät, der sogenannte Smart Energy Manager, soll im Rahmen dieser Arbeit, konzeptioniert, realisiert und nach allen dafür geltenden Normen geprüft werden, um den Prototypen in eine Serienproduktion überführen zu können.

Abstract

Since there is an recognizable increase in energy demand and a growing importance of the role of decentral and renewable energy generation, intelligent energy management gains more importance not only for the power grid but also for the end-user's households. Therefore, additionally to prediction systems on the level of high voltage power grids, a reliable prediction of energy consumption as well as energy production in households, will play a central role, so that in the end it is possible to utilize the available energy in an optimal and economic way. Smart meter and variable tariff models are only the very first steps towards time and energy-availability dependent tariff plans. On the one hand, to use electrical energy in times when it is available in excess, is in favour of the power grid operator because the grid could be significantly relieved. On the other hand, to save explicitly energy in times of high energy demands is also in favour of the consumer who could save real money. Therefore, it will be necessary in close future, to use the potentials of intelligent integration of renewable energies in an optimal way, no matter if the electrical energy prices are currently low, or self-produced electrical solar power from the rooftop will be used. This master thesis has the objective to concept and engineer a device which can be optically well integrated into the living room with an user-friendly handling which the user is familiar with from modern smart phones and tablets. Moreover, the device should reach an artificial intelligence with which it should be able to learn the user's habits to eventually utilize most efficiently the available electrical energy, preferable from renewable energy sources. With the use of the latest cutting-edge technologies and concepts, regarding software and hardware, it should be possible without any restrictions to interconnect existing as well as future home automation technologies with the developed device. In the end, these technologies and the developed device should help the consumer to efficiently reduce the cost for electrical energy. The required hardware, the so-called Smart Energy Manager, should be drafted and realized as part of this thesis. Furthermore, the device itself should be proofed with all applicable standards to translate the prototype hardware into a series product later on.

Danksagung

Die Masterarbeit wurde in den Studienjahren 2013-2015 am Institut für Elektronik an der Technischen Universität Graz durchgeführt.

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Dr. Gunter Winkler, welcher sich schon ab dem Zeitpunkt der Projektidee immer wieder mit seiner Erfahrung einbringen konnte und daher maßgeblich an der Überführung des Prototyps in die aktuell produzierte Serienvariante beteiligt ist. Die im EMV Labor zu Verfügung gestellten Messgeräte, sowie die exzellente Betreuung haben die Durchführung eines solchen, durchaus komplexen Projekts überhaupt erst ermöglicht. Das Seriengerät ist das Resultat aus dieser langen und intensiven Zusammenarbeit mit dem Institut für Elektronik.

Nicht zuletzt möchte ich auch meinen Eltern dafür danken, dass sie mich nicht nur während der Schulzeit, sondern auch während des Studiums immer unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG.....	7
1.1. Motivation.....	9
1.2. Ziel der Arbeit.....	13
1.3. Aufbau dieses Dokuments.....	14
2. ANFORDERUNGEN AN DAS GERÄT.....	15
2.1. Nichtfunktionale Anforderungen.....	15
2.1.1. Aussehen und Handhabung.....	15
2.1.2. Bedienbarkeit.....	16
2.1.3. Betrieb und Umgebungsbedingungen.....	16
2.1.4. Montage.....	16
2.1.5. Zuverlässigkeit.....	16
2.1.6. Leistung und Effizienz.....	16
2.1.7. Sicherheit.....	16
2.1.8. Wartbarkeit und Änderbarkeit.....	17
2.1.9. Skalierbarkeit.....	17
2.2. Funktionale Anforderungen.....	17
2.2.1. Netzteil.....	17
2.2.2. Mensch Maschine Schnittstelle.....	17
2.2.3. Leistung und Effizienz.....	17
2.2.4. Schnittstellen.....	18
2.3. Normative Anforderungen.....	19
2.3.1. Durchzuführende Messungen die Störaussendung betreffend.....	20
2.3.2. Durchzuführende Messungen die Störfestigkeit betreffend.....	22
3. SYSTEMARCHITEKTUR.....	29
3.1. Systemkomponenten und Schnittstellen.....	30
3.1.1. Netzteil.....	30
3.1.2. Mensch Maschine Schnittstelle.....	31
3.1.3. Schnittstellen.....	33
3.1.4. Prozessor.....	36
3.1.5. Zusammenfassung.....	38
3.2. Schaltplan.....	38
3.2.1. Onboard Spannungsregler.....	39
3.2.2. Schutzstrukturen an externen Schnittstellen.....	41
3.2.2.1. Schutz gegen elektrostatische Entladung.....	42
3.2.2.2. Schutz gegen Überlast.....	43
3.2.2.3. Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit.....	44
3.2.3. Differentielle Schnittstellen.....	45
3.2.3.1. Ethernet.....	45
3.2.3.2. USB.....	46
3.2.3.3. HDMI.....	47
3.2.4. Drahtlose Kommunikation.....	48

3.2.4.1. WLAN	48
3.2.4.2. ZWave	50
3.2.5. Mensch Maschine Schnittstelle.....	51
3.2.5.1. Display.....	51
3.2.5.2. Kapazitives Touch Interface.....	52
3.3. PCB Design - Implementierungsdetails	53
3.3.1. Implementierung des Onboard Spannungsreglers	53
3.3.2. Implementierung der Schutzstrukturen.....	54
3.3.3. Implementierung der Differentielle Schnittstellen	56
3.3.4. Implementierung von WLAN und ZWave.....	57
3.3.5. Implementierung von Display und Touch	58
4. REALISIERUNG DES PROTOTYPEN.....	60
5. MESSERGEBNISSE IM EMV LABOR.....	63
5.1. Störaussendung	63
5.1.1. Funkstörstrahlung	63
5.1.2. Leitungsgeführte Störungen.....	64
5.2. Störfestigkeit.....	65
5.2.1. Einkopplung von abgestrahlten hochfrequente Elektromagnetischen Feldern.....	65
5.2.2. Leitungsgeführte Störungen.....	65
5.2.2.1. Bursts	65
5.2.2.2. Surges.....	66
5.2.2.3. Spannungs- Einbrüche und Unterbrechungen	67
5.2.2.4. Einkopplung hochfrequenter leitungsgeführter Störungen	67
5.2.3. Elektrostatische Entladung.....	68
6. VERBESSERUNGSPOTENTIALE HINSICHTLICH EMV	69
6.1. Re-Design Maßnahmen.....	69
6.1.1. Schaltplan	69
6.1.2. PCB Design	72
6.2. Verifikation der durchgeführten Verbesserungen.....	72
6.2.1. Diskussion der Ergebnisse.....	73
7. SCHLUSSBEMERKUNGEN	74
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	75
TABELLENVERZEICHNIS.....	77
LITERATURVERZEICHNIS.....	78
ANHANG	79
Schaltplan Version 1	79
Layout Version 1400.1	93

1. Einleitung

Durch die Vernetzung vieler verschiedener Geräte erreicht das Internet der Dinge langsam aber sicher die Haushalte. Je vielseitiger die Anwendungsmöglichkeiten einer solchen Vernetzung werden, desto unüberschaubarer wird es für Endanwender die Systeme zu begreifen und einen Nutzen daraus zu ziehen. Hausautomatisierungssysteme bieten eine Vielzahl von Möglichkeiten den täglichen Energiebedarf zeitlich gesteuert ablaufen zu lassen oder die Raumtemperatur bei Abwesenheit automatisch abzusenken um Energie und besonders Kosten zu sparen. Leider wird bei aktuell verfügbaren Systemen oft Bedienbarkeit und Nutzerkomfort stark in den Hintergrund gedrängt und ein Einstellen notwendiger Parameter ist meist nur mit technischem Detailwissen möglich.

Derzeit existieren verschiedenste Systeme zur Datenaufzeichnung von Photovoltaik Systemen, Heimautomatisierung sowie zur Optimierung des Eigenverbrauchs. Nahezu ausnahmslos können diese Systeme aber nur für einen bestimmten Einsatzzweck verwendet werden. Dazu entstehen neben den anfallenden Redundanzen bei der Hardware natürlich auch unnötige Kosten durch Einsatz verschiedener Systeme. Durch ein einziges System kann eine Effizienzsteigerung gegenüber voneinander unabhängigen Einzelsystemen erreicht werden. Ein einheitliches Userinterface verringert wiederum den Bedienungsaufwand, steigert somit den Komfort und reduziert die Gesamtsystemkosten

Dieses neue, modular erweiterbare System soll gegenwärtig vorhandene Funktionen eines Smart Home Automatisierungssystems übernehmen und durch intelligentes Energiemanagement erweitern. Durch dieses Energiemanagement soll es möglich werden Energie immer dann zu verbrauchen, wenn sie im Überschuss vorhanden ist. Beispielsweise kann die Aufbereitung des Warmwassers nicht nur dem Temperatursensor im Boiler überlassen werden, sondern gezielt zu Zeiten erfolgen an welchen elektrische Überschussenergie verfügbar ist. Ob dieser Energieüberschuss dabei aus der eigenen lokalen Photovoltaikanlage, regenerativen Energiequellen wie Wind- und Wasserkraft oder einfach nicht benötigter Energie im öffentlichen Stromnetz stammt ist dabei irrelevant. Überschüssige Energie kann dann hauseigenen Batteriespeichern, dem in der Garage geparkten Elektroauto oder auch der Warmwassererzeugung zugeführt werden.

Durch die Auswahl der günstigsten Energiequelle und die Verlagerung des Verbrauches in Zeiten mit Überkapazitäten kann eine deutliche Senkung der Energiekosten sowie eine Reduzierung der Lastspitzen und somit eine Entlastung des öffentlichen Stromnetzes erreicht werden. Diese Entlastung bietet Vorteile für alle Seiten. Energieerzeuger als auch Verbraucher profitieren von intelligentem Energiemanagement.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist die direkte Anbindung des Systems an eine Photovoltaikanlage. Dabei sollen die Daten der Anlage ausgelesen werden und dem Benutzer über das Hauptmodul, Apps am Smartphone und Tablet sowie online über ein Webinterface verfügbar gemacht werden. In Verbindung mit der geplanten Smart Home-Fähigkeit des Systems lässt sich der Eigenverbrauch intelligent steuern, indem Geräte, unter Berücksichtigung beliebig vieler Faktoren wie Strompreis, Wetter oder auch des individuellen Benutzerverhaltens, gezielt ein- und ausgeschaltet werden.

Bereits erhältliche Geräte, Aktoren und Sensoren¹ wie z.B. Dimmer, Lichtschalter, Temperatursensoren, Steckdosen, Bewegungsmelder, Heizungsregler sollen für ein intelligentes Energiemanagement in dem System zusammengeführt werden. Damit wird eine Steuerung von nahezu jedem erdenklichen Gerät möglich. Zusätzlich werden zukünftig immer mehr Geräte wie beispielsweise Kühlschränke, Gefriertruhen, Waschmaschinen oder Wäschetrockner schon im Auslieferungszustand mit Kommunikationsmodulen für das Internet der Dinge, kurz IoT², ausgestattet, wodurch ein Energiemanagement, aufgrund der einfachen Einbindung in ein bestehendes System auch bei diesen Geräten interessant wird.

Mit schaltbaren Steckdosen könnten auch Verbraucher, ohne eigenes Kommunikationsmodul, welche nicht zwingend durchgehend betrieben werden müssen, beispielsweise Teichpumpen o.ä. nur dann eingeschaltet werden, wenn genügend Sonnenenergie zu Verfügung steht. Sozusagen die erste Steckdose, welche nur mit Solarstrom funktioniert. Voraussetzung dafür ist ein intelligentes Energiemanagement dessen notwendige Hardware unter verschiedensten Gesichtspunkten im Rahmen dieser Arbeit konzeptioniert und als Prototyp realisiert werden soll.

¹ ZWave Alliance - <http://products.z-wavealliance.org/regions/1/categories>

² Internet of Things

1.1. Motivation

Die Motivation zur Durchführung dieses Projekts hat ihren Ursprung in vielen verschiedenen Bereichen. Einerseits wird der Ausbau erneuerbarer Energien in der EU stark forciert, doch unsere Übertragungsnetze sind, historisch bedingt, seit Jahrzehnten trotz steigendem Energiebedarf nahezu unverändert. Andererseits werden Großprojekte wie das Speicherkraftwerk Koralm in Kärnten auch aufgrund mangelnder Rentabilität wieder auf Eis gelegt. Mehrere Vorlesungen an der Universität und Tagungen zu dem Thema haben mich in unserer gemeinsamen Idee bestärkt, dass es in Zukunft sinnvoll sein wird Energiemanagement in nahezu jedem Haushalt zu betreiben. Einige Maßnahmen an Hand des Beispiels mit einer hauseigenen Photovoltaikanlage, zeigen schon heute die Vorteile von intelligentem Energiemanagement durch 20-50% kürzere Amortisationszeiten auf. Warum ich der Meinung bin, dass trotz aller aktuellen Schwierigkeiten in der Umsetzung, erneuerbare Energien die Zukunft sind und welche zukünftigen Chancen und Probleme sich daraus ergeben und mit Konsequenzen der Endkunde rechnen muss, möchte ich gerne in den nächsten Sätzen darstellen.

Elektromobilität

Die immer wieder extremen Preisanstiege für fossile Energieträger in den vergangenen Tagen haben dem elektrischen Antrieb in der Mobilität eine Renaissance beschert. Bis 2020 wurden, zugegebenermaßen in sehr optimistischen Szenarien, alleine in Deutschland eine Million Elektroautos auf öffentlichen Straßen prognostiziert. Aber, so modern elektrisch betriebene Fahrzeuge sind, aus heutiger Sicht wäre es leider nicht möglich sofort die ganze Bevölkerung auf Elektrofahrzeuge umzustellen, denn das elektrische Versorgungsnetz wäre total überlastet. Schon heute stoßen die Energieversorger regional sowie überregional regelmäßig an ihre Grenzen. Statistiken belegen starke Spitzenlasten im Stromnetz. Würde der Energiebedarf beispielsweise durch zu viele Elektroautos weiter stark ansteigen, wäre die Netzinfrastruktur total überlastet. Eine Abschaltung von Teilen des Stromnetzes wäre die Folge. [1]

Steigender Energiebedarf

Der weltweite Energiebedarf ist in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gestiegen und kann nur zu sehr kleinen Teilen aus erneuerbaren Energieträgern gedeckt werden. Trotz der Einführung von CO₂ Zertifikaten und einer durch die EU vorgegebene Richtlinie³, welche vorgibt dass bis zum Jahr 2020, 20% Einsparung an Primärenergien zu erreichen sind, scheint es verwunderlich, dass in Deutschland 2015 wieder vermehrt Kohlekraftwerke an das Stromnetz Energie lieferten und in Österreich das aktuell modernste Gaskraftwerk Europas stillgelegt werden musste. Entwicklungen die bei genauer Betrachtung jedoch auf der Hand liegen. Einerseits musste der Energiebedarf nach Abschaltung der Atomkraftwerke in Deutschland weiterhin gedeckt werden, andererseits sind die Preise für Erdgas in den letzten Jahren auch durch politische Konflikte erheblich gestiegen. Da erneuerbare Energien mit Vorrang in das Stromnetz eingespeist werden, verlieren moderne Gaskraftwerke außerdem wichtige Zeiten in welchen diese mit hoher Rentabilität betrieben werden können. Ein Szenario dem man sich auch am Klimagipfel 2015 in Paris gewidmet hat. Eine Forcierung des Ausbaus erneuerbarer Energieträger muss ganzheitlich betrachtet werden, denn ein unkontrollierter Ausbau von Offshore Windkraft beispielsweise in der Ostsee würde einen immensen Ausbaubedarf in Höchstspannungsnetzen erfordern. Daher scheint eine sinnvolle Integration von erneuerbaren

³ <http://www.bmfwf.gv.at/EnergieUndBergbau/Energieeffizienz/Seiten/Energieeffizienz-Richtlinie.aspx>

Energien beispielsweise durch neue dezentrale Ansätze besonders sinnvoll, sodass die Energie, ohne lange Transportstrecken in Kauf nehmen zu müssen, näher an den Orten produziert wird an welchen diese auch benötigt wird. [2]

Dargebots-Abhängigkeit

Erneuerbare Energien haben jedoch ein entscheidendes Problem. Sie sind je nach Ausführungsform, Tages- und auch Jahreszeit abhängig. Ist es bewölkt erzeugen Photovoltaikanlagen nur mehr einen Bruchteil der Energiemenge welche an sonnigen Tagen produziert werden würde. Gibt es lange Trockenperioden sind Laufwasserkraftwerke besonders betroffen, da deren produzierte Leistung auch direkt mit dem Wasserstand zusammenhängt. Zudem hat die europäische Wasserrahmenrichtlinie vielerorts den Ausbau von Kleinwasserkraftwerken leider merklich erschwert [3]. Ein weiterer geförderter Ausbau von Photovoltaik mit Leistungen unter 10kW Spitzenleistung zur Versorgung von Einfamilienhaushalten scheint aktuell nur sinnvoll, wenn möglichst viel der mit der eigenen Photovoltaikanlage produzierten Energie auch selbst wieder verbraucht wird. Dies ist jedoch nur dann möglich wenn sowohl Zeiten des Energieverbrauchs, sowie Zeiten in welcher Energie im Überschuss produziert wird, durch ein Energiemanagementsystem exakt vorhersagt werden können um ein unnötiges Einspeisen von Überschussenergie in das örtliche Stromnetz effektiv zu verhindern. Dass aktuell durch den Ausbau von Photovoltaik durchaus Probleme entstehen können und ein unkontrollierter Ausbau die Netzstabilität durchaus gefährdet zeigt sich am Beispiel Bayern.

Photovoltaik, die Zukunft?

Speisen zu viele Haushalte in einem örtlich begrenzten Gebiet zu viel Leistung ein, wie es beispielsweise in Bayern der Fall ist, wo viele kleine Anlagen den örtlichen Verbrauch um ein Vielfaches überdecken, kann die durch Photovoltaikanlagen produzierte Leistung nicht ausreichend über das für diese Anwendung unterdimensionierte Ortsnetz abtransportiert werden. Um eine Überlast am Ortsnetz-Trafo zu vermeiden würde das dahinterstehende Niederspannungsnetz abgeschaltet. In der Novelle des EEG⁴ für 2012 ist vorgeschrieben, dass alle PV Anlagen, die ab 2012 gebaut werden, eine Abschaltvorrichtung besitzen müssen. Damit sollen Netzversorger in der Lage sein Anlagen abzuregeln oder abzuschalten, wenn eben diese Netzstabilität gefährdet ist. Ein weiteres Indiz wie grenzwertig die momentane Netzinfrastruktur betrieben wird.

Energiekosten

Die Energieversorger sind daher, ohne dass weitere Maßnahmen gesetzt werden, schon in naher Zukunft gezwungen die Netzinfrastruktur stark auszubauen. Ein Vorgang welcher äußerst langsam von statten geht und zusätzlich mit Kosten in Milliardenhöhe verbunden ist. Kosten welche sich natürlich im Energiepreis niederschlagen werden. Umso mehr erneuerbare Energie in das Stromnetz eingespeist wird, desto notwendiger wird es in die Versorgungssicherheit zu investieren, sodass in Zeiten von geringer erneuerbarer Energieproduktion, Kraftwerke bereitstehen um das Netz zu stabilisieren. Schon heute beträgt in Deutschland der Beitrag für die erneuerbaren Energien auf der Stromrechnung mehr als die Hälfte des tatsächlichen Energiepreises. Daher ist es absehbar, dass der Energiepreis steigen wird, einerseits da erneuerbare Energien gefördert werden und der Endverbraucher diese Förderungen finanziert, andererseits da es aus Gründen der Versorgungssicherheit unabdinglich wird,

⁴ Erneuerbare-Energien-Gesetz

aus Sicht des EVU 5 eigentlich unrentable Kraftwerke auf „Standby“ zu halten anstatt komplett abzuschalten oder einzumotten. Wie stark der Preis für Energie steigen kann beweisen eindrucksvoll fossile Energieträger, eine Verdopplung oder gar Verdreifachung des Preises in einem Zeitraum von 15 Jahren scheint realistisch. [4]

Der zellulare Ansatz

Dass aktuell fieberhaft nach Lösungen gesucht wird um den Aufwand für den Ausbau des Höchstspannungsnetzes möglichst gering zu halten wird deutlich, wenn man neueste Studien des VDE in Deutschland betrachtet [5]. Anstatt neue, immer größere Trassen für Freileitungen zu erschließen, wurde in einer Studie der dezentrale Ansatz beleuchtet. Energiezellen welche für sich selbst gesehen energieautark sind ermöglichen eine Reduktion des Netzausbaus bei gleichzeitiger Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien. Dabei wird schnell ersichtlich, dass es Energiespeicher benötigt, denn je nach Lage wird Wind oder Wasserkraft keine wirkliche Option sein, sodass Photovoltaikanlagen den tagsüber produzierten Strom irgendwie zwischenspeichern müssen. Mit intelligentem Energiemanagement könnte es jedoch möglich werden diese benötigten Speicher sehr klein ausfallen zu lassen, ohne auf aktuellen Komfort verzichten zu müssen.

Energiespeicher

Werden dezentrale und intelligente Energiespeicher verwendet, könnte volatile erneuerbare Energieerzeugung zumindest mit weniger Netzausbau und „Standby“ Kraftwerken einhergehen sowie durch deren Verwendung aktuelle Spitzenlasten im Stromnetz signifikant reduziert werden. Außerdem wäre es möglich bei einem Wetterumschwung oder sonnenarmen Tagen einen hauseigenen elektrischen Energiespeicher zu Zeitpunkten zu laden, wenn der Energiepreis gerade niedrig ist.

Smart Meter

Da die EU auch vorsieht, dass schon 2020 flächendeckend Smart-Meter eingesetzt werden um Variationen im Energiepreis viertelstündlich, wie es sie aktuell nur an der Strombörse gibt, auch an die Endverbraucher weiterzugeben, ist es absehbar, dass ein intelligentes steuern von Energieverbrauchern oder -speichern für den Endkunden schon bald sinnvoll sein könnte. Schon jetzt ist es möglich halbstündliche Tarifmodelle bei einem Stromanbieter ⁶ in Österreich anzumelden. Voraussetzung dafür ist lediglich ein installiertes Smart Meter, welches diese halbstündliche Abrechnung auch zulässt. Mit intelligentem Energiemanagement würden sich dann auch gezielt Zeiten zu welchen die Energie besonders günstig ist zu Nutzen machen lassen, da mittlerweile an der Strombörse nahezu schon täglich negative Strompreise erzielt werden. Ein Grund liegt darin, dass die Energieübertragungsebene an ihre Grenzen stößt und nicht immer die gesamte Energie, welche von Windkraftanlagen produziert wird, über viele hundert Kilometer transportiert werden kann. Daher ist ein Verbrauch dieser Überschussenergie zu Zeiten wo diese jedoch nicht benötigt wird durchaus sinnvoll und leistet zur Stabilisierung des Netzes einen wesentlichen Beitrag.

⁵ Energieversorgungsunternehmen

⁶ <https://www.awattar.com/>

Regelenergie

Netzbetreiber haben daher die Möglichkeit Regelleistung abzurufen sofern er in gewissem Ausmaß Kontrolle über beispielsweise die Warmwasseraufbereitung hat. Im städtischen Bereich wird dieses Konzept für dezentrale Warmwasseraufbereitung mit großen Tauchsiedern (Leistungen >5MW) schon heute genutzt, um beispielsweise ein Energieüberangebot und den damit verbundenen niedrigen oder sogar negativen Energiepreis zu nutzen. [4] Ist der Netzbetreiber in der Lage die Warmwasseraufbereitung, speziell im ländlichen Bereich, in gewissem Ausmaß zu steuern, so ist hier ein enormes Potential enthalten.

Intelligentes Energiemanagement

Dies setzt jedoch ein intelligentes Energiemanagement voraus, um solch ambitionierte Ideen umsetzen zu können. Durch die Kombination verschiedener Systeme wie beispielsweise einer Photovoltaikanlage und elektrischer Warmwassererzeugung, kann der Eigenenergiebedarf und besonders auch der Anteil an notwendiger Fremdenergie gezielt reduziert werden. Ein Vorteil der nicht nur dem Endverbraucher direkt, durch die Verringerung der benötigten Energiemenge vom Stromlieferanten, eine Kostenersparnis bringt, sondern auch einen, aus heutiger Sicht notwendigen, teuren und besonders CO₂ intensiven Netzausbau teilweise verhindern könnte sowie gleichzeitig die Kosten für Kraftwerke zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit geringhält. Die Devise lautet: CO₂ Ausstöße verhindern, bevor sie entstehen.

SEMS. Eine Zukunft. Ein Ziel. Ein System. Das Smart Energy Management System.

1.2. Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es ein kompaktes Designer-Steuergerät zur Wandmontage im Wohnbereich, soweit als möglich allen zutreffenden Normen entsprechend zu entwerfen, in Betrieb zu nehmen und zu testen. Der Focus liegt dabei ganz eindeutig auf der Elektronik Hardware, welche teilweise in Kooperation mit der Firma PHYTEC⁷ aus Deutschland, gemeinsam erarbeitet wird. Dieses Steuergerät, in weiterer Folge SEM⁸ genannt, soll als zentrale Steuereinheit des SEMS⁹ Gesamtsystems eingesetzt werden.

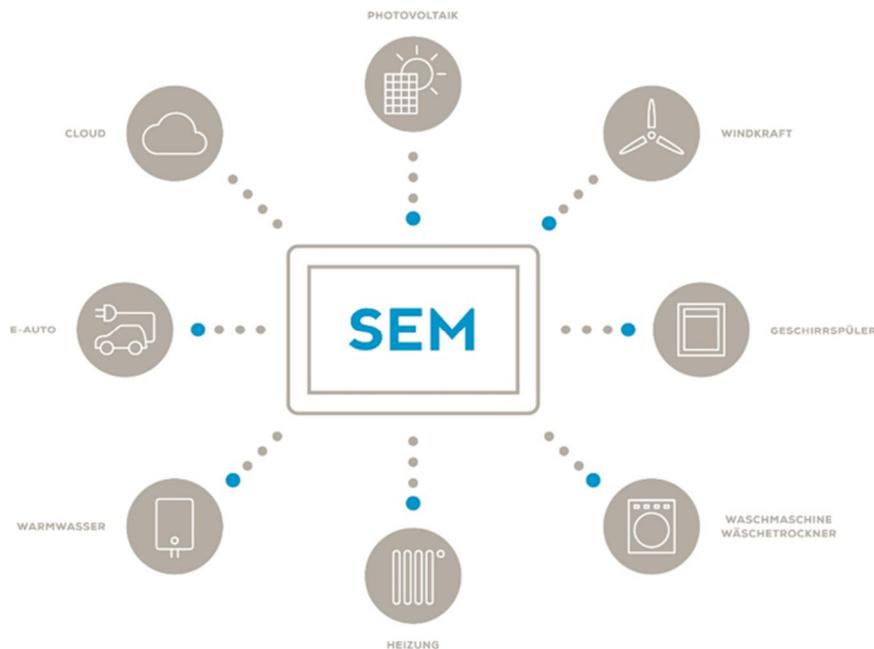


Abb. 1 - SEM als zentrales Steuergerät für ein intelligentes Energiemanagement

Mithilfe einer Funkverbindung sollen verschiedenste Aktoren und Sensoren angeschlossen werden können um den Installationsaufwand so gering als möglich zu halten und um eine hohe Akzeptanz bei Elektro-Installateuren zu erreichen. Eine möglichst modulare Systemarchitektur, welche beliebig erweiterbar ist, soll ein reagieren auf zukünftige Anforderungen erleichtern.

Der Entwurf der Systemarchitektur sowie die Auswahl der einzelnen Komponenten werden im Abschnitt Systemarchitektur als Teil dieser Arbeit detailliert besprochen.

Alle notwendigen Prüfungen die elektromagnetische Verträglichkeit betreffend sollen im EMV Labor des Instituts für Elektronik an der Technischen Universität Graz durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Messungen wurden als Teil einer Projektarbeit [6] dokumentiert.

Die notwendige Software wird in weiteren Projektarbeiten [7] anderer Personen gesondert betrachtet und ist nicht Teil dieser Arbeit.

⁷ PHYTEC Messtechnik GmbH - <http://www.phytec.de/>

⁸ Smart Energy Manager

⁹ Smart Energy Management System

1.3. Aufbau dieses Dokuments

Das Dokument beschreibt in sieben Kapiteln das an die gestellten Anforderungen angepasste Konzept, das Design und die Entwicklung eines Prototypen, sowie die dabei auftretenden Probleme.

In Kapitel 2 werden die notwendigen Anforderungen und Grundlagen zum Entwurf eines solchen Steuergerätes erarbeitet um auch die EMV Probleme, welche bei versuchten Lösungsansätzen in Kapitel 4 auftraten, verstehen zu können. Dabei werden die wichtigsten Details herausgegriffen und die Problematiken, wenn möglich, an Hand von Beispielen verdeutlicht.

Des Weiteren werden in Kapitel 3 die wichtigsten Systemkomponenten herausgegriffen und erklärt. Dazu werden, um einen Überblick über die Komplexität eines solchen Systems geben zu können, einige Implementierungsdetails für dieses System etwas genauer betrachtet. Der fertige Prototyp wird in Kapitel 4 genauer vorgestellt.

In Kapitel 5 werden anhand von Messungen, welche im EMV Labor des Instituts für Elektronik durchgeführt wurden, Verbesserungspotentiale erkannt und in mehreren Re-Design Schritten, welche in Kapitel 6 dokumentiert und erörtert werden, sukzessive Verbesserungen durchgeführt.

Eine Zusammenfassung der Entwicklung und der Ergebnisse sind im letzten Kapitel 7 dieses Dokuments angeführt.

2. Anforderungen an das Gerät

Die Anforderungen welche an das Gesamtsystem gestellt werden, wurden in Zusammenarbeit mit allen am Projekt beteiligten Personen gemeinsam ausgearbeitet, unter Berücksichtigung:

- bekannter Bedienungs- und Installationsprobleme von Heimautomatisierungssystemen, sowie
- speziellen Anforderungen ausgehend von Haushalten mit Photovoltaikanlagen, da diese die Zielgruppe für den Verkaufsstart des Produkts darstellen.

Die Anforderungen an das zu entwerfende Steuergerät, dem SEM, wurden zusätzlich in 3 weitere Anforderungsgruppen aufgeteilt:

- Nichtfunktionale Anforderungen
- Funktionale Anforderungen
- Normative Anforderungen

Aufbauend auf diesen Anforderungen wurden anschließend die Pflichtenhefte für Elektronik und Mechanik Designer erstellt. Besonders das Erfüllen von funktionalen und normativen Anforderungen wird in späteren Kapiteln dieser Arbeit durch gezieltes betrachten ausgewählter Implementierungsdetails genauer erarbeitet.

2.1. Nichtfunktionale Anforderungen

Den von den Projektpartnern geäußerten Wunschvorstellungen das Erscheinungsbild des SEM betreffend, konnte entnommen werden, dass ein an der Wand hängendes *iPad* das Designziel grob beschreiben könnte. Da besonders die Konnektivität des SEM sich sehr von der eines *iPads* unterscheidet konnten folgende nichtfunktionale Anforderungen festgelegt werden. Auch wenngleich einige der nachfolgend angeführten Anforderungen nicht in direkten Zusammenhang mit dem Entwurf des elektronischen Konzepts in Verbindung stehen, so stellen nichtfunktionale Anforderungen oft den Ausgangspunkt oder besondere Randbedingungen für das elektronische Design dar und sind daher nicht weniger wichtig als konkrete elektrische Anforderungen.

2.1.1. Aussehen und Handhabung

- Die Bauhöhe soll minimal gehalten werden, sodass auf keinen Fall der Eindruck eines an der Wand hängenden „Klotzes“ entsteht.
- Die Außenmaße des Gehäuses sollen, wie von Tablets bekannt, primär von der Größe des Displays bestimmt werden.
- Wie von Premium Tablets bekannt soll das Produkt dem Benutzer eine hohe Wertigkeit vermitteln.
- „Billig“ wirkende Kunststoffteile sollen an der Außenseite des Gehäuses vermieden werden.
- Als Mensch Maschine Schnittstelle soll ein passend großer Touchscreen verwendet werden.
- Eine Energiebilanz soll nicht nur am Display, sondern auch an der Farbe der Hintergrundbeleuchtung des Gerätes (ähnlich Phillips Ambilight) erkennbar sein. Dazu sollen Leuchtmittel integriert werden, welche direkt an die Montagewand leuchten.

2.1.2. Bedienbarkeit

- Wie von aktuellen Tablets gewohnt soll das Userinterface schnell auf Benutzereingaben reagieren und bei Eingaben am Touchscreen optisch sowie haptisch dem Benutzer ein Feedback zu seiner Eingabe geben.
- Die Bedienung soll so intuitiv wie möglich sein und eine Bedienungsanleitung überflüssig machen.
- Selbsterklärende Menüführung am Gerät und aussagekräftige Symbolik sollen verwendet werden.

2.1.3. Betrieb und Umgebungsbedingungen

- Als Energieversorgung für das Gerät soll ein externes Zukauf Netzteil mit Nennspannung von 12-15V fungieren.
- Der vorgesehene Aufstellungsort ist an einer Wand innerhalb des Wohnbereichs

2.1.4. Montage

- Das Gerät soll an der Wand möglichst einfach montiert werden können.
- Die notwendigen Kabel sollen von der Rückseite zugeführt werden.
- Eine Montage direkt über einer Installationsdose soll möglich sein, sodass schon installierte Kabel direkt in das Gerät verschwinden und darin angeschlossen werden können.

2.1.5. Zuverlässigkeit

- Das Gerät soll so zuverlässig als möglich funktionieren, durch die Verwendung von drahtlos Netzwerken, sind Pläne und Sicherheitsmaßnahmen zu erstellen, welche Netzwerkausfälle berücksichtigen.

2.1.6. Leistung und Effizienz

- An das Gerät werden keine besonderen Ansprüche, die Leistungsfähigkeit betreffend gestellt. Einzig das Userinterface soll möglichst schnell reagieren, alle Steuerungsaufgaben werden über Netzwerke an entfernte Aktuatoren weitergeleitet. Die Anforderung ist daher, dass die Steuerung ordnungsgemäß funktionieren kann, das Übermitteln von z.B. neuen Stellgrößen nicht „Stunden“ dauert bis dann eine neue Verbindung aufgebaut werden kann.
- Der Energieverbrauch soll möglichst geringgehalten werden. Das heißt bei ausgeschaltetem Display (z.B.: 5min Auto OFF) soll sich dieser bei <10W befinden.

2.1.7. Sicherheit

- Alle angesprochenen Aktuatoren und Sensoren werden als eigensicher betrachtet. Funktionale Sicherheit muss daher natürlich auch in den verwendeten Netzwerkprotokollen und insbesondere in den Aktoren selbst auch sichergestellt werden. Da es sich aber um käuflich erwerbbarer Aktoren und Sensoren handelt und diese je nach Anwendungsgebiet verschiedenste Sicherheitsanforderungen erfüllen, muss der Smart Energy Manager keine besonderen Anforderungen die Sicherheit betreffend erfüllen.

2.1.8. Wartbarkeit und Änderbarkeit

- Über das angeschlossene Netzwerk wird eine Internetverbindung vorausgesetzt, über welche es möglich sein muss Softwareupdates automatisch einzuspielen und optionale Cloud Services zu aktivieren.

2.1.9. Skalierbarkeit

- Das System muss erweiterbar sein, sodass zusätzliche Sensoren und Aktoren problemlos eingebunden werden können.
- Zukünftige Schnittstellen und Netzwerktypen sollen auch eingebunden werden können.

2.2. Funktionale Anforderungen

Funktionale Anforderungen betreffen das Steuergerät, den SEM, direkt. Dadurch werden wichtige elektrische sowie Performance Parameter festgelegt, welche den Ausgangspunkt für die Konzepterstellung bilden.

2.2.1. Netzteil

- Das Zukauf Netzteil muss den Leistungsanforderungen und insbesondere auch den durch den Einsatzzweck gestellten EMV Vorschriften genügen.
- Die Ausgangsspannung des Netzteils zur Versorgung des SEM soll zwischen 12V und 24V betragen.

2.2.2. Mensch Maschine Schnittstelle

- Das Display soll eine Minimalauflösung von 800x500px bei einer Displaygröße von 7“ im 16:10 Format aufweisen. Sehr viel höhere Auflösungen sind aufgrund des enormen Preisanstiegs vermutlich nicht einsetzbar.
- Als Eingabegerät soll ein kapazitiver Touchscreen verwendet werden, welcher optional schon direkt mit dem Display verklebt ist um einen Arbeitsschritt zu sparen.

2.2.3. Leistung und Effizienz

- Die Auswahl des Prozessors soll mit Rücksicht auf User Experience und thermisches Management erfolgen. Da es sich um ein, wenn an die Wand montiert, nahezu vollständig geschlossenes Gehäuse handelt, muss auch die Abwärme des ausgewählten Prozessors gezielt abgeführt werden können.
- Ein embedded Linux soll als Betriebssystem die Grundlage der entwickelten Applikation bilden.

2.2.4. Schnittstellen

Der SEM soll über folgende Schnittstellen verfügen:

- WLAN 802.11 b\g
- Ethernet
- 2,1mm DC Rundstecker sowie weitere Anschlussklemmen für eine eventuell schon vorhandene DC-Installation
- USB Port zum Anschluss eines Speichermediums
- Mini USB Port als USB otg
- HDMI zum Anschluss eines weiteren Anzeigeegerätes
- Z-Wave, zum Anschluss von einer Vielzahl verschiedener Aktoren und Sensoren (868,42MHz)

2.3. Normative Anforderungen

Nach Recherche konnte die Norm EN 60730-1:2011 [8] als zutreffend identifiziert werden. Der Anwendungsbereich der Norm ist wie folgt festgelegt:

„Im Allgemeinen gilt diese Norm für automatische elektrische Regel- und Steuergeräte für den Gebrauch in, an oder im Zusammenwirken mit Betriebsmitteln für den Haushalt und ähnliche Anwendungen, einschließlich elektrischer Regel- und Steuergeräte für Heizung, Klimatechnik und ähnliche Anwendungen. Das Betriebsmittel kann Elektrizität, Gas, Öl, feste Brennstoffe, thermische Solar-Energie usw. oder eine Kombination hiervon verwenden.“¹⁰

Da sich diese Arbeit auf den Entwurf und Test des Steuergerätes konzentriert sind besonders die in der Norm angeführten Anforderungen an die Störaussendung bzw. Störfestigkeit wichtig, welche auch in Abschnitt 5, Messergebnisse im EMV Labor, dann dokumentiert und nochmals genauer behandelt werden. Durch Studium der Norm konnte unser Gerät als *unabhängig montiertes Betriebs und Mehrfunktions RS¹¹ mit der Wirkungsweise Typ 1* identifiziert werden. Der zugehörige Wortlaut aus der Norm lautet:

Unabhängig montiertes RS:

RS das für dauernde Verbindung mit fester Verdrahtung vorgesehen ist, aber außerhalb von dem zu regelnden Betriebsmittel montiert wird. Es kann ausgeführt werden als Aufbaugerät, z.B.: für Wandmontage als Einbaugerät, z.B.: Wandeinbau, wenn die Installation von der Frontseite möglich ist, als Schalttafeleinbaugerät, z.B.: für Einbau in Schalttafeln, wenn die Installation von der Rückseite möglich ist

Mehrfunktions RS:

elektrisches RS, in das mehr als eine Funktion eingebaut ist

Betriebs RS:

RS, welches das Betriebsmittel bei bestimmungsgemäßem Betrieb startet oder regelt

Wirkungsweise Typ 1:

automatische Wirkungsweise, für die keine Herstellerabweichung und Abwanderung von Betriebswert, Betriebsablauf oder Betriebsdauer nach dieser Norm angegeben und geprüft wurden

Grundsätzlich sind diese Anforderungen des EMV Teils in der Norm EN60730-1:2011 in zwei Teile zu trennen, die **Störaussendung** und die **Störfestigkeit**.

Die in den folgenden Abschnitten 2.3.1. und 2.3.2. Tabellen 1 – 12 sind auch in [8] nachzulesen.

¹⁰ EN60730-1:2011, Anwendungsbereich und normative Verweisungen [8]

¹¹ Abk.: Regel und Steuergerät

2.3.1. Durchzuführende Messungen die Störaussendung betreffend

Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit – **Störaussendung:** „Elektronische Regel und Steuergeräte müssen so aufgebaut sein, dass sie keine übermäßigen elektrischen oder elektromagnetischen Störungen in ihre Umgebung abstrahlen“¹²

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die maximal zulässigen Störpegel angeführt. Diese stellt daher die Grundlage für die Prüfkriterien und Messungen unter 5.1. Störaussendung dar.

Tabelle 1 - Hochfrequente elektromagnetische Abstrahlung

Anschluss (Tor)	Frequenzbereich	Grenzwerte	Prüfverfahren	Anwendbarkeit	Bemerkungen
Gehäuse	30 MHz bis 230 MHz 230 MHz bis 1 000 MHz	30 dB(µV/m) bei 10m 37 dB(µV/m) bei 10m	CISPR 22, Klasse B	Siehe Anmerkung 1	Statistische Bewertung nach Grundnorm
Wechselspannungsnetz	0 bis 2 kHz		IEC 61000-3-2 IEC 61000-3-3	Siehe Anmerkung 2	Statistische Be- wertung nach Grundnorm
	0,15 MHz bis 0,5 MHz	66 dB(µV) bis 56 dB(µV) Pulsbewertet	CISPR 22, Klasse B		
	Grenzwerte erhöhen sich linear mit dem Logarith- mus der Frequenz	56 dB(µV) bis 46 dB(µV) Mittelwert			
	0,5 MHz bis 5 MHz	56 dB(µV) pulsbewertet 46 dB(µV) Mittelwert			
	5 MHz bis 30 MHz	60 dB(µV) pulsbewertet 50 dB(µV) Mittelwert			
Lastanschlüsse	0,15 MHz bis 30 MHz	Siehe Grundnorm, Abschnitt: Diskontinuierliche Störungen	CISPR 14-1		
Anmerkung 1	Nur anwendbar für RS mit Datenverarbeitungseinrichtungen, z.B. Mikroprozessoren, die mit Frequenzen höher als 9 kHz arbeiten.				
Anmerkung 2	Nur anwendbar für Betriebsmittel, die in den Anwendungsbereich von IEC 61000-3-2 und IEC 61000-3-3 gehören. Grenzwerte für RS, die gegenwärtig von IEC 61000-3-2 und IEC 61000-3-3 nicht erfasst werden, sind in Beratung.				

Es werden hier mehrere Arten von Störaussendung unterschieden:

- Leitungsgeführte Aussendung von Störungen
- Über das Gehäuse ausgesendete Störungen
- Störungen welche über Lastanschlüsse ausgesendet werden.

Letztere werden in unserem Fall nicht berücksichtigt, da keine Lastanschlüsse an unserem Gerät vorhanden sind. Die leitungsgeführten über das Wechselspannungsnetz abgestrahlten Störungen werden mit folgendem Prüfaufbau, welcher in Abb. 2 dargestellt ist, ermittelt. Die in diesem Abschnitt nachfolgenden Abbildungen wurden größtenteils dem Buch Elektronische Schaltungstechnik[9] entnommen.

¹² EN60730-1:2011, Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit – Störaussendung [8]

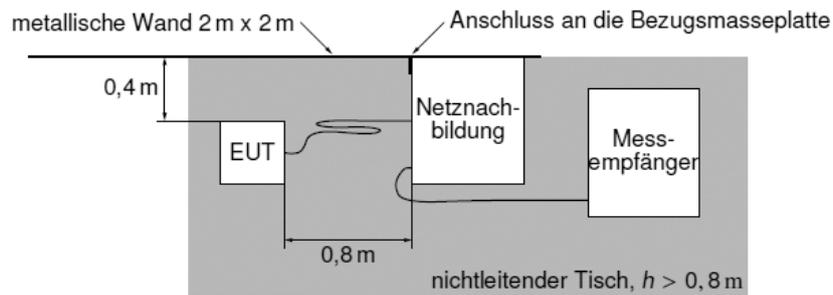


Abb. 2 - Aufbau zur Messung von Funkstörspannung auf Leitungen [9]

Dabei wird erkennbar, dass hier das verwendete Netzgerät ausschlaggebend sein wird. Wird ein Netzgerät mit CE Kennzeichnung verwendet kann davon ausgegangen werden, dass die Prüfung ohne Probleme bestanden werden kann. Zwar könnten sich theoretisch Störungen, wenn die Störpegel groß genug sind, auf der Sekundärseite über verschiedene Kopplungsarten, vorwiegend aber eher kapazitiv, auf die Netzseite übertragen, jedoch besitzt ein vernünftiges Netzteil große Eingangsfilter, sodass auch in diesem Fall von den Störungen am Messempfänger nicht mehr viel erkennbar sein sollte.

Die Messung von Hochfrequenten elektromagnetischen Feldern muss auch in einer speziellen HF Messzelle (Abb. 3) in einem genau definierten Normaufbau erfolgen.

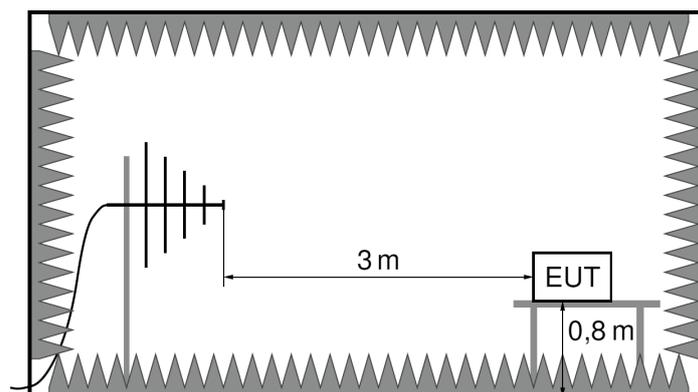


Abb. 3 - Messzelle zur Erfassung Hochfrequenter EM-Felder [9]

Die vom, auf einem 80cm hohen Holztisch stehenden, Prüfling ausgesendeten Störungen werden von einer Antenne erfasst und spektral im Bereich zwischen 30MHz und 1GHz ausgewertet. Zur Erfassung mehrerer Ausbreitungsrichtungen muss der Prüfling auf dem Holztisch in 45° Schritten gedreht werden, da die Messzelle mit HF Absorbern ausgestattet ist und nur die direkte Ausbreitungsrichtung in Richtung Antenne erfasst werden kann. Das Kabel wird, sofern es länger ist als 0,8m, in einem Abstand von 30cm vom Prüfling aus Mäanderförmig zusammengefasst.

Warum die Einhaltung der Grenzwerte so wichtig ist, kann besonders gut am Beispiel eines Radios veranschaulicht werden. Da dieser in seinem Empfangsbereich (UKW ~100MHz) sehr empfindlich ist muss darauf geachtet werden, dass die in diesem Bereich emittierten Störungen um ein wesentliches kleiner als das empfangene Radiosignal sind, ohne hörbare Störungen zu verursachen. Umgekehrt gibt es auch Störfestigkeitsprüfungen, welche das Gerät ohne einen Fehler zu produzieren, bestehen muss. Dies wird jedoch im nächsten Abschnitt genauer betrachtet werden.

2.3.2. Durchzuführende Messungen die Störfestigkeit betreffend

Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit – **Störfestigkeit:** „Elektronische Regel und Steuergeräte müssen so konstruiert sein, dass sie den im bestimmungsgemäßen Gebrauch vorkommenden netzseitigen Störungen und elektromagnetischen Erscheinungen standhalten.“¹³

Prinzipiell kann auch bei den Störfestigkeitsprüfungen zwischen vielen verschiedenen Prüfungen unterschieden werden:

Tabelle 2 - Einteilung und Übersicht über Prüfungen

Deklaration für Regel- und Steuergerät	Installations- und Umweltbedingungen									
	ESD		Abgestrahtes EMF-Feld			Burst	Spannungsstoß	Leitungsgeführte Störgröße	Magnetfelder mit energietechnischen Frequenzen	Spannungseinbrüche und -unterbrechungen
	Umweltklasse EN 6100-4-2		Umweltklasse EN 6100-4-3 ^d			Umweltklasse EN 6100-4-4	Installationskategorie ^e EN 6100-4-5	Umweltklasse EN 6100-4-6	Umweltklasse EN 6100-4-8	Umweltklasse EN 6100-4-11
EMV-Schärfe-grad	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 2	Klasse 2	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 2	Klasse 2	Klasse 2	Klasse 2
Wohnbereich ^a	Kontaktentladung	Luftentladung	< 1.0 GHz	1.4 – 2.0 GHz	2.0 – 2.7 GHz	geschützt	Stromversorgungs- und Signalkabel und –leitungen sind gut voneinander getrennt		gut geschützt	
EMV-Schärfe-grad	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 3	Klasse 2	Klasse 1	Klasse 3	Klasse 3	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 3
Industrie ^b	Kontaktentladung	Luftentladung	< 1.0 GHz	1.4 – 2.0 GHz	2.0 – 2.7 GHz	typisch für Industrie	Stromversorgungs- und Signalkabel und –leitungen verlaufen parallel		typisch für Industrie	

^a Wohnbereich – Anwendung der Regel- und Steuergeräte ist eingeschränkt auf Wohnbereich und auf Gewerbe- und Leichtindustrialumgebung (EN 61000-6-1).
^b Industrie – Zusätzlich zum Wohnbereich sind diese RS auch für Industrialumgebungen geeignet (IEC 61000-6-2).
^c Installationskategorien EN 60730-1, Anhang R.
^d EN 61000-4-20 darf für kleine Betriebsmittel, wie in EN 61000-4-20, 6.1 angegeben, verwendet werden.

¹³ EN60730-1:2011, Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit – Störfestigkeit [8]

Eine Beurteilung ob eine Störfestigkeitsprüfung bestanden wurde, ist nach folgenden Kriterien definiert und für jede vorgenommene Prüfung einzeln zu bewerten.

„Im Anschluss an die Prüfung muss das RS die Anforderungen entsprechend Abschnitt 8, 17.5 und Abschnitt 20 erfüllen. Wenn das RS im Ergebnis der Anwendung der Prüfungen, die in Anhang ZD festgelegt sind, gefährlich oder unsicher wird, dann ist das RS so anzusehen, dass es bei dieser Prüfung versagt hat.“¹⁴

Tabelle 3 - Kriterien für die Übereinstimmung

Betriebsbedingungen	Kriterien für die Übereinstimmung		
	A	B	C
Digitale Eingänge/Ausgänge	Keine Abweichung an Eingangswerten Keine Abweichung an Ausgangseinstellungen (keine Zustandsänderung)	Keine Abweichung an Eingangswerten Keine Abweichung an Ausgangseinstellungen (keine Zustandsänderung)	Jeder Fehler, wie eine Zustandsänderung, Zerstörung von Daten und Verlust einer Verbindung ist unter der Voraussetzung zulässig, dass der Ausgangszustand nach der Prüfung wieder selbsttätig hergestellt wird. – Selbsttätige Wiederherstellung nach der Prüfung. ^b
Analoge Eingänge/Ausgänge	Abweichung entsprechend der Angabe in der Spezifikation des Endproduktes ist zulässig. ^a	Während der Prüfung ist Abweichung zulässig.	
Anzeige	Betrieb muss bei gerechtfertigtem Komfort möglich sein.	Abweichung ist zulässig (z.B. Fehler der Anzeige wie Flimmern)	
Lokales Umgehen/Schalten durch Bediener	Keine Abweichung	Abweichung ist für analoge Werte zulässig. Keine Änderung des Zustands bei digitalen Werten	
Kommunikationsanschlüsse	Keine Abweichung, die vom Anwender feststellbar ist Die verringerte Datenübertragungsgeschwindigkeit muss für den RS-Betrieb angemessen sein.	Abweichung ist zulässig Ausfall der Kommunikation während der Prüfung – Selbsttätige Wiederherstellung nach der Prüfung	
^a Die zulässige Abweichung hinsichtlich des Wertes ohne elektromagnetische Störung. Das bedeutet, dass jede Grundabweichung vernachlässigt wird. ^b Dieses Kriterium für die Übereinstimmung beruht auf der Tatsache, dass der Betrieb des RS in der Endanwendung beim Nutzer ohne Überwachung erfolgt.			

Bei den Prüfungen wird der Prüfling daher beobachtet und beurteilt ob Störungen aufgetreten sind. Je nach anzuwendendem Kriterium für die Übereinstimmung ist es beispielsweise zulässig kurzzeitige Anzeigefehler (z.B.: flackern der Anzeige) zu tolerieren, solange diese nicht persistent bleiben und die Benutzererfahrung dadurch nicht stark beeinträchtigt wird (siehe Übereinstimmungskriterien).

Die vielen verschiedenen Normaufbauten zu den einzelnen Prüfungen sind in den zutreffenden Fachgrundnormen Störfestigkeit (EN 61000-4-x) zu finden.

¹⁴ EN60730-1:2011, Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit – Störfestigkeit [8]

Auch ESD¹⁵ Tests fallen in den Bereich der Störfestigkeitsprüfungen. Auch hier sind die Prüfpegel und Prüfkriterien je nach Einsatzgebiet des Prüflings unterschiedlich und müssen diesen, in der unten angeführten Tabelle 4, entsprechen. Der Prüfaufbau ist laut Norm EN 61000-4-2 folgend definiert:

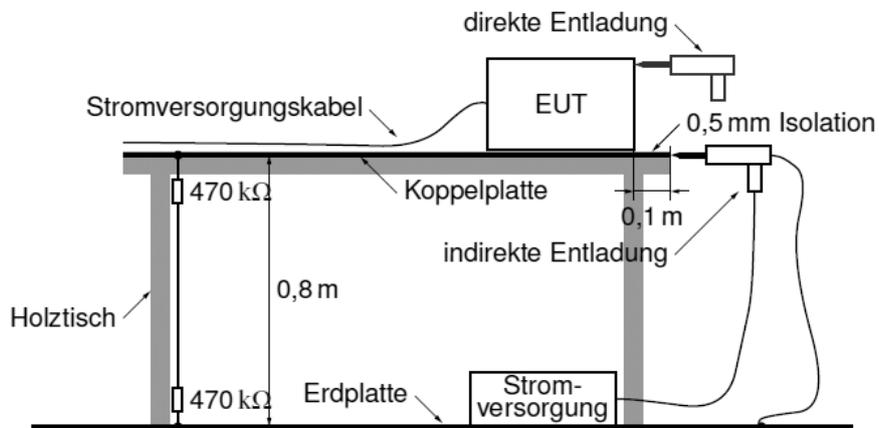


Abb. 4 - Prüfaufbau zur Prüfung der Störfestigkeit gegenüber ESD [9]

Tabelle 4 - Prüfschärfegrad für elektrostatische Entladungen

Deklaration für Regel- und Steuergerät EMV-Schärfegrad	Kontaktentladung	Luftentladung
	Prüfspannung kV	Prüfspannung kV
Wohnbereich und Industrie	Direkt	8
	Indirekt	Nicht anwendbar

Übereinstimmungskriterium B (siehe Tabelle ZD.2)

¹⁵ Electro static discharge

Der Messaufbau bei der Störfestigkeitsprüfung gegenüber äußeren elektromagnetischen Feldern ist grundsätzlich derselbe wie bei der Messung von HF-Störaussendung (Abb. 3). Diesmal wird aber die Antenne dazu benutzt um den Prüfling gezielt einem Feld mit vorgegebener elektrischer Feldstärke auszusetzen.

Tabelle 5 - Prüfschärfegrad für hochfrequente elektromagnetische Felder an Gehäusen

Deklaration für Regel- und Steuergerät EMV-Schärfegrad	Frequenzbereich		
	80MHz bis 1 GHz	1,4 GHz bis 2 GHz	2,0 GHz bis 2,7 GHz
	Elektrische Feldstärke V/m	Elektrische Feldstärke V/m	Elektrische Feldstärke V/m
Wohnbereich	3	3 ^a	1 ^a
Industrie	10 ^b	3 ^a	1 ^a

^a Dieser Frequenzbereich wurde ausgewählt, um die Frequenzen mit dem höchsten wahrscheinlichen Störrisiko zu erfassen.
^b Außer für die ITU-Rundfunkfrequenzbänder 87 MHz bis 108 MHz, 174 MHz bis 230 MHz und 470 MHz bis 790 MHz, in denen der Schärfegrad 3 V/m betragen muss.

Übereinstimmungskriterium A (siehe Tabelle ZD.2)

Außerdem muss der Prüfling, sofern dieser magnetisch empfindliche Bauelemente, wie beispielsweise Hallensoren enthält, Magnetfeldern mit energietechnischen Frequenzen ausgesetzt werden. Darunter versteht man ein homogenes 50Hz Magnetfeld (Europa) welches mit Spulen im Helmholtz Aufbau erzeugt wird.

Tabelle 6 - Prüfschärfegrad für hochfrequente elektromagnetische Felder an Gehäusen

Deklaration für Regel- und Steuergerät EMV-Schärfegrad	Magnetische Feldstärke A/m	Frequenz Hz
Wohnbereich	3	50/60 ^a
Industrie	30	50/60 ^a

^a Diese Prüfung ist bei den Frequenzen durchzuführen, die den Frequenzen der Stromversorgung entsprechen. Einrichtungen für den Einsatz in Bereichen, die nur mit einer dieser Frequenzen versorgt werden, brauchen nur bei dieser Frequenz geprüft zu werden (ZD.3, Anforderung 609)

Übereinstimmungskriterium A: (siehe Tabelle ZD.2)

Schnelle Transienten, sogenannte Bursts, entstehen beispielsweise beim Schalten induktiver Lasten mit einem nicht idealen Schalter und werden kapazitiv in die Netzzuleitung eingekoppelt.

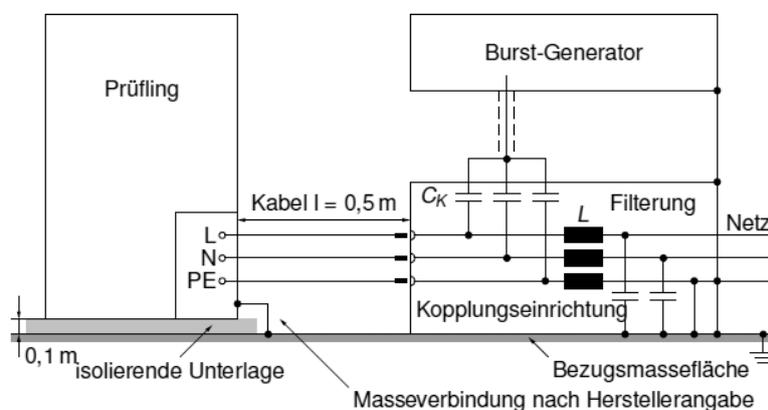


Abb. 5 - Prüfaufbau zur Einkopplung von schnellen Transienten in die Netzzuleitung (Bursts) [9]

Schnelle transiente Störungen müssen nicht nur kapazitiv auf der Netzzuleitung eingekoppelt werden, sondern auch in Leitungen, welche an dem Gerät angeschlossen werden können und deren Leitungslänge mehr als 3m beträgt. Daher muss diese Prüfung auch für die Ethernet Leitung durchgeführt werden. Alle anderen Schnittstellen werden dieser Prüfung nicht unterzogen, da die Leitungslänge jedenfalls kürzer als 3m ist.

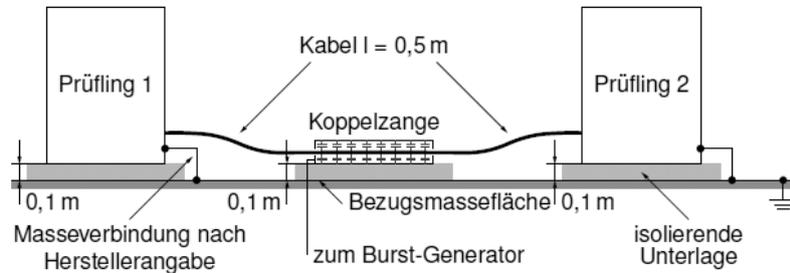


Abb. 6 - Prüfaufbau zur kapazitiven Einkopplung schneller Transienten in Signal und Datenleitungen [9]

Eine Einkopplung der Bursts kann dann kapazitiv oder per CDN¹⁶ erfolgen.

Tabelle 7 - Prüfschärfegrad für Burst

Deklaration für Regel- und Steuergerät	Leerlauf-Ausgangs-Prüfspannung und Wiederholrate der Impulse			
	Stromversorgungsanschluss, Schutzterde		Ein-/Ausgangs-Anschlüsse von Signal-, Daten- und Steuerleitungen	
EMV-Schärfegrad	Spannungsspitzenwert kV	Wiederholrate kHz	Spannungsspitzenwert kV	Wiederholrate kHz
Wohnbereich	1	5	0,5	5
Industriell	2	5	1	5

Tabelle 8 - Prüfanwendung der Prüfung mit schnellen transienten elektrischen Störgrößen/Burst

Wechselstromversorgung und Steuerausgang für den direkten Anschluss an die Versorgung		Gleichstromversorgung und Steuerausgänge für den direkten Anschluss an die Versorgung	Datenleitungen ^a
Direkte Anwendung über die Trennkoppelstufe (CDN) nach EN 61000-4-4 zwischen der Bezugsmasseebene und...	jeder Stromversorgungsleitung einzeln	Kapazitive Koppelzange ^b	Kapazitive Koppelzange
	dem nächstliegenden Schutzleiteranschluss		
	zu allen Mehrfachkombinationen von Stromversorgungsleitungen und auch der Schutzterdeleitung		
^a Nur anwendbar für Leitungen mit einer Länge > 3 m nach der Angabe des Herstellers (ZD.3, Anforderung 608). ^b Nicht anwendbar für Leitungen, die an fest zugeordnete, nicht wiederaufladbare Stromversorgungen angeschlossen sind.			

Übereinstimmungskriterium B (siehe Tabelle ZD.2)

¹⁶ Coupling Decoupling Network

Leitungsgeführte hochfrequente Störungen sind per CDN in die Leitungen einzukoppeln

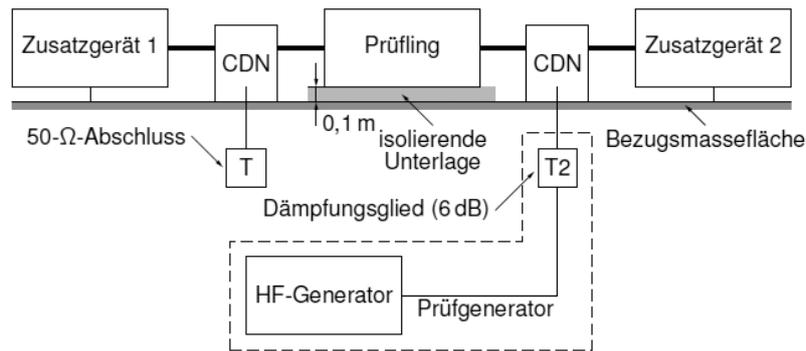


Abb. 7 - Prüfaufbau zur Einkopplung Leitungsgeführter Störgrößen auf Netzleitungen Signal und Datenleitungen [9]

Der Prüfling wird entsprechend der Festlegung montiert, mit Bemessungsspannung versorgt und bei repräsentativen Betriebsbedingungen betrieben. Das RS wird nach EN 61000-4-6 geprüft. Der gesamte Frequenzbereich muss mindestens einmal durchlaufen werden. Die Prüfpegel sind laut Tabelle 9 folgend definiert:

Tabelle 9 - Prüfschärfegrad für leitungsgeführte Störgrößen auf Netzleitungen, Ein- Ausgangsleitungen und Gleichstromversorgungsleitungen

Deklaration für Regel- und Steuergerät EMV-Schärfegrad	Frequenzbereich: 150 kHz bis 80 MHz	
	Spannungspegel (EMK)	
	U_0 dB μ V	U_0 V
Wohnbereich	130 ^{acd}	3 ^{acd}
Industriell	140 ^{abc}	10 ^{abc}

^a Der Prüfpegel darf auch als äquivalenter Strom in einer 150- Ω -Last festgelegt werden.
^b Außer für das ITU-Rundfunkfrequenzband 47 MHz bis 68 MHz, für das der Pegel 3 V betragen muss.
^c Für Ein-/Ausgangsleitungen nur dann anwendbar, wenn die Gesamtkabellänge nach der Funktionsspezifikation des Herstellers 3 m überschreiten darf.
^d Für Eingangs- und Ausgangsleitungen der Gleichstromversorgung nur anwendbar, wenn die Gesamtkabellänge nach der Funktionsspezifikation des Herstellers 3m überschreiten darf.

Übereinstimmungskriterium A (siehe Tabelle ZD.2)

Zusätzliche unerwartete Störungen können auf der Netzzuleitung auftreten und den Prüfling stören oder beschädigen. Energiereiche Störungen (Surge) stellen oft eine Gefahr dar und können den Prüfling sogar zerstören. Da diese Prüfungen die Netzzuleitung betreffen, wirken sich diese in erster Linie nur direkt auf das verwendete Netzgerät aus. Daher muss, um diese Prüfungen zu bestehen, ein geeignetes Netzgerät ausgewählt werden. Nachfolgend sind der Normaufbau, sowie die anzuwendenden Prüfpegel angeführt.

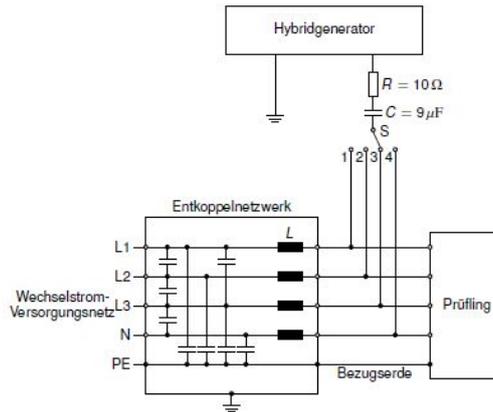


Abb. 8 - Einkopplung energiereicher transienten (Surge) [9]

Tabelle 10 - Prüfschärfegrad für Spannungstöße

Deklaration für Regel- und Steuergerät	Prüfschärfegrad kV											
	Wechselstromversorgung und Wechselstrom-Ein-/Ausgänge, die direkt mit dem Netz verbunden sind		Wechselstromversorgung und Wechselstrom-Ein-/Ausgänge, die nicht direkt mit dem Netz verbunden sind		Gleichstromversorgung und Gleichstrom-Ein-/Ausgänge, die direkt daran angeschlossen sind		Unsymmetrisch betriebene Stromkreise und Leitungen ^c		Symmetrisch betriebene Stromkreise und Leitungen ^c		Geschirmte Ein-/Ausgangs- und geschirmte Kommunikationsleitungen	
	Kopplungsart		Kopplungsart		Kopplungsart		Kopplungsart		Kopplungsart		Kopplungsart	
EMV-Schärfegrad	zwischen Leitung und Leitung	zwischen Leitung und Erde	zwischen Leitung und Leitung	zwischen Leitung und Erde	zwischen Leitung und Leitung	zwischen Leitung und Erde	zwischen Leitung und Leitung	zwischen Leitung und Erde	zwischen Leitung und Leitung	zwischen Leitung und Erde	zwischen Leitung und Leitung	zwischen Leitung und Erde
Wohnbereich	0,5	1,0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,5	1,0	n.a.	1,0	n.a.	0,5
Industriell	1,0	2,0	1,0 ^d	2,0 ^{ad}	0,5 ^e	0,5 ^e	1,0 ^b	2,0 ^{ab}	n.a.	2,0 ^{ab}	n.a.	2,0 ^b

^a Im Regelfall mit Primärschutz geprüft, sofern vom Hersteller nicht anders angegeben (ZD.3. Anforderung 604).
^b Der Prüfschärfegrad darf auf den nächstniedrigeren verringert werden, wenn die Kabellänge ≤ 30 m beträgt (ZD.3. Anforderung 605).
^c Diese Prüfung ist nicht für Verbindungsleitungen anwendbar, die als Datenleitungen eingesetzt werden und eine Länge ≤ 10 m haben (ZD.3. Anforderung 606).
^d Wenn ein vorgelagerter Schutz vor dem Prüfling festgelegt ist, sollt der Prüfschärfegrad dem Schutzschärfegrad entsprechen, wenn dieser Schutz nicht vorhanden ist (Tabelle ZD.3. Anforderung 607).
^e Nicht anwendbar auf Anschlüsse, die für den Anschluss an eine Batterie oder an eine wiederaufladbare Batterie vorgesehen sind, die zum Aufladen vom Betriebsmittel entfernt oder abgetrennt werden muss. Betriebsmittel mit Gleichstromleistungseingang, vorgesehen für einen AC-DC-Adapter, müssen mit dem AC-Eingang, wie vom Hersteller angegeben, geprüft werden oder, wenn es nicht angegeben ist, mit einem typischen AC-DC-Adapter. Gleichstromanschlüsse, die nicht dafür vorgesehen sind, an DC-Verteilungsnetze angeschlossen zu werden, werden als Signalanschlüsse betrachtet.

Übereinstimmungskriterium B (siehe Tabelle ZD.2)

Zuletzt müssen noch Spannungseinbrüche und Unterbrechungen nach EN 61000-4-11 geprüft werden, da auch bei kurzen Netzschwankungen für den Benutzer kein Nachteil in der Verwendbarkeit des Gerätes entstehen darf:

Tabelle 11 - Spannungseinbrüche (50 Hz/60 Hz)

Deklaration für Regel- und Steuergerät EMV-Schärfegrad	Spannung Verringerung ΔU	Dauer in Perioden 50Hz/ 60 Hz	Übereinstimmungskriterium (siehe Tabelle ZD.2)
Wohnbereich und Industrie	30 %	25/30	C
Industrie	60 %	10/12	C

Anmerkung: Spannungsverschiebung im Nulldurchgang

Tabelle 12 - Spannungsunterbrechung (50 Hz/60 Hz)

Deklaration für Regel- und Steuergerät EMV-Schärfegrad	Spannung Verringerung ΔU	Dauer in Perioden	Übereinstimmungskriterium (siehe Tabelle ZD.2)
Wohnbereich	100 %	0,5	B
Wohnbereich und Industrie	100 %	1	B
Wohnbereich und Industrie	100 %	250/300	C

3. Systemarchitektur

Das zu entwickelnde System sollte allen o.a. Anforderungen genügen. Daher wurde entschieden zu Gunsten einer besseren Erweiterbarkeit des Gesamtsystems, eine flexible Systemarchitektur zu wählen. Die Flexibilität wird dadurch erreicht, dass prinzipiell eine Unterscheidung zwischen dem Hauptgerät dem Smart Energy Manager, welcher das primäre Anzeige- und Eingabegerät und die geforderten Schnittstellen enthält und den über RF oder per LAN Netzwerk verbundenen Aktoren getroffen werden muss. Für einen späteren Zeitpunkt geplante Erweiterungsmodule oder IP-Gateways, die Funktionen oder Schnittstellen anbieten, welche von kommerziellen Herstellern noch nicht angeboten werden, werden in diesem Dokument in weiterer Folge als IO-Extender oder spezielle IP-Gateways bezeichnet und sind nicht Teil dieser Arbeit.

In Abb. 9 ist der Entwurf des Gesamtsystems dargestellt und soll einen groben Überblick darüber verschaffen in welcher Art Verbraucher vom SEM gesteuert und wie IP Gateways verbunden werden, da besonders neue Schnittstellentypen, schon in baldiger Zukunft interessant werden könnten. Beispielsweise gibt es unzählige Sensoren des enOcean Standards, welche die notwendige zum Betrieb benötigte Energie durch Energy harvesting zur Gänze aus Ihrer Umgebung beziehen, ohne eine zusätzliche Energiequelle, wie zum Beispiel eine leere Batterie die ersetzt werden muss, zu benötigen. Viele der neuen Verbindungsstandards haben sich jedoch noch nicht am Markt etabliert oder sind noch in einem frühen Entwicklungsstadium, sodass eine Implementierung eines solchen neuen Standards direkt im SEM möglicherweise auch nicht wie gewünscht die Akzeptanz am Markt erreichen würde. Einzig der ZWave Standard bietet schon eine Vielzahl an den für unser System benötigten Sensoren und Aktoren an, sodass entschieden wurde, auch aufgrund der niedrigen Lizenz und Modulkosten, ein ZWave - RF Modul direkt auf den SEM zu integrieren.

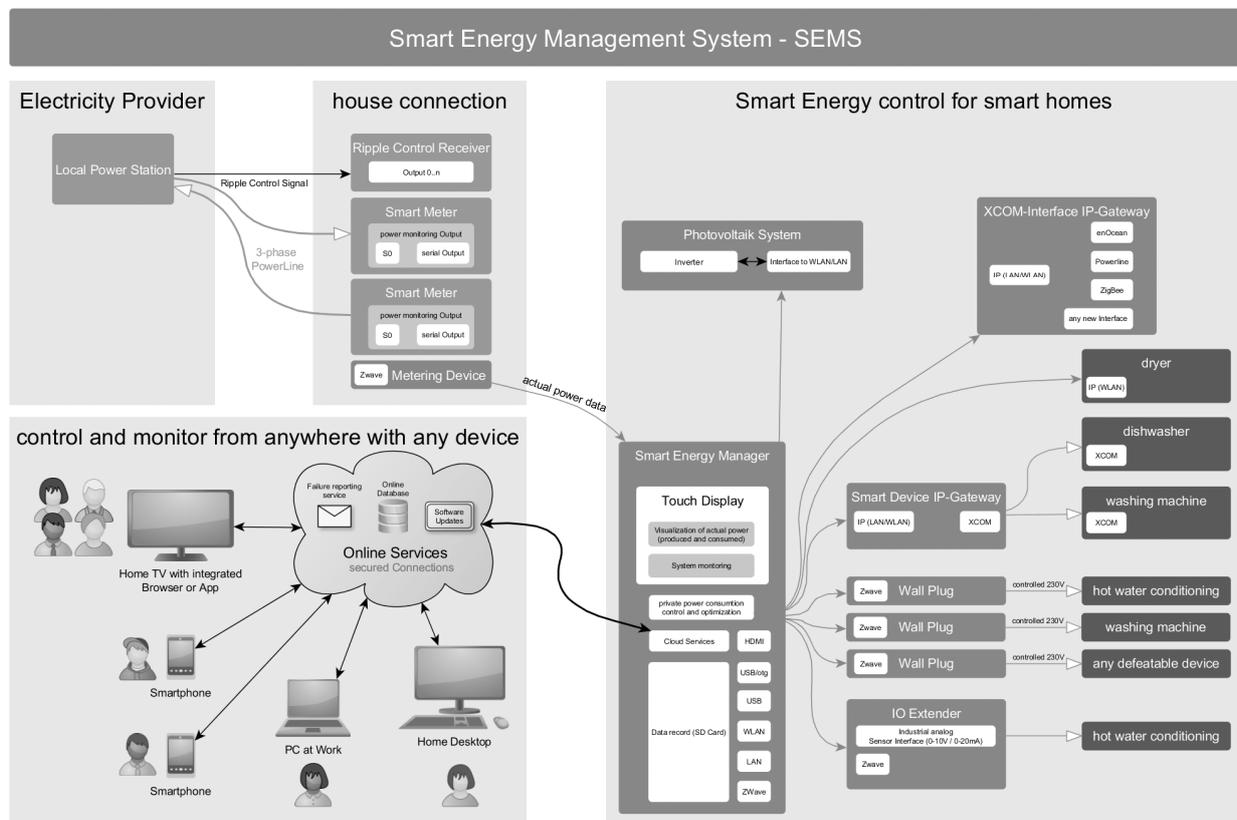


Abb. 9 - Gesamtsystemübersicht SEMS

3.1. Systemkomponenten und Schnittstellen

In diesem Abschnitt werden die Auswahlkriterien für die wichtigsten Systemkomponenten, welche den Hauptteil dieser Arbeit darstellen und für den Smart Energy Manager notwendig sind, erläutert. Die spezielle Implementierung einzelner Komponenten wird dann im Abschnitt 3.3. nochmals genauer diskutiert.

3.1.1. Netzteil

Obwohl anfänglich ein internes 230V Netzteil eingeplant war, wurde im Laufe des Projektes aus mehreren Gründen ein externes Netzteil als bevorzugte Variante identifiziert.

- Da die Sicherheit eine große Rolle spielt und das Gehäuse als Aluminiumgehäuse ausgeführt wird, ist es ob der geringen Bauhöhe schwierig alle notwendigen Schutzabstände einzuhalten.
- Des Weiteren war gefordert, dass das Gerät nur geringfügig größer als das verwendete Display sein soll, das Display jedoch aufgrund von Kostenfaktoren nur 7“ Diagonale besitzen wird, wurde auch aus platztechnischer Sicht auf eine Integration des 230V Netzteils verzichtet.
- Die Entwicklungskosten steigen stark aufgrund des höheren Entwicklungs-, sowie Prüf- und Testaufwandes.

Die Ausgangsspannung des Netzteils sollte dann idealerweise zwischen 10V und 24V liegen um alle notwendigen Betriebsspannungen für Peripherie und Prozessor mit Step Down Wandlern generieren zu können.

Da die Spitzenleistungsaufnahme nur knapp über 10W liegen soll, dies jedoch aber auch stark vom verwendeten Display und Prozessor abhängig ist, sind Netzgeräte in der Leistungsklasse von 12-18W interessant. Aufgrund der Verfügbarkeiten von verschiedensten Netzteilen haben wir uns für ein europäisches Produkt der Firma Stontronics mit DC Rundstecker entschieden: T3510ST¹⁷ (15V \ 18W)



Abb. 11 - ausgewähltes Netzteil

Dieses Netzteil erfüllt laut Datenblatt nicht nur alle in der EU für dieses Produkt geltenden Normen (CE Kennzeichnung) sondern des Weiteren auch die von der EU für ErP¹⁸ \ EuP¹⁹ geforderten hohen Effizienz Anforderungen²⁰ welche schon bald verschärft geltend werden. Der Aufdruck am Netzteil römisch V beschreibt Leistungsklasse 5 welcher von Erfüllung der höchsten Energy Star²¹ Richtlinien zeugt die den ErP/EuP Richtlinien der EU sehr ähnlich sind.



Abb. 10 - Kennzeichnungen am Netzteil

¹⁷ <http://stontronics.com/products/switch-mode-power-supplies/plug-go-power-supplies/18w-level-vi-plug-go-range.html>

¹⁸ ErP...Energy related Product

¹⁹ EuP...Energy using Product

²⁰ http://www.erp-richtlinie.at/fileadmin/eup/docs/EU-Verordnung_Netzteile.pdf

²¹ http://www.energystar.gov/ia/partners/prod_development/revisions/downloads/International_Efficiency_Marking_Protocol.pdf

3.1.2. Mensch Maschine Schnittstelle

Die Mensch Maschine Schnittstelle, oder auch HMI²² genannt, ist das Display mit Touchscreen, also das zentrale Bedienteil des SEM. Das Display soll den heutigen Ansprüchen genügen, darf aber keinesfalls zu teuer sein um eine hohe Marktakzeptanz zu erreichen. Folgende Punkte können das Display charakterisieren und sind für den Ersteindruck des Produkts äußerst wichtig:

- Größe
- Pixeldichte
- Blickwinkel
- Helligkeit
- Verarbeitung
- Langzeitverfügbarkeit

Wird auch nur einer der Punkte nicht berücksichtigt kann schnell der Eindruck entstehen, dass es sich um ein billiges oder minderwertiges Produkt handelt. Die Bedienbarkeit und Haptik des Geräts soll stark an die von aktuellen Premium Tablets erinnern und keinesfalls den Eindruck von veralteter Technik, oder „Technik des letzten Jahrhunderts“ vermitteln.

Selbiges gilt auch für den Touchscreen. Oft wird heute noch bei industriellen Steuerungen oder Heimautomatisierungssystemen auf ein, in die Jahre gekommenes, resistives Touch Panel gesetzt, da dieses leicht zu verarbeiten und besonders einfach erst in einem späteren Arbeitsschritt auf das Display aufzubringen ist. Ein großer Nachteil liegt dabei sicherlich in der Genauigkeit der Positionsbestimmung von Druckpunkten, abgesehen davon, dass eine Multi-Touch Funktionalität nicht möglich ist.

Ein kapazitiver Sensor hingegen muss zumeist mit optischem Kleber hinter das Displayglas aufgebracht werden. Aus diesem Grund sind Displays mit kapazitiven Touch Sensoren die teurere Lösung. Daher gibt es einige Displays welche als Komplettlösung, also Display incl. kapazitiver Sensor fertig mit der Glasfront verklebt, angeboten werden. Da wir ein besonders günstiges Angebot für eine solche Lösung erhalten haben, entschieden wir uns für die Komplettlösung, da dadurch auch ein Arbeitsschritt, das Verkleben des Touch Sensors, eingespart werden kann.

Schlussendlich haben wir uns für ein Display welches von der Firma DATA IMAGE angeboten wird entschieden. Es handelt sich um ein 7“ Display mit 800x480px Auflösung und schon werksseitig verklebtem kapazitiven Touch Sensor, Hintergrundbeleuchtung und notwendiger Elektronik, sodass nur mehr eine I²C Schnittstelle, zum Auslesen des Druckpunktes am Display, sowie eine Parallele RGB TTL Schnittstelle benötigt werden. Die Auflösung mit 800x480 Bildpunkten scheint zwar für heutige Standards etwas gering, ist aber dem Ersteindruck nach für diese Anwendung mehr als ausreichend, da Schriften und Bedienelemente in unserer Anwendung eine Mindestgröße von mehreren Millimetern aufweisen müssen, hingegen bei neueren Smartphones Schriftarten schon sehr klein, in Größen von 1mm und kleiner dargestellt werden müssen. Die benötigten Schnittstellen für das Display werden auch bei der Prozessorauswahl zu berücksichtigen sein. Die nachfolgende Abb. 12 zeigt das Display und seine Anschlüsse.

²² Human Machine Interface

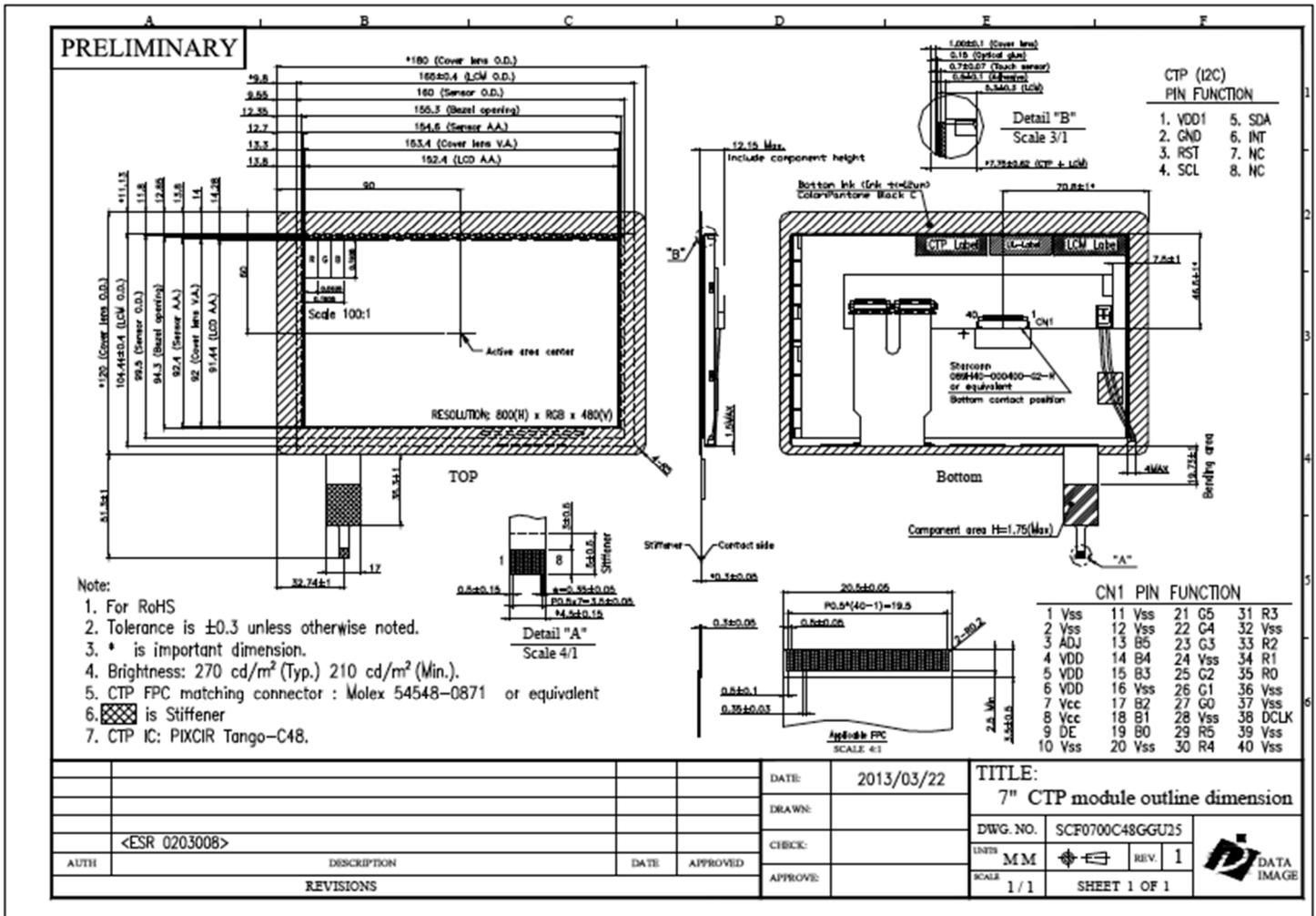


Abb. 12 - Display - Touch Kombination - Abmessungen, Auszug aus Datenblatt

Zusätzlich zum optischen Feedback bei Benutzerinteraktion, wird bei den Prototypen ein Vibrationsmotor eingebaut. Dieser soll die Anforderung des haptischen Feedbacks erfüllen und dem Benutzer ein besseres Gefühl dafür zu geben, wann er einen Bedienfeld gedrückt hat, bzw. wann eine Benutzereingabe erfolgt ist. Speziell für Menschen welche bisher keine Erfahrung mit neuen Geräten mit Touch Funktionalität hatten, soll damit ein hürdenloser Umgang mit dieser Technologie ermöglicht und damit die User Experience im gesamten gesteigert werden. Da der SEM zur Wandmontage vorgesehen ist, muss der Vibrationsmotor (Abb. 13) besonders stark ausgeführt werden, damit eine Vibration bei Berührung des Displays mit der Fingerspitze noch fühlbar bleibt.



Abb. 13 - Vibrationsmotor

3.1.3. Schnittstellen

Alle Schnittstellen, welche extern am Gerät verfügbar sind und vom Benutzer berührt werden können, müssen nicht nur den entsprechenden EMV Tests unterzogen werden, es sind auch spezielle Maßnahmen zu treffen um empfindliche Integrierte Schaltkreise gegenüber Elektrostatischen Entladungen zu schützen, welche in den Steckerkontakt direkt, oder auch am Kabelende durch einfache Berührung des Benutzers entstehen können.

Folgende Schnittstellen sind laut Anforderungsprofil gefordert und werden hier nochmal kurz etwas detaillierter besprochen:

- *Mikro SD Karten Slot [intern]*

Dieser wird verwendet um diverse Einstellungen und Benutzerdaten abzuspeichern um diese im Fehlerfall wiederherstellen zu können. Da es nicht vorgesehen ist, dass der Benutzer diesen Slot selbst mit einer SD Karte bestückt, wird dieser intern ausgeführt.



Abb. 14 - Micro SD Card Slot

- *Ethernet [extern]*

Die Ethernet LAN Schnittstelle (Abb. 15) ist neben WLAN eine der wichtigsten Schnittstellen im System, da Sie für spätere Erweiterungen auf andere Schnittstellen für IP-Gateways und auch zur Anbindung an Cloud Services benötigt wird. Viele der neuen Photovoltaik Umrichter besitzen neben RS232 oder RS485 auch Ethernet Schnittstellen um die aktuellen Leistungsdaten abzufragen. Damit könnte der Smart Home Power Manager quasi nahezu ohne zusätzlichen Installationsaufwand die aktuellen Leistungsdaten der Photovoltaikanlage abfragen und visualisieren.



Abb. 15 - Ethernetbuchse

- *USB Host Port [extern]*

Da es nicht vorgesehen ist, dass der Benutzer die Speicherkarte selbstständig aus dem Gerät nimmt, wurde ein USB Host Port eingeplant (Abb. 16), an welches ein USB Stick angeschlossen werden kann, um Daten vom Gerät auf andere Computer übertragen zu können, oder selbstständig Sicherungen des Systems durchführen zu können. Des Weiteren kann der Benutzer beispielsweise eigene Bilder seiner Räume von dem USB Stick einspielen, um sich einen besseren Überblick über die Verbrauchsdaten und Automatisierungsvorgänge einzelner Räume verschaffen zu können. Da es nicht geplant ist, längere Kabel (>3m Leitungslänge) an das Gerät anzuschließen sind auch keine speziellen EMV Prüfungen an dieser Schnittstelle vorzunehmen.



Abb. 16 - USB A-Buchse

- *micro USB otg [extern]*

Dieser Anschluss (Abb. 17) ist am Gerät vorgesehen und kann sowohl als Host, als auch als Client Port eingesetzt werden. Ein konkreter Einsatzzweck ist momentan noch nicht definiert, in der Serienproduktion kann dieser durchaus fehlen. Auch bei dieser Schnittstelle ist es nicht geplant, längere Kabel (>3m Leitungslänge) an das Gerät anzuschließen. Daher sind auch keine speziellen EMV Prüfungen an dieser Schnittstelle vorzunehmen.



Abb. 17 - Micro USB

- *HDMI [extern]*

Dieser Anschluss (Abb. 18) ist zum Anschluss größerer High Definition Anzeigegeräte vorgesehen. Da dieser erst in einer späteren Ausbaustufe der Software Verwendung finden wird, und die Anschlusskabel in der vorgesehenen Anwendung auch kürzer als 3m sein sollen, sind auch für diese Schnittstelle keine speziellen EMV Prüfungen vorgesehen.



Abb. 18 - HDMI

- *WiFi (802.11 b/g/n - 2,4GHz) [intern]*

Ein WiFi Modul kann über eine spezielle parallele SDIO Schnittstelle oder per mini PCIe an den Prozessor angeschlossen werden. Wichtig bei der Implementierung eines Moduls ist die Anpassung der Antenne und die Ausführung einer Antennenleitung mit einem Wellenwiderstand, welcher der Ausgangsimpedanz des WiFi Moduls angepasst ist. Im Zuge der Evaluation verschiedener Module haben wir uns für ein TiWi BLE Modul (Abb. 19) der Firma LS Research entschieden, da sich dieses durch eine lange Verfügbarkeit auszeichnet. Details dazu werden im Abschnitt 3.3.4. genauer besprochen. Da das Modul selbst schon spezielle Prüfkennzeichen besitzt, kann davon ausgegangen werden, dass es nicht notwendig ist Prüfungen die Sendeleistung betreffend, nochmals durchzuführen, sofern die vom Hersteller vorgeschlagenen Design Regeln möglichst genau eingehalten werden.

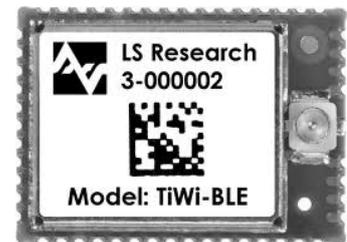


Abb. 19 - WLAN Modul

- *Z-Wave (ZM5304 - 868,42 MHz) [intern]*

Das RF Modul ist wie auch das WLAN Modul kommerziell erhältlich und besitzt schon spezielle Prüfkennzeichen, welche das Einhalten der geltenden Richtlinien für ISM Frequenzbänder garantieren. Auch dabei sind die vom Hersteller angegebenen Design Richtlinien zu berücksichtigen welche aber auch im Abschnitt 3.3.4. genauer besprochen werden. Prinzipiell ist die Implementierung des ZWave Moduls ZM5304 (Abb. 20) aber unkritischer, da dieses eine Antenne in helical Ausführung schon integriert hat und jegliche Anpassungen schon am Modul selbst vorgenommen sind.



Abb. 20 - ZWave Modul

- *Micro Combicon (optionale Spannungsversorgung) [extern]*

Für die Spannungsversorgung des Smart Home Power Managers ist ein Micro Combicon Stecker (Abb. 21) der Firma Phoenix Contact vorgesehen. Damit ist es möglich das optionale Unterputznetzteil direkt an das Gerät anzuschließen, auch ohne dass zusätzliches Werkzeug benötigt wird.



*Abb. 21 - Phoenix
Micro Combicon*

- *2,1mm DC Buchse (Spannungsversorgung) [extern]*

Da je nach Montageort ein anderes Netzteil verwendet werden kann ist auch ein Standard DC Stecker (Abb. 22) mit 2,1mm Pin vorgesehen, an den das mitgelieferte AC/DC Netzteil (Abschnitt 3.1.1. 2.2.1. 2.2.1.) angeschlossen werden kann. An die Buchse werden keinerlei besondere Anforderungen gestellt, da die erwarteten Ströme kleiner 1A sind.



*Abb. 22 - DC
Rundstecker Buchse*

Beide zur Spannungsversorgung verwendbaren Buchsen sind auf jeden Fall bestückt und deren Anschlüsse parallel geschaltet. Da danach ein weiterer Step-Down Regler (siehe Abschnitt 3.2.1.) die notwendigen Board- und Prozessorspannungen generiert, ist auf eine adäquate bidirektionale Filterung von HF Störungen auf der Versorgungsleitung besonders Wert zu legen. Diese Problematik der HF Abstrahlung durch die Versorgungsleitung bei ungenügender Filterung wird auch im Abschnitt 5.1.1. nochmals im Detail diskutiert und mit Messergebnissen dokumentiert.

3.1.4. Prozessor

Ein sehr wichtiger Punkt bei der Erstellung des Konzepts war die Auswahl des Prozessors. Dieser sollte auch genügend Potential haben, um in Zukunft genügend Grafikleistung für den Anschluss großer hochauflösender Displays zur Anzeige von Statistiken und Verbrauchsdaten zu bieten. In jeder Situation soll das User Interface schnell auf Benutzereingaben reagieren können, um die User Experience, wie die Benutzer Zufriedenheit in Informatiker-Kreisen genannt wird, möglichst hoch zu halten.

Auch der Preis des Prozessors, sowie seine maximale Verlustleistung, welche stark korreliert mit der Leistungsfähigkeit desselbigen ist, sind erhebliche Faktoren bei der Prozessorwahl.

Bei aktuellen Tablets sind Simulationen und Gehäuseoptimierungen zum thermischen Management Teil der Entwicklung des Geräts. Da gerade in diesem Bereich kein spezielles Know-how oder Simulations-Tools im Projektteam vorhanden sind, versuchen wir dafür auf „best-practice“ Implementierungen zurückzugreifen.

Aus diesen Gründen wurde ein Prozessor für embedded Anwendungen mit Multimedia Funktionalität gesucht. Schnell wurden dazu Prozessoren verschiedenster Hersteller aufbauend auf einer der leistungsfähigen ARM A7 – A15 Architekturen entdeckt.

Schlussendlich fiel die Wahl aber auf einen Freescale i.MX6 Prozessor, mit einer Arbeitsfrequenz von 1GHz, da dieser nicht nur die gewünschten Anforderungen an die benötigten Schnittstellen erfüllt, sondern auch in verschiedensten Ausführungen wie Single-, Dual-, Dual- und Quad -Core angeboten wird. Diese Entscheidung lässt möglichst viel Spielraum in Hinblick auf die Prozessorleistung, ohne dass die Gefahr besteht später oder während der Entwicklungsphase komplett auf eine andere Prozessorarchitektur, oder Serie wechseln zu müssen, wobei Single und Dual Core Versionen laut Herstellerangaben sogar ohne zusätzlichen Kühlkörper auskommen sollten. Trotzdem haben wir uns dazu entschieden, das Aluminiumgehäuse in der Art zu erweitern, sodass im

zusammengebauten Zustand, das Gehäuse gleichzeitig als Kühlkörper fungiert, und dadurch höhere Temperaturen im Gehäuseinnern vermieden werden können. In Abb. 23²³ ist der Single Core Prozessor inklusive der OnChip Peripherie abgebildet. Ein Vorteil der ARM – A9 Architektur ist, dass die Zahl der Prozessorkerne skaliert werden kann ohne dass sich die Prozessorperipherie von Dual Core bzw. Quad Core Varianten des Prozessors unterscheiden.

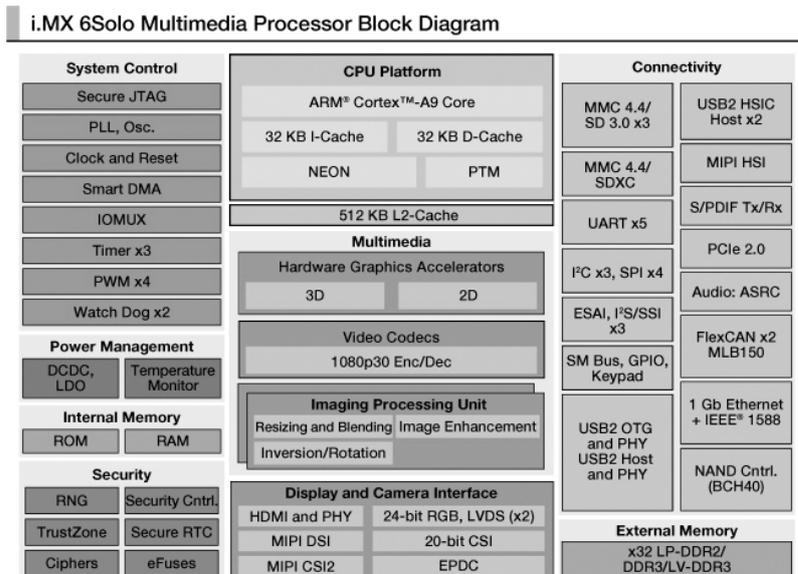


Abb. 23 - i.MX 6 Solo Block Diagramm

²³ <http://www.nxp.com/products/microcontrollers-and-processors/arm-processors/i.mx-applications-processors-based-on-arm-cores/i.mx-6-processors/i.mx6qp/i.mx-6solo-processors-single-core-multimedia-3d-graphics-arm-cortex-a9-core:i.MX6S>

Ob es wirklich notwendig sein wird, eine Multi Core CPU zu verwenden, wird sich erst zu einem späteren Zeitpunkt der Softwareentwicklung zeigen. Da aber ein embedded Linux als Betriebssystem eingesetzt wird, ergeben sich viele Vorteile:

- Verschiedene Tasks können in eigenen Threads laufen.
- Jeder Thread kann höher oder niedriger priorisiert sein.
- Den Threads welche User Eingaben verarbeiten bzw. jene die das Grafische User Interface aktualisieren, kann eine höhere Priorität zugewiesen werden, um die User Experience nicht zu verschlechtern. Studien zeigen, dass Reaktionszeiten von User Interfaces, die größer 0,1s sind, von Benutzern als unangenehm und langsam empfunden werden.
- Einzig das User Interface hat eine Echtzeitanforderung, alle anderen Tasks können als zeitunkritisch angesehen werden, da weder die verwendeten Funk-Standards noch Ethernet LAN Echtzeitfähigkeit besitzen.

Aus diesen Gründen kann angenommen werden, dass eine Single Core Variante mit 1Ghz Prozessortakt vermutlich ausreichend ist, da die verwendeten Kommunikationsschnittstellen per Definition keine Echtzeitfähigkeit garantieren können. Solange das User Interface schnell reagiert, ist es also zulässig, Berechnungen für das Steuern von Aktoren, oder das Auslesen von Sensoren zu verzögern. Erwartungsgemäß sollten diese Verzögerungszeiten im Normalbetrieb jedoch vernachlässigbar klein gehalten werden können, da alle Animationen, z.B. bei Druck eines Buttons, von der Grafikeinheit des Prozessors abgearbeitet werden, und sich daher während einer Animation automatisch wieder freie Prozessorzeit zum abarbeiten anderer Tasks ergibt.

Die von der CPU unterstützte Spannungs- und Frequenzskalierung kann außerdem vom Betriebssystem genutzt werden um die dynamischen Verluste zu minimieren und dementsprechend weniger Wärmeentwicklung im inneren des Gehäuses zu erzielen. Speziell bei der schon vorab getesteten Quad Core Variante lassen sich im Betrieb mit Betriebssystem damit die Gehäusetemperaturen des Prozessors drastisch reduzieren. Um im Hochlastfall durch thermische Überbeanspruchung keinen Schaden zu nehmen, kann das Betriebssystem auch selbstständig die CPU Kern-spannung bzw. Frequenz ab einer Junction Temperatur von beispielsweise 90°C selbst zurücklegen. Eine Beispielimplementierung aus einer Application Note²⁴ möchte ich nachfolgend anführen.

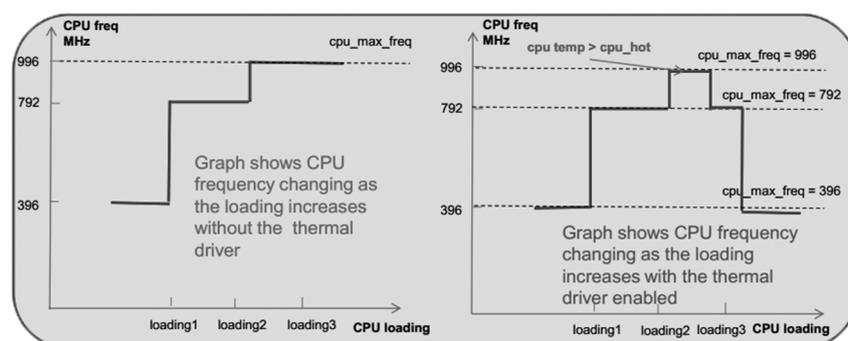


Abb. 24 - i.MX 6 - Thermisches Management

²⁴ http://cache.nxp.com/files/32bit/doc/app_note/AN4579.pdf?srch=1&sr=1&pageNum=1

3.1.5. Zusammenfassung

Die nachfolgende Aufstellung soll nochmals eine grobe Übersicht der nun ausgewählten Elektronik zur Realisierung des Smart Home Power Managers geben.

Prozessor:

Freescale imX6 Solo@1GHz

Arbeitsspeicher:

512MB RAM

512MB NAND Flash (optional)

Betriebsspannung:

12 - 15V DC

Umgebungstemperatur:

0-50°C

Betriebssystem:

Embedded Linux

Schnittstellen:

Mikro SD Karten Slot (intern)

Ethernet

USB (USB Host)

mini USB (USB otg)

HDMI

WiFi (802.11 g/n - 2,4GHz)

Z-Wave (ZM5304 - 868,42 MHz)

Micro Combicon Stecker (optionale DC

Versorgung)

2,1mm DC Jack (DC Versorgung)

Mensch-Maschine Schnittstelle:

7" PCAP Touch (800x480px) with RGB Interface

Vibrations Feedback

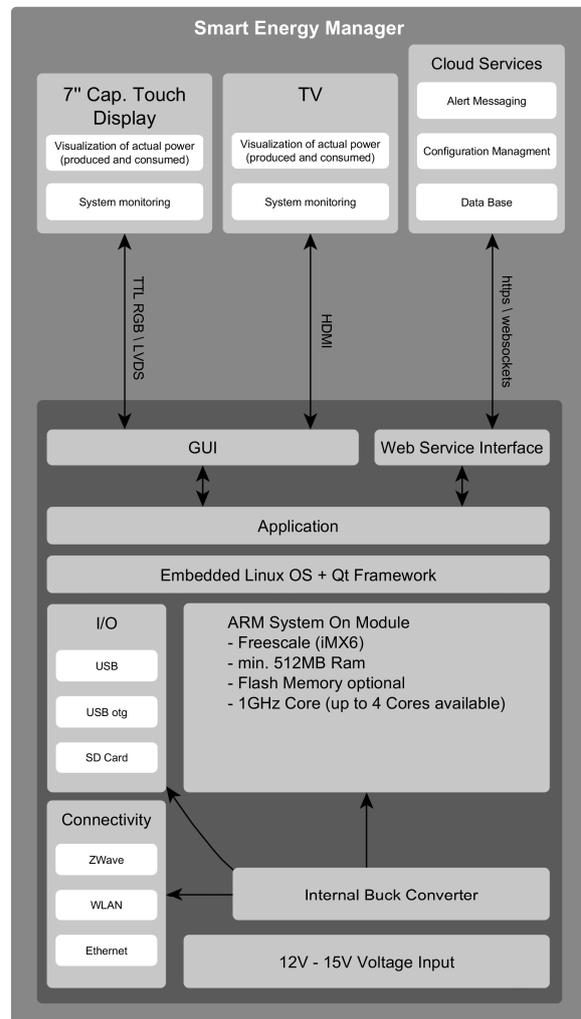


Abb. 25 - SEM Blockdiagramm

3.2. Schaltplan

Im folgenden Kapitel werden ausgewählte Schaltungsteile etwas detaillierter betrachtet. Der Schaltplan wurde im August 2013 von der Firma PHYTEC auf Kundenwunsch ausgearbeitet. Einige Implementierungsdetails einzelner Baugruppen, den entworfenen Schaltplan betreffend, werden in den nächsten Unterkapiteln vorgestellt und diskutiert. Der gesamte Schaltplan ist im Anhang dieser Arbeit enthalten.

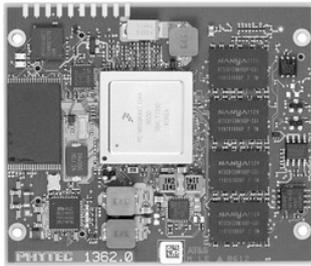


Abb. 26 - imx6-quad-top-view

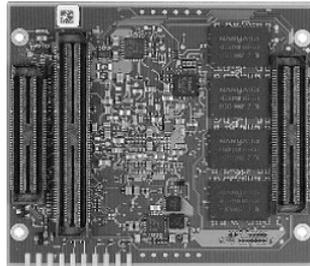


Abb. 27 - imx6-quad-Bottom-view

Der Entwicklungsaufwand kann durch die Verwendung eines schon verfügbaren Prozessorboards (Phytec iMX6 Quad SOM²⁵, Abb. 26 und Abb. 27) erheblich reduziert werden, da die Hauptaufgabe nur mehr darin besteht, ein zugehöriges Baseboard mit den geforderten Schnittstellen und Anschlüssen zu designen. Alle von PHYTEC angebotenen SOMs besitzen Pin kompatible Anschlüsse (Abb. 27)

sodass es möglich ist das verwendete SOM auch gegen andere auszuwechseln. Dies bietet größte Flexibilität die Modulleistung sowie auch den Modulpreis betreffend.

PHYTEC bietet ein sogenanntes „Baukastensystem“ an, mit dem es möglich ist, vorgegebene Schaltplan Referenz Implementierungen, wie sie beispielsweise für WLAN, Ethernet, USB usw. am verfügbaren PHYTEC Entwicklungsboard zu finden sind, einfach in den Kundenspezifischen Schaltplan übernehmen zu lassen. Damit konnten die nachfolgenden Schaltungsteile mit teilweise nur minimalen Adaptionen in unseren Schaltplan übernommen werden. Der gesamte Schaltplan des Baseboards ist im Anhang A zu finden. Die Schnittstellen, welche über die Steckverbindung des SOMs (Abb. 27 - imx6-quad-Bottom-view Abb. 24 - i.MX 6 - Thermisches Management) verfügbar sind, sind im Schaltplan als Stecker phyFLEX-fix - und phyFLEX-flex – Connector bezeichnet.

3.2.1. Onboard Spannungsregler

Die Onboard Spannungsaufbereitung besteht prinzipiell aus mehreren Einzelkomponenten:

- Anschlussbuchsen für DC - Eingangsspannung 12-15V (Abb. 21, Abb. 22)
- Eingangsschutz- sowie Filterstrukturen
- Step-Down Schaltregler mit Ausgangsspannung von +3,3V und +5V
- Power Management IC integriert am SOM

Die Anschlussbuchsen zur Spannungsversorgung des Systems wurden schon im Abschnitt 2.2.1. genauer beschrieben.

Eine Sicherung in Verbindung mit einer bidirektionalen 15V TVS Diode (Abb. 28) bietet Schutz gegen transiente Überspannungen, sodass im äußerstem Fall einer Überbeanspruchung die TVS Diode²⁶ zwischen 16,7V - 18,5V zu klemmen beginnt und dadurch die Sicherung des Gerätes (2AT) auslöst. Diese ist in einem SMD Sicherungshalter untergebracht und kann leicht ausgewechselt werden. Der nachfolgende Step-Down Schaltregler LM25119²⁷ von TI kann auch mit höheren Spannungen bis zu 42V betrieben werden, da jedoch nicht alle Komponenten auf Spannungen >24V dimensioniert sind, und auch die entsprechenden Messungen im Labor mit einer Betriebsspannung von 15V durchgeführt werden, sollte diese Spannung so gut als möglich eingehalten werden.

²⁵ System on Module: beinhaltet alle notwendigen Peripheriekomponenten die der Prozessor benötigt (RAM, FLASH, CPU)

²⁶ Littelfuse TVS Diode SMAJ15CA - http://www.littelfuse.com/products/tvs-diodes/surface-mount/smaj/~media/electronics/datasheets/tvs_diodes/littelfuse_tvs_diode_smaj_datasheet.pdf.pdf

²⁷ Texas Instruments LM25119 - <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm25119.pdf>

Die HF Filter Struktur wird von einer Kapazität, gefolgt von einer Stromkompensierten Drossel und einer weiteren Kapazität gebildet. Aus Layout technischen Gründen wurde im ersten Schritt eine Variante komplett ohne diesen Filter am Baseboard implementiert. Messungen in der HF Messzelle haben gezeigt, dass es nicht möglich ist, die in der Norm geforderten Grenzwerte ohne Filtermaßnahmen einzuhalten. Einige Details dazu werden im Kapitel 5. genauer erörtert.

Um bei einer möglichen Verpolung der Eingangsspannung, besonders bei Verwendung des Micro Combicon Anschlusses bei Installation beispielsweise eines Unterputznetztes, keinen Schaden zu nehmen, wurde ein Verpolungsschutz mithilfe eines P-Kanal MOSFET realisiert (Abb. 28). Mit einer Zenerdiode wird die maximale Spannung am Gate des MOSFETs auf -12V begrenzt. Dies ist im Normalbetrieb zwar nicht notwendig, da der verwendete MOSFET 20V Gate-Source Spannung aushält. Im Fehlerfall (Surge) könnten sehr leicht Spannungen an der dann leitenden Diode D13 entstehen, welche größer 20V sind und der MOSFET dadurch beschädigt werden könnte.

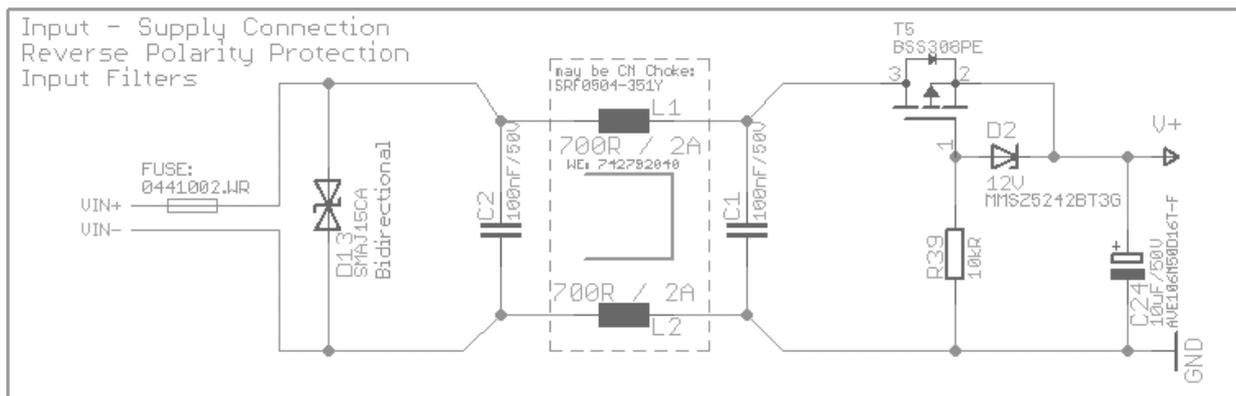


Abb. 28 - Verpolschutz und Eingangsfiler für die DC Spannungsversorgung

Zuletzt wird mit mehreren größeren Kapazitäten (hier vereinfacht dargestellt C24), die Eingangsspannung für den Schaltregler so gut als möglich „gepuffert“, sodass mögliche Differential Mode Störungen ausgehend vom Schaltregler weitestgehend vermieden werden können. Eine genauere Analyse dazu folgt auch im Kapitel 5. .

Der eigentliche Spannungsregler (siehe Abb. 30²⁸) für das Baseboard besteht aus dem Regler IC selbst, externen MOSFETs Q3 und Q5 (CSD18534Q5A²⁹), welche einen sehr niedrigen $R_{DS(on)}$ besitzen ($7,8m\Omega @ V_{GS} = 10V$) um die im Bauteil umgesetzte Verlustleistung klein zu halten und somit den benötigten Strom schalten zu können. Gleichzeitig wird die Effizienz des Reglers erhöht indem die normalerweise benötigte Diode, welche in dem Zeitraum benötigt wird in welchem Q3 gerade nichtleitend ist, durch einen MOSFET ersetzt, sodass sich auch die Verluste in diesem Schaltungsteil auf ein Minimum reduzieren. Ist ein Step-down Regler so konstruiert, nennt man ihn Synchron-Step-down Regler, da auch der zweite MOSFET vom Regler im richtigen Zeitpunkt angesteuert werden muss.

²⁸ Auszug aus dem durch PHYTEC erstellten Schaltplan

²⁹ Texas Instruments - CSD18534Q5A - <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/csd18534q5a.pdf>

Schnelle Schaltzeiten der MOSFETs reduzieren die während des Schaltens auftretenden Verluste, verschlechtern aber gleichzeitig durch steile Flanken die elektromagnetische Verträglichkeit erheblich. Dies ist exemplarisch in nebenstehender Abb. 29 - Schaltverluste eines MOSFETs 30 veranschaulicht.

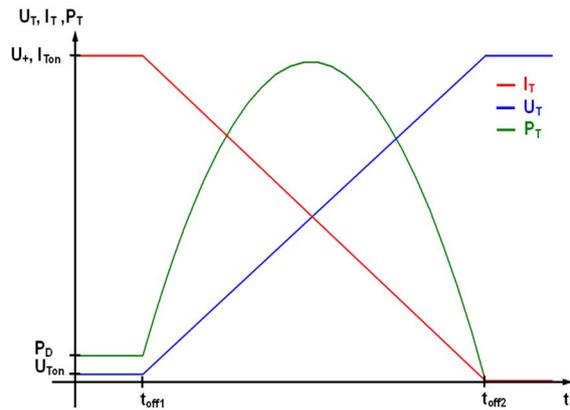


Abb. 29 - Schaltverluste eines MOSFETs

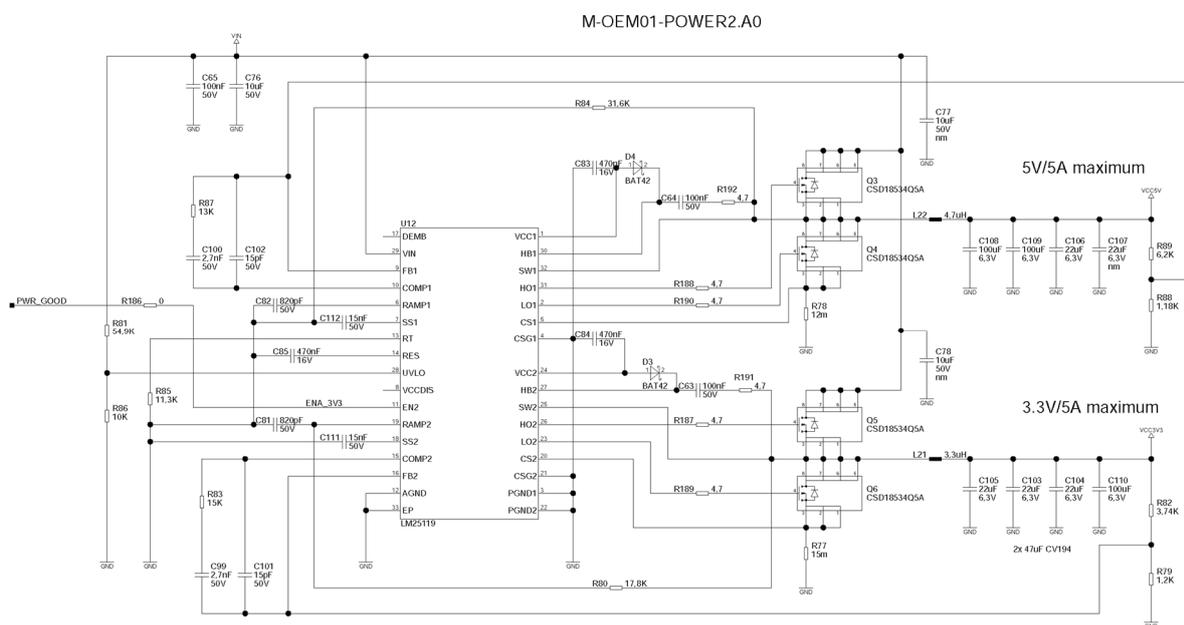


Abb. 30 - Schaltplan: Step-down Regler

3.2.2. Schutzstrukturen an externen Schnittstellen

Jede Schnittstelle an welcher weitere Geräte angeschlossen werden, oder welche vom Benutzer berührt werden kann, stellt aus mehreren Gründen eine potentielle Gefahr für das gesamte System dar.

Als vereinfachtes Beispiel möchte ich hier eine weit verbreitete USB Schnittstelle (Abb. 31) anführen. Diese hat im Allgemeinen 4 Anschlüsse: GND(-), D+, D-, V+(5V). Im einfachsten Fall könnte man daher die am Baseboard schon verfügbaren 5V zur Versorgung eines per USB angeschlossenen Gerätes verwenden. Doch was passiert, wenn dieses einen Defekt aufweist oder ein Kabelbruch im Kabelinneren die Leitungen V+ und GND verbindet. Im einfachsten Fall würde sich das Gerät wohl für

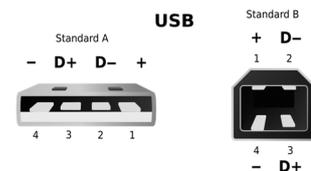


Abb. 31 - USB Stecker

³⁰ Abbildung: Wikipedia - http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schaltverluste_ohmsche_Last.png

die Dauer des Kurzschlusses deaktivieren, da der Schaltregler kurzschlussfest ist, und im Falle eines solchen den Kurzschlussstrom selbst begrenzt. Sollten sich nur die 5V am Schaltregler im Falle eines Kurzschlusses deaktivieren und die 3,3V weiterhin erzeugt werden, könnten unerlaubte Systemzustände auftreten, welche durchaus auch andere Bauteile, welche nicht in direktem Zusammenhang mit der USB Schnittstelle stehen beschädigen. Aus diesem Grund ist es unbedingt notwendig diese Leitungen gegen Kurzschluss zu schützen. Dazu gibt es diverse integrierte Schaltkreise welche diese Funktion sicherstellen können. Details sind im nächsten Abschnitt 3.2.2.2. Schutz gegen Überlast angeführt.

Des Weiteren kann es durch ESD auf Datenleitungen sehr leicht zu Beschädigungen in integrierten Schaltkreisen kommen. Daher müssen Leitungen, welche berührt werden können, unbedingt mit geeigneten Strukturen gegen ESD geschützt werden.

3.2.2.1. Schutz gegen elektrostatische Entladung

Wie schon erwähnt ist es notwendig berührbare Schnittstellenleitungen gegen ESD zu schützen. Dazu werden sogenannte ESD Suppressor Dioden verwendet. In unserem Anwendungsfall hat man sich für eine Ausführung entschieden, in welcher gleich mehrere Dioden in einem einzigen Gehäuse verwendet werden (SRV05-4³¹). Diese Dioden Arrays werden dann typischerweise wie in Abb. 32, einer Implementierung an der USB Host Schnittstelle, eingesetzt.

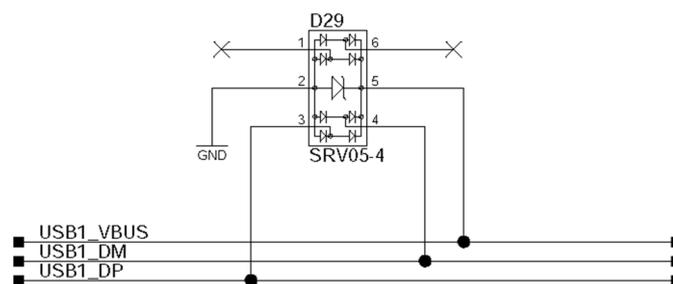


Abb. 32 - Schaltplan: ESD Schutzdiodenarray

³¹ Semtec Low Capacitance TVS Diode Array – SRV05-4

Die Spezifikation der verwendeten Dioden Arrays gibt Auskunft über die Belastbarkeit der Schutzstruktur:

- IEC 61000-4-2 (ESD) $\pm 15\text{kV}$ (Luft), $\pm 8\text{kV}$ (Kontakt)
- IEC 61000-4-4 (EFT) 40A (5/50ns)
- IEC 61000-4-5 (Lightning) 12A (8/20 μs)

Besonders interessant ist die erste Norm IEC 61000-4-2 welche besagt, dass die Normprüfpulse mit $\pm 15\text{kV}$ (Luft), $\pm 8\text{kV}$ (Kontakt) bestanden werden müssen. In unserem Anwendungsfall reicht laut EN60730-1 ein Bestehen von Prüfpulsen mit $\pm 8\text{kV}$ (Luft), $\pm 6\text{kV}$ (Kontakt) aus.

Diese Dioden Arrays finden in unserem Fall bei allen Schnittstellenanschlüssen Verwendung (Ethernet, USB Host, USB otg) mit Ausnahme von HDMI da dieser über einen speziellen, für äußerst hohe Datenraten wie sie bei HDMI zu finden sind, optimierten, IC³² welcher gleich mehrere nützliche Funktionen sowie auch den Schutz gegenüber Überlast übernimmt und laut Datenblatt auch eine Spannungsfestigkeit von $\pm 8\text{kV}$ gegenüber Kontaktentladungen besitzt (ebenfalls konform zu: IEC61000-4-2).

3.2.2.2. Schutz gegen Überlast

Es gibt viele verschiedene Ansätze Ausgänge gegenüber Kurzschlüssen zu schützen. Die State-of-the-art Lösung ist es, einen IC für die jeweilige Anwendung in das Design zu integrieren, welcher durchaus in der Lage ist noch mehrere Zusatzfunktionen zu implementieren. So sind beispielsweise auch IC's zur Strombegrenzung verfügbar, welche auch den aktuellen Strombedarf ermitteln können. In unserer Implementierung wurde für die USB Schnittstelle ein IC von TI (TPS2042B³³) gewählt. Die Implementierung dieses IC's, wie sie auf unserem Baseboard ausgeführt ist, ist in Abb. 33 dargestellt.

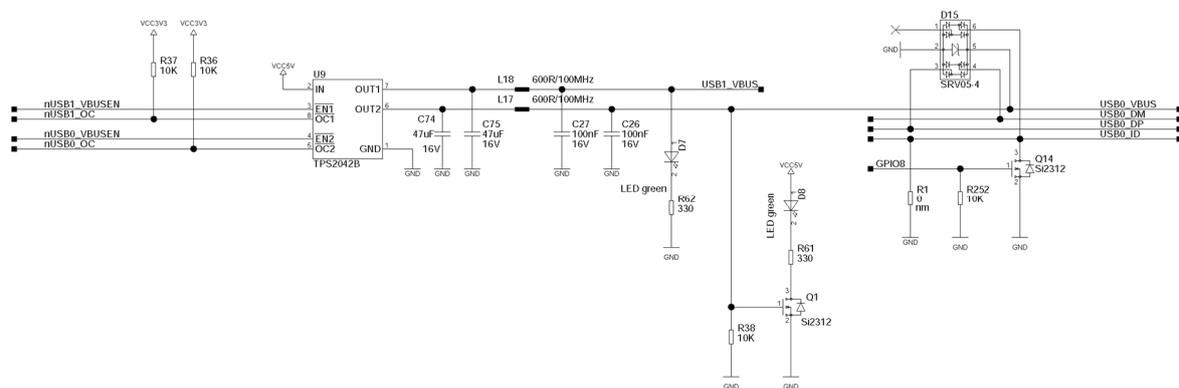


Abb. 33 - Schaltplan: USB Schutzstrukturen

Der TPS2042B ermöglicht es zwei Ausgänge mit jeweils 500mA maximal Strom über die EN Eingänge zu schalten. Außerdem können Fehler an der Spannungsversorgung der Schnittstelle über die zwei Ausgänge OC1 und OC2 am SOM eingelesen werden. Zusätzlich wurden kleine Ferrite in Kombination mit Kapazitäten (π Konfiguration, siehe Abb. 33) in der Versorgungsleitung eingeplant.

³² Texas Instruments Single Chip HDMI Transmitter Port Protection and Interface Device - [TPD12S521](#)

³³ Texas Instruments Dual, Current-Limited, Power-Distribution Switches - [TPS2042B](#)

3.2.2.3. Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit

Um die Elektromagnetische Verträglichkeit des Baseboards zu verbessern sollen an allen digitalen Schaltkreisen Blockkapazitäten so nah als möglich an den Versorgungspins angebracht werden. Durch schnelle Schaltvorgänge in digitaler Logik kommt es in Invertern zu hohen Querströmen zwischen V+ und GND des Bauteils. [10]

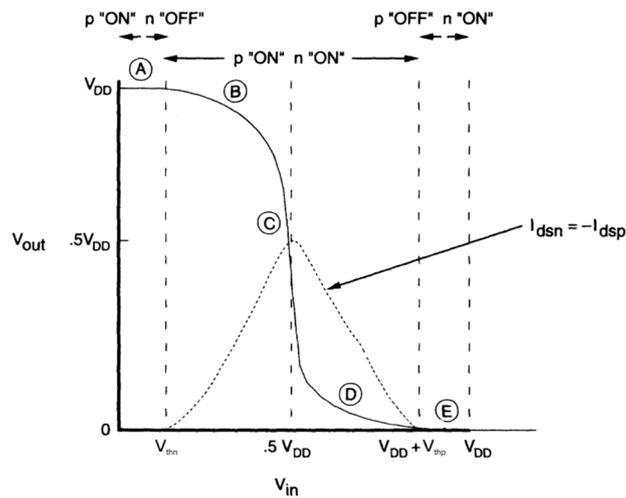


Abb. 34 - Schaltvorgang eines MOS Inverters (P Channel 'ON' zu N Channel 'ON' Übergang)

Werden keine Blockkapazitäten verwendet breitet sich dieser „Störstrom“ über die ganze Platine aus, Spannungseinbrüche über die Zuleitungsinduktivität sind die Folge. Des Weiteren kann es dadurch zur Abstrahlung der HF Störung durch die lange Zuleitung bedingte Antenne führen.

Wie schon in Abschnitt 3.2.2.2. bemerkt ist es sinnvoll, wenn externe Verbraucher angeschlossen werden können, die nach außen geführten Versorgungsleitungen besonders gut zu filtern, um die Verbreitung von Störungen auf der Versorgungsleitung, verursacht durch den angeschlossenen Verbraucher, bestmöglich zu unterdrücken. Für differentielle Schnittstellen kann es außerdem sinnvoll sein, stromkompensierte Drosseln einzuplanen, da Gleichtaktstörungen damit sehr gut unterdrückt werden können. Auf der HDMI Schnittstelle, welche 4 differentielle Adern Paare mit Datenraten bis zu 3Gb/s besitzt, wurde eine CM Drossel verwendet welche 2 differentielle Adern Paare gleichzeitig durchführen kann und für HDMI Anwendungen optimiert ist (Abb. 35, DLP2ADN900HL4³⁴), sodass zusätzlich auch noch der Platzbedarf auf der Bestückungsseite der Platine möglichst gering gehalten werden kann.

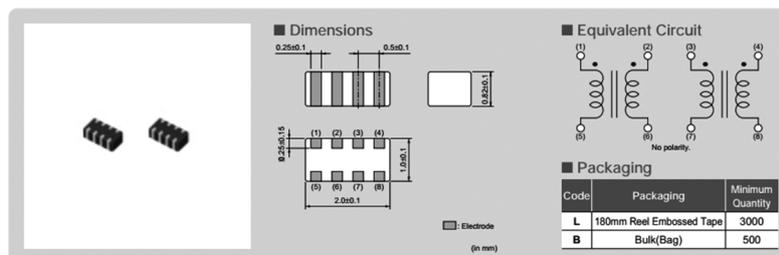


Abb. 35 - Stromkompensierte Drossel (2 differentielle Paare)

³⁴ Murata Common Mode Choke Coil - [DLP2ADN900HL4](#)

3.2.3. Differentielle Schnittstellen

Differentielle Schnittstellen haben den entscheidenden Vorteil, dass der Störabstand um einiges größer ist, als bei nicht differentieller Übertragung. Aus diesem Grund können diese, mit sehr kleinen differentiellen Spannungen im Bereich von mehreren 100mV bis hin zu wenigen Volt, sehr hohe Datenraten erzielt werden. Gleichzeitig ist dies, durch die niedrigen Signalpegel der EMV zuträglich, da abgestrahlte HF Störungen sowie die Beeinflussung benachbarter Leiter beispielsweise durch kapazitive Kopplung signifikant verringert werden.

In den nachfolgenden Unterkapiteln möchte ich nur kurz auf die wichtigsten Eigenschaften der verwendeten differentiellen Schnittstellen, sowie auf die konkreten Implementierungen dieser auf dem Baseboard eingehen, da eine detaillierte Betrachtung bezüglich Funktionsweise und Spezifikation nicht im Rahmen dieser Arbeit liegt.

3.2.3.1. Ethernet

Bei Ethernet werden sogenannte „*twisted pair*“ Kabel verwendet, in welchen vier verdrehte Adern-Paare ausgeführt sind. Zur Datenübertragung können ein, zwei oder alle vier Adern-Paare verwendet werden, je nach Einsatzzweck und Verbindungsgeschwindigkeit. Grundsätzlich wird bei Ethernet eine Anschlussbuchse verwendet, welche jedes Adern-Paar über eine stromkompensierte Drossel filtert und einen Überträger zur nachfolgenden Elektronik weiterleitet. Außerdem sind die Abschlusswiderstände, zur Vermeidung von Reflexionen am Kabelende auch in der Buchse direkt integriert.

Die nachfolgende Abb. 36 zeigt den inneren Aufbau einer Standard Ethernet Buchse (Bild: Würth Elektronik³⁵). Durch diese Integration der benötigten Komponenten werden Layout Fehler vermieden und auch die EMV wesentlich verbessert. Die meisten Ethernet Buchsen sind mit einem Metallschirm versehen, welcher zur Verbesserung der EMV beiträgt und auch auf der Platine geerdet werden kann. Dabei ist zu beachten, dass bei geschirmten Kabeln mit metallischem RJ45 Stecker Vorkehrungen getroffen werden müssen um DC Ausgleichsströme über den Schirm des Kabels, aufgrund ungleicher Erddpotentiale in verschiedenen Räumen oder Stockwerken, zu vermeiden. Des Weiteren könnten Störströme den sehr nieder-impedanten Schirm nutzen um ihren Störstromkreis zu schließen und schließlich wieder in die eigentlich geschirmten Datenleitungen einkoppeln. Aus diesen Gründen wird der Schirm meist kapazitiv geerdet und die Anschlusskapazität mit einem Parallelwiderstand entladen, um bei Belastungen mit ESD Pulsen nicht zerstört zu werden (Mehrere ESD Pulse nacheinander

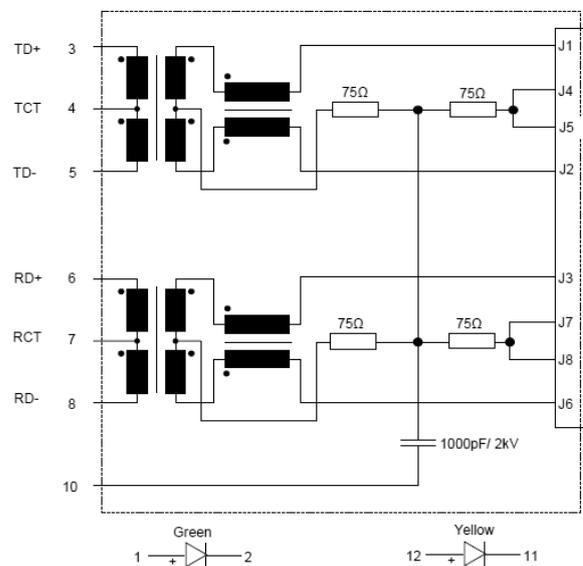


Abb. 36 - Ethernet Überträger

³⁵ <http://katalog.we-online.de/pbs/datasheet/74980111211.pdf>

könnten auch einen Kondensator mit großer Kapazität auf eine Spannung aufladen, welche diesen beschädigt oder im schlimmsten Fall zerstört).

Aufgrund kapazitiver Kopplungen am Überträger ist es außerdem notwendig Vorkehrungen gegenüber ESD Pulsen auf den Leitungen in Richtung Ethernet Controller zu treffen. Diese Schutzfunktion übernehmen die ESD Schutzdioden. Die konkrete Ausführung am Baseboard ist in Abb. 37 (ESD Dioden Array - D18) dargestellt.

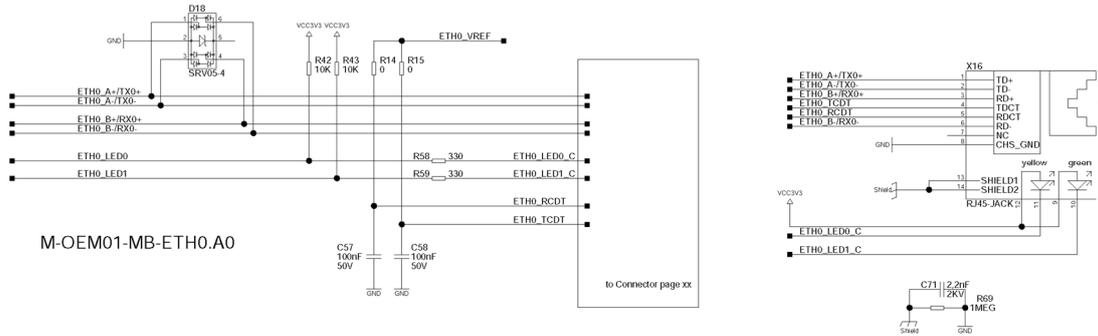


Abb. 37 - Schaltplan: Ethernet Schutzbeschaltung

3.2.3.2. USB

Die Implementierung des USB otg Interfaces wurde auch schon in Abb. 33 gezeigt, welches sich nur durch die optionale Umschaltung zwischen Host und Device Betrieb (Pegel auf der Leitung USB_ID, wird hier im Device Betrieb durch Q14 auf Masse gezogen) von dem zweiten USB Host Interface unterscheidet. Die Implementierung beider USB Interfaces habe ich in der nachfolgenden Abb. 38 zusammengefasst. Gut dabei zu erkennen sind die verschiedenen angesprochenen Schutz- und Filterstrukturen, wie der ESD Schutz auf den Leitungen (D15, D29), sowie Schutz gegen Überlast (U9) und die Filterkomponenten zur Verbesserung der EMV (C75, L18, C27 bzw. C74, L17, C26).

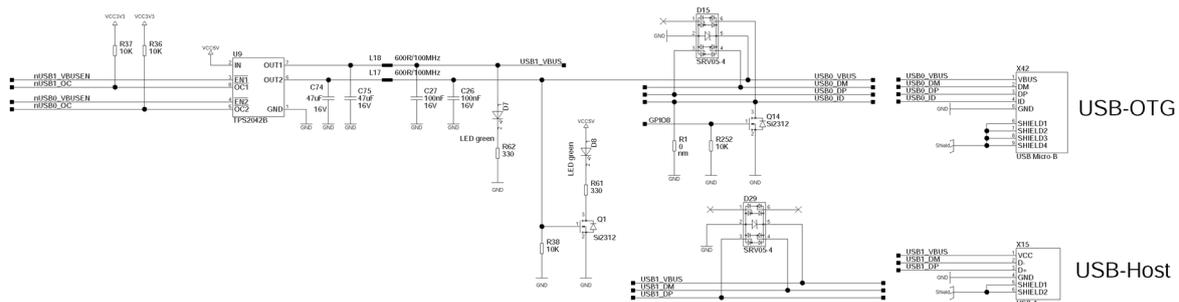


Abb. 38 - Schaltplan: USB Interfaces

Aus EMV technischer Sicht ist es vermutlich nicht notwendig die Leitungen gegenüber ESD zu schützen, da es mit dem Norm Prüffinger äußerst schwer bis gar nicht möglich ist, eine Luftentladung auf den etwas zurückversetzten Kontakten (siehe Abb. 31) VCC, GND, D+ bzw. D- innerhalb der metallischen USB Buchse bzw. des Steckers einzuprägen. USB Stecker oder Buchsen, welche keine metallischen Gehäuse besitzen sind nicht zugelassen und mir auch soweit noch nicht bekannt. Da diese ESD Dioden in ihrer Bauform jedoch besonders klein und auch sehr kostengünstig sind, werden diese als zusätzlicher Schutz vorgesehen.

3.2.3.3. HDMI

Die einfachste differentielle Schnittstellenimplementierung ist bei HDMI zu finden. Wie schon erwähnt wurde hier ein integrierter Baustein von Texas Instruments³² verwendet, welcher alle notwendigen Schutzfunktionen die für diese Schnittstelle notwendig sind implementiert. Eine stromkompensierte Drossel wird auf den differentiellen Datenleitungspaaren eingesetzt um Gleichtaktstörungen zu dämpfen.

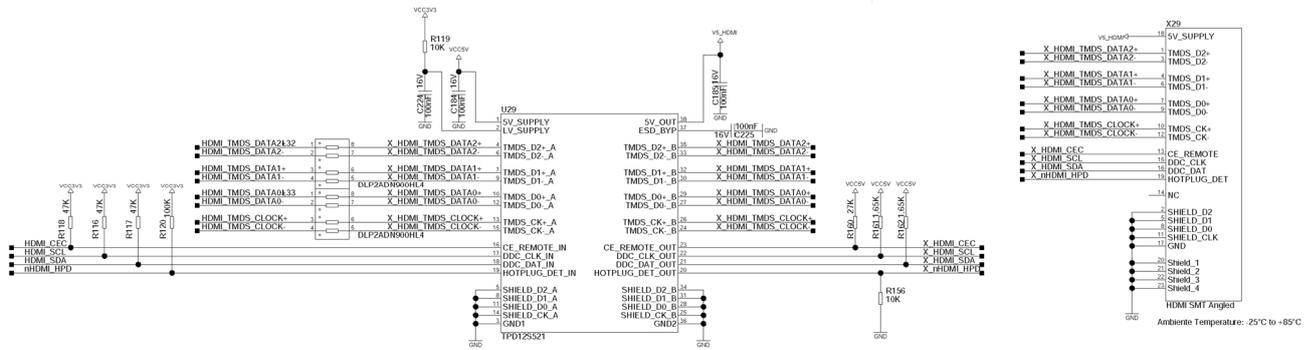


Abb. 39 - Schaltplan: HDMI Schnittstelle

Der interne Aufbau des IC's U29 ist in der nächsten Abb. 40 gezeigt. Für die differentiellen Leitungspaare sind ESD Schutzdioden Arrays integriert. Für die 4 Control Leitungen sind MOS Transistoren integriert um diese von der Baseboard Elektronik trennen zu können, für den Fall, dass das Baseboard nicht versorgt, aber das HDMI Kabel weiterhin angeschlossen ist. Dadurch soll verhindert werden, dass Ströme aus angeschlossenen Geräten über diese Leitungen in die Eingangsschutzstrukturen nachfolgender IC's fließen. In diesem Fall in die GPU Pins des Prozessor IC's, und diesen dadurch beschädigen.

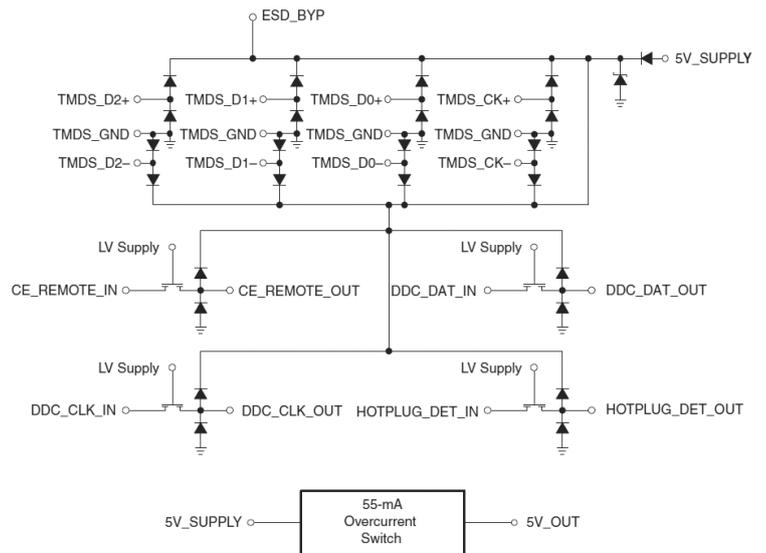


Abb. 40 - TPD12S521

Zusätzlich ist die 5V Versorgung für externe Geräte mit 55mA durch den TPD12S521 abgesichert. Eine schematische Darstellung wie das Layout realisiert werden könnte wurde auch aus dem Datenblatt des TPD12S521 übernommen (Abb. 41).

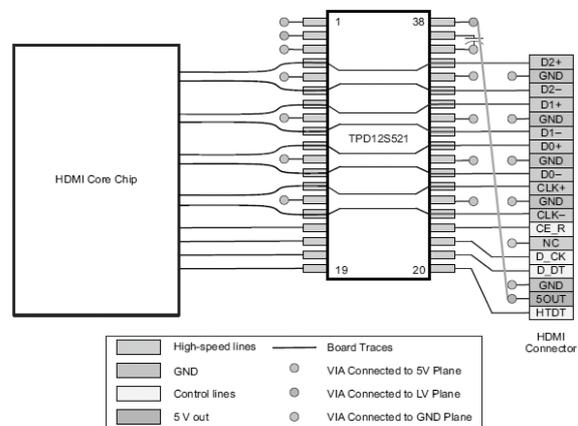


Abb. 41 - TPD12S521 Connection

3.2.4. Drahtlose Kommunikation

Als primäres Übertragungsmedium soll die schon vorhandene Systemumgebung benutzt werden. Da in den meisten Fällen eine verkabelte Netzwerkinfrastruktur im Gebäude aber nicht vorausgesetzt werden kann, wird zur Anbindung von Cloud-Diensten eine Internet Verbindung benötigen, bevorzugt WLAN verwendet. Dies ermöglicht eine besonders Nutzerfreundliche Installation des Systems. Die LAN Schnittstelle stellt in den meisten Fällen vermutlich nur eine Fallback Option dar, sodass an Aufstellungsorten wo kein WLAN Empfang möglich ist, zumindest auf das Kabel zurückgegriffen werden kann.

Des Weiteren werden die verschiedensten Aktoren und Sensoren über den ZWave RF-Standard mit dem System verbunden. Auch hierbei gibt es keinerlei zusätzliche Installationskosten wie sie beispielsweise für eine aufwändige BUS Anbindung anfallen würden.

Aus der Natur des Übermediums Luft ergeben sich jedoch verschiedenste Schwierigkeiten. So verändert der Übertragungskanal sein Verhalten anhand vieler verschiedener Parameter wie beispielsweise, Temperatur, Luftfeuchte, Gebäudebeschaffenheit usw. und ist daher auch zeitlich variabel. Befinden sich sehr viele Teilnehmer zur selben Zeit am selben Medium, was bei Luft ja der Fall ist, so ist eine gute Strategie notwendig um auch bei hohen Datendurchsätzen im Netzwerk, Packet Kollisionen zu vermeiden. Daher sind die frei verfügbaren ISM Bänder sehr stark reguliert um sicherzustellen, dass offiziell freigegebene Frequenzen mit maximalen Sendeleistungsangaben und auch maximalen Sende Zeit Längen genauestens eingehalten werden.

3.2.4.1. WLAN

In unserem System kommt, wie schon in Kapitel 3.1.3. beschrieben, ein 2,4GHz WLAN Modul zum Einsatz, welches die Standards 802.11 b/g/n unterstützt und dadurch Datenraten bis zu 65Mb/s erzielen kann. Da jedoch das 2,4GHz Frequenzband zumindest im urbanen Raum sehr überlaufen ist, sind die tatsächlich erzielbaren Datenraten dort um einiges niedriger. Außerdem ist mit der zunehmenden Anzahl von Smartphones und Tablets die Anzahl der Geräte welche auch Bluetooth nutzen das im selben Frequenzbereich wie WLAN arbeitet rapide angestiegen. Um daher überhaupt in der Lage sein zu können, mehrere Wireless LANs nebeneinander zu betreiben, sind insgesamt bis zu 14 Übertragungskanäle im freien Frequenzbereich von 2,4GHz – 2,5GHz verfügbar (Abb. 42³⁶). Wichtig dabei ist, wie in Abb. 43 gezeigt, genügend Abstand zu den benachbarten WLAN Netzen zu halten.

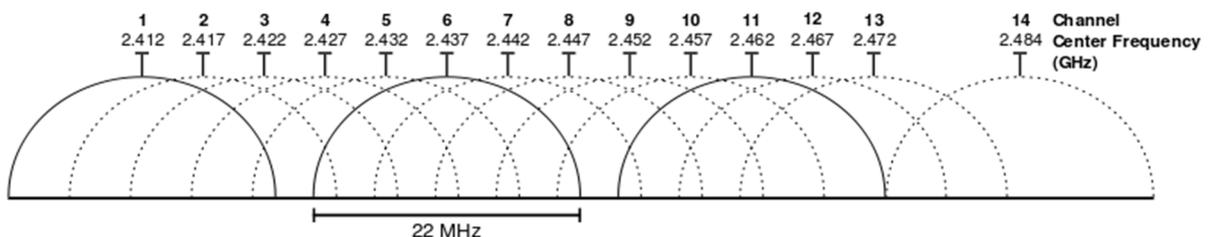


Abb. 42 - 802.11 Kanaleinteilung

³⁶ [http://en.wikipedia.org/wiki/File:2.4_GHz_Wi-Fi_channels_\(802.11b,g_WLAN\).svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:2.4_GHz_Wi-Fi_channels_(802.11b,g_WLAN).svg)

Abb. 42 zeigt die möglichen Kanalbelegungen. Daraus wird schnell ersichtlich warum es notwendig ist Abstände im Frequenzband einzuhalten. Ist ein 802.11n WLAN in Reichweite, wie beispielsweise in Abb. 43 ersichtlich, so besteht mit 802.11g nur mehr die Möglichkeit wenige verbleibende freie Kanäle zu wechseln, um nicht ständig mit Übertragungsfehlern rechnen zu müssen.

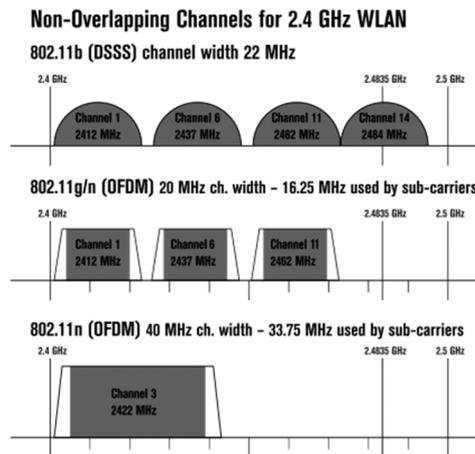


Abb. 43 - 802.11 verschiedene Standards [11]

Für die Art der Anwendung spielt der Datendurchsatz in unserem Einsatzzweck jedoch nur eine untergeordnete Rolle. WLAN wird, sofern keine verkabelte Ethernet Verbindung besteht, zwar zur Anbindung von IP Gateways verwendet, jedoch kann weder mit WLAN noch mit Ethernet Echtzeitfähigkeit garantiert werden.

Aus diesem Grund wird bei der Konzeption der Software besonders darauf geachtet, dass Verbindungen unterbrochen werden und Protokoll-Timeouts auftreten können. Für zeitkritische Verbindungen, welche Echtzeitfähige Kommunikation benötigen, kann daher WLAN keinesfalls verwendet werden. Der Einsatzzweck unseres Hauptsteuergerätes schließt aber Ereignisse welche in Echtzeit behandelt werden müssen und Echtzeitreaktionen erfordern aus.

Die Anbindung des verwendeten WLAN Moduls erfolgt über die SDIO Schnittstelle an den Prozessor. Da das Modul leider nur mit 1,8V auf seiner digitalen Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Prozessor betrieben werden kann, ist es notwendig Pegelwandler, sog. Levelshifter zu verwenden, um eine Pegelanpassung von 3,3V des Prozessors auf 1,8V des WLAN Moduls vorzunehmen. Diese sind in uni- sowie bidirektionaler Ausführung erhältlich.

Zusätzlich wurde ein π Glied und ein Widerstand in der Antennenleitung eingefügt. Mit dem π Glied ist es möglich eine eventuell notwendige Impedanz Anpassung für die verwendete Chipantenne durchführen zu können. Der Widerstand ermöglicht das Auftrennen der Antennenleitung zur Chipantenne und dann den Anschluss einer Dipolantenne an die am WLAN Modul verfügbaren Antennenanschluss. Durch die Integration der separaten Chipantenne ist es notwendig sich an etwaige Design Guidelines des Antennenherstellers zu halten, um die maximal erlaubte Sendeleistung in keiner Abstrahlrichtung zu überschreiten. Eine Reduktion der Sendeleistung ist aber auch immer per Software möglich. Ein kleiner Ausschnitt aus dem Schaltplan ist in der nachfolgenden Abb. 44 zu sehen. Der gesamte Schaltplan ist im Anhang zu finden.

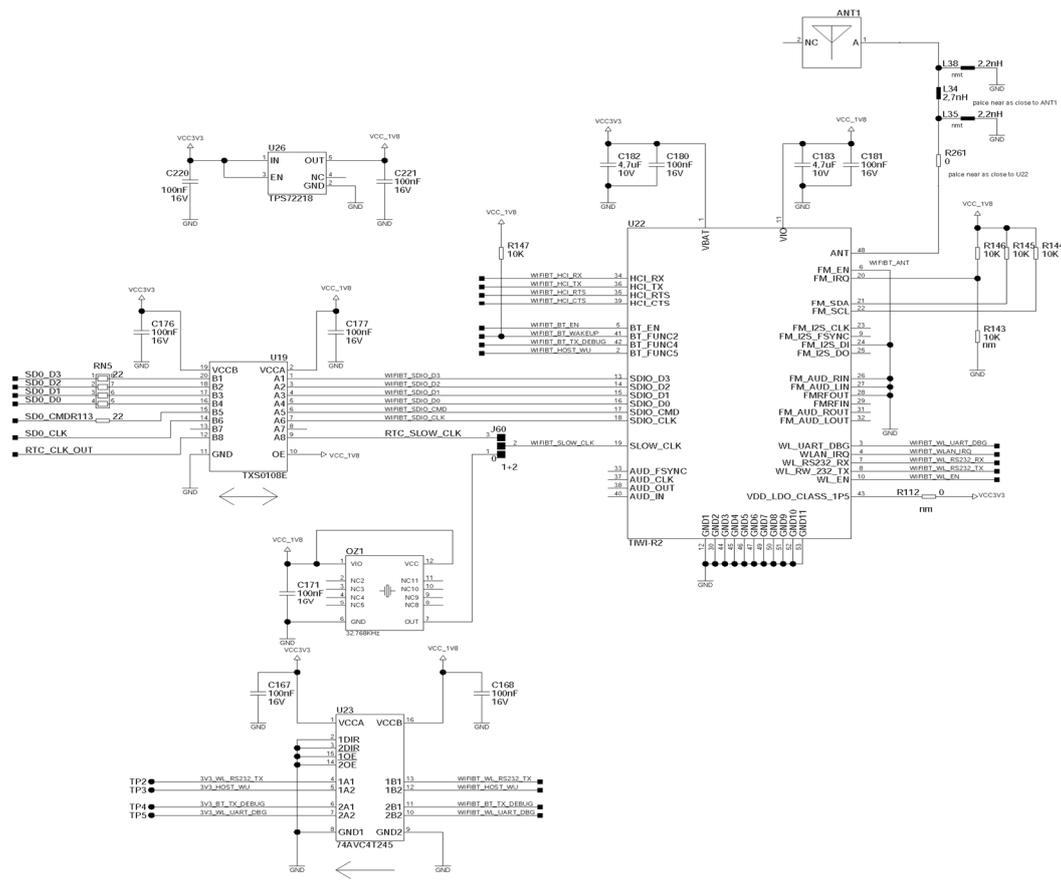


Abb. 44 - Schaltplan: WLAN Modul mit SDIO Interface und angeschlossener Chip Antenne

3.2.4.2. ZWave

ZWave ist in vielen Punkten ähnlich zu betrachten wie die WLAN Schnittstelle. Viele verschiedene sogenannte Short Range Devices benutzen dieses freie ISM Band (868,42 MHz). Dieses ist im Gegensatz zu WLAN jedoch noch stärker reguliert. So ist es beispielsweise nicht erlaubt die ganze Zeit über zu senden. Die maximale erlaubte zeitliche Nutzung (Tastgrad) entspricht 1%. Die Sendeleistung darf dabei aber maximal 25mW betragen.

Auf Grund besserer Übertragungseigenschaften gegenüber WLAN ist die Reichweite von ZWave Geräten in Gebäuden über mehrere Stockwerke hin exzellent und da üblicherweise nur sehr wenige Daten übertragen werden müssen, ist die maximale zeitliche Nutzungsdauer für viele Anwendungen mehr als ausreichend.

Da das verwendete ZWave Modul eine Wendel-, auch Helix Antenne genannt, integriert hat und bereits FCC Prüfkennzeichen besitzt, kann auch hier davon ausgegangen werden dass die maximal zulässigen Werte Sende-zeit- und Leistung betreffend eingehalten werden. Das Modul benötigt lediglich externe Blockkapazitäten an seiner Versorgung und wird per UART mit dem Prozessormodul verbunden. Um nach der Bestückung des Baseboards die Hardware sehr schnell testen zu können wird die verwendete UART Schnittstelle noch über einen Multiplexer geführt um für die Erstinbetriebnahme die serielle Linux Konsole zu Verfügung zu haben. Der betreffende Ausschnitt aus dem Schaltplan ist in der nachfolgenden Abb. 45 dargestellt.

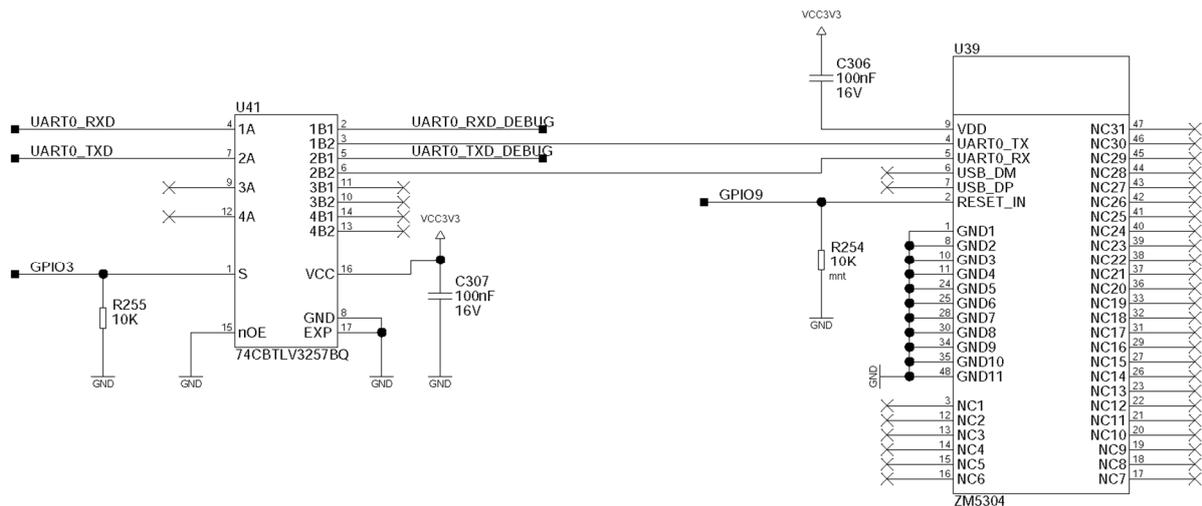


Abb. 45 - Schaltplan: ZWave Modul

3.2.5. Mensch Maschine Schnittstelle

In einem schon sehr frühen Stadium der Entwicklung war klar, dass die verwendeten Schnittstellen eine maßgebliche Rolle spielen würden. Die Integration der Schnittstellen sollte so einfach als möglich sein, im Besten Fall sollten schon fertige Linux Treiber existieren, welche es ermöglichen Benutzereingaben zu erfassen und auf einem Display diverse grafische Anzeigeelemente darzustellen.

3.2.5.1. Display

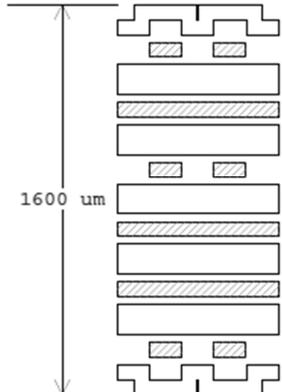
Da für die Grafikeinheit des Prozessors ein Linux Treiber zu Verfügung steht, kann das verfügbare LVDS Interface bedenkenlos verwendet werden. Die Ansteuerung des Displays sowie die Darstellung von Grafiken und Schriften wird komplett vom Treiber bzw. Betriebssystem übernommen und bedarf keiner weiteren Anpassung.

Da das aus Kostengründen ausgewählte Display eine RGB Schnittstelle besitzt, muss hier zusätzlich ein LVDS zu RGB Converter verwendet werden. Das Display wird dann über ein 10cm langes 40poliges FFC Kabel angeschlossen, welches Leitungen zur Spannungsversorgung und Steuerung für das Display sowie zur Datenübertragung besitzt. Wichtig dabei ist, die differentiellen Datenleitungen mit einem Abschlusswiderstand zu versehen, da der LVDS zu RGB Umsetzer von Texas Instruments³⁷ diese nicht integriert hat. Ein kurzer Ausschnitt aus dem Schaltplan ist in der nächsten Abb. 46 zu finden. Aus EMV technischer Sicht ist es für das Layout zweckdienlich die LVDS Leitungen so lange als möglich auszuführen, da diese differentiellen Leitungen wie schon festgestellt, wesentlich störfester sind und auch weitaus weniger Störaussendung verursachen als die 18 mit 5V TTL Logikpegel betriebenen RGB Leitungen.

³⁷ Texas Instruments DS90CF384A - <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ds90cf364.pdf>

3.3. PCB Design - Implementierungsdetails

Das PCB Layout wurde, wie schon anfänglich erwähnt, von der Firma PHYTEC umgesetzt. Im folgenden Kapitel sollen einige Details der Umsetzung des Schaltplans in das Layout genauer betrachtet und analysiert werden. Die Ausgangsposition stellt ein 6lagiges Baseboard dar, wobei der Lagenaufbau, auch um Impedanz-richtiges Layouten überhaupt zu ermöglichen, wie folgt festgelegt wurde:



NN	Layer Name	Type	Thickness um	Er	Metal	Test Width um	Z0 ohm
1	DIELECTRIC_1	Dielectric	20	3.6			
2	SIGNAL_1	Metal	35	<Auto>	<Custom>	250	49.9
3	DIELECTRIC_3	Dielectric	160	4.4			
4	SIGNAL_2	Metal	35	<Auto>	<Custom>		
5	DIELECTRIC_5	Dielectric	160	4.4			
6	SIGNAL_3	Metal	35	<Auto>	<Custom>	150	53.5
7	DIELECTRIC_7	Dielectric	710	4.4			
8	SIGNAL_4	Metal	35	<Auto>	<Custom>		
9	DIELECTRIC_9	Dielectric	160	4.4			
10	SIGNAL_5	Metal	35	<Auto>	<Custom>		
11	DIELECTRIC_11	Dielectric	160	4.4			
12	SIGNAL_6	Metal	35	<Auto>	<Custom>	250	49.9
13	DIELECTRIC_13	Dielectric	20	3.6			

Abb. 48 - PCB Layer Stackup

Um eine Leiterbahn mit gewünschter Impedanz zu designen ist es zielführend direkt unter dieser eine GND Fläche zu platzieren. Daher sind SIGNAL_2 vollflächig als GND und SIGNAL_5 größten Teils als GND Pläne ausgeführt. Zusätzlich ergeben sich dadurch auch verbesserte EMV Eigenschaften, da diese Kupferfläche auch als Schirmung angesehen werden kann. Hochfrequente Magnetische Felder verursachen beim Durchdringen einer leitenden Fläche Stromwirbel, welche ein Feld erzeugen, das dem ursächlichen Feld entgegenwirkt und somit das Magnetfeld geschwächt wird. E-Felder enden direkt in der Massefläche und durchdringen diese nicht.

Nachfolgend einige Layout Implementierungen ausgewählter Details, welche besonderen Augenmerk verdienen. Das gesamte Layout ist im Anhang dieser Arbeit enthalten. Fehler in der Anordnung der Bauteile auf der PCB, sowie nicht Beachtung von Layout best-practice Richtlinien können nicht nur für die Elektromagnetische Verträglichkeit schwerwiegende Folgen haben, sondern im schlimmsten Fall auch zu Fehlfunktion führen.

3.3.1. Implementierung des Onboard Spannungsreglers

Da es sich beim verwendeten Spannungsregler um einen Step-down Regler handelt sollten die Strompfade an denen der Stromfluss durch Schalter umgeleitet wird besonders sorgfältig analysiert werden, bevor hier das Layout erstellt wird. Wie schon in Abschnitt 3.2.1. beschrieben handelt es sich um einen Spannungsregler mit zwei Ausgangsspannungen. Hier wird der 3,3V Ausgang etwas genauer betrachtet. In Abb. 49 , ist gut die groß dimensionierte Eingangskapazität C78 (10uF) zu erkennen, welche Spannungseinbrüche auf der Versorgungsspannung verhindern soll. Parallel dazu sind noch weitere Kapazitäten geschaltet, welche in dieser Abbildung jedoch nicht zu sehen sind. Da die benötigten Pulsströme, wenn Q5 leitend ist, fast zur Gänze von dieser Kapazität geliefert werden, die Zuleitung besitzt ja eine recht „große“ Induktivität, ist es notwendig diese sehr nah an Q5 zu platzieren. Um auch Oberwellenstörungen noch gut zu unterdrücken, ist es auf jeden Fall notwendig parallel zu

C78 zumindest noch eine oder mehrere weitere, vom Wert her kleinere, Kapazitäten im nF Bereich vorzusehen, da diese sich im Frequenz Bereich bis zu wesentlich höheren Frequenzen wie Kapazitäten verhalten. Dies ist auch im Schaltplan durchaus so vorgesehen (Abb. 49 enthält nicht diese zusätzlichen Kondensatoren, da diese auf der Schaltplanseite verteilt sind).

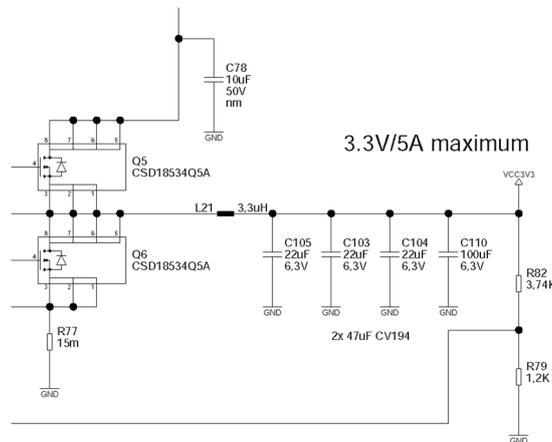


Abb. 49 - Schaltplan: +3V3 Ausgang des Reglers

Als nächstes werden L21 und nachfolgende Kondensatoren betrachtet. Ist Q5 geschlossen wird über L21 ein Strom zu fließen beginnen welcher die nachfolgenden Kondensatoren auflädt. Öffnet Q5 so schließt sich Q6, sodass der Spulenstrom weiterfließen kann. In diesem Moment wird der von der nachfolgenden Schaltung benötigte Strom nur aus der im Magnetfeld gespeicherten Energie sowie aus den Kondensatoren bezogen. Da es sich aber um nichtideale Kondensatoren handelt entsteht am ESR, welcher ungleich 0Ω ist, ein Spannungsabfall. Dies verursacht einen Spannungsripple am Ausgang. Die Qualität der Ausgangsspannung hängt daher in einem sehr großen Maß von den verwendeten Kapazitäten ab. Gleichzeitig kann durch erhöhen der Schaltfrequenz die Größe der verwendeten passiven Komponenten reduziert und durch ein verkleinern der Schleifen auch die elektromagnetische Verträglichkeit verbessert werden. Die Realisierung des zugehörigen Layouts ist in der Abb. 50 veranschaulicht. Wie gut zu erkennen ist, wurde hier versucht die Baugruppe, bestehend aus Eingangskondensatoren, Schaltern, Spule und Ausgangskondensatoren, so kompakt als möglich zu platzieren.

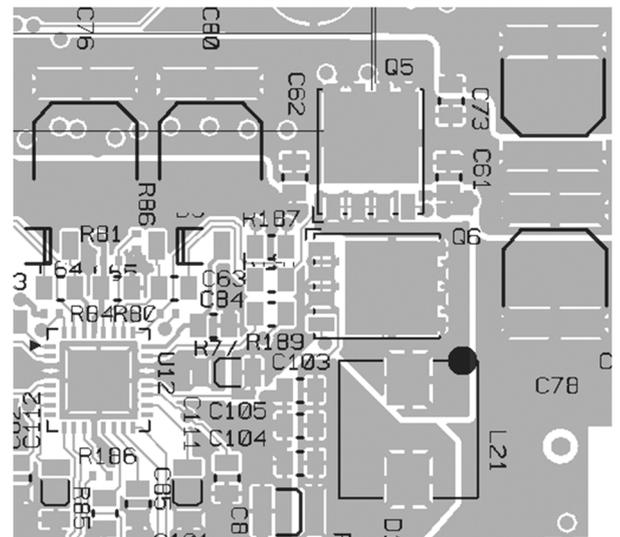


Abb. 50 - Layout: Spannungsregler (+3V3 Teil)

3.3.2. Implementierung der Schutzstrukturen

Prinzipiell kann hier schon vorab festgestellt werden, dass es sinnvoll ist, Schutz- und Filterstrukturen so nahe als möglich an der potentiellen Störquelle zu platzieren, da dadurch eine Ausbreitung über die gesamte Platine, beispielsweise durch kapazitive Kopplung in naheliegende parallelgeführte Leiter, bestmöglich unterdrückt werden kann.

Beispielhaft möchte ich hier die Implementierung der ESD Schutzstruktur bei der Ethernet Schnittstelle anführen. Obwohl mit Übertragern, welche direkt in der Buchse integriert sind, gearbeitet wird, ist es möglich, dass ein ESD Puls kapazitiv über den Übertrager auf die Sekundärseite überkoppelt und die nachfolgenden Treiberstrukturen beschädigt. In Abb. 51 ist zu sehen, dass versucht wurde die TX und RX Adern Paare aus schon genannten Gründen möglichst nahe an der Steckverbindung durch die Schutzstruktur D18 (ESD Suppressor) zu schützen.

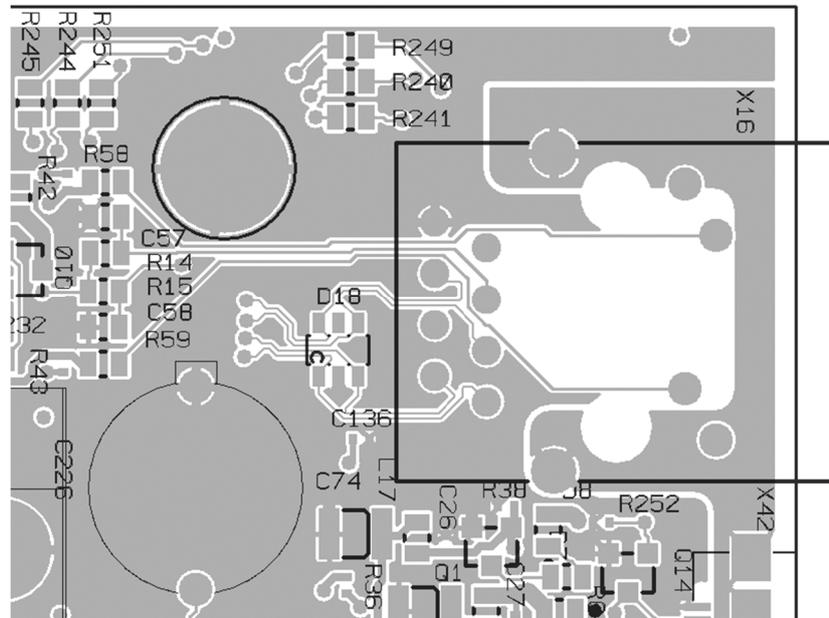


Abb. 51 - Layout: Ethernet

Des Weiteren kann man die spezielle enge Leiterführung der einzelnen Paare gut erkennen. Diese ist notwendig um den notwendigen Differentiellen Wellenwiderstand erzielen zu können. Einige Layout Programme bieten die Möglichkeit den benötigten Wellenwiderstand selbst berechnen zu können, und geben den Abstand der Leiter, sowie deren Dimensionen automatisch vor. Verwendet man beispielsweise EAGLE³⁸, in der aktuellen Version 6, so war eine Berechnung der benötigten Dimensionen, um einen gewünschten Wellenwiderstand zu erreichen, bis zuletzt nur mit externen Programmen möglich. Eine Kontrolle der Impedanz ist dabei also nur manuell möglich.

³⁸ <http://www.cadsoft.de/>

3.3.3. Implementierung der Differentielle Schnittstellen

Wie schon in Abschnitt 3.3.2. erwähnt müssen differentielle Leitungspaare Impedanz-richtig gelayoutet werden um Reflexionen zu vermeiden. Idealerweise ist der Wellenwiderstand an jeder Stelle der Leitung ident.

Jedoch gibt es einige Stellen im Layout an welchen sich Impedanz-Sprünge nicht vermeiden lassen:

- Durchkontaktierungen
- Scharfe Leiterkanten (z.B.: 90° Ecken der Leitung)
- Anschlussbeine an IC's
- Anschlüsse an Steckern

Im Detail wird in der nächsten Abb. 52 das Layout der HDMI Schnittstelle analysiert. Besonders gut ist die Leiterführung der 4 differentiellen Paare zu erkennen. Der IC welcher die Schutzstrukturen für die HDMI Schnittstelle bereitstellt (U29) ist wiederum möglichst nahe an der Steckverbindung platziert. L32 und L33 beinhalten die 4 Common Mode Drosseln und sind auch in der Nähe des HDMI Steckers (X29) platziert. Dass der Wellenwiderstand nicht über die gesamte Leitung gleich bleiben kann wird hier sehr gut erkennbar, da bei Drosseln und Steckern die Leitungen einen etwas größeren Abstand haben, um nach den Anschluss pads aber sofort wieder die richtigen Abstände einzunehmen. Dadurch können Reflexionen zwar nicht gänzlich vermieden aber zumindest möglichst klein gehalten werden.

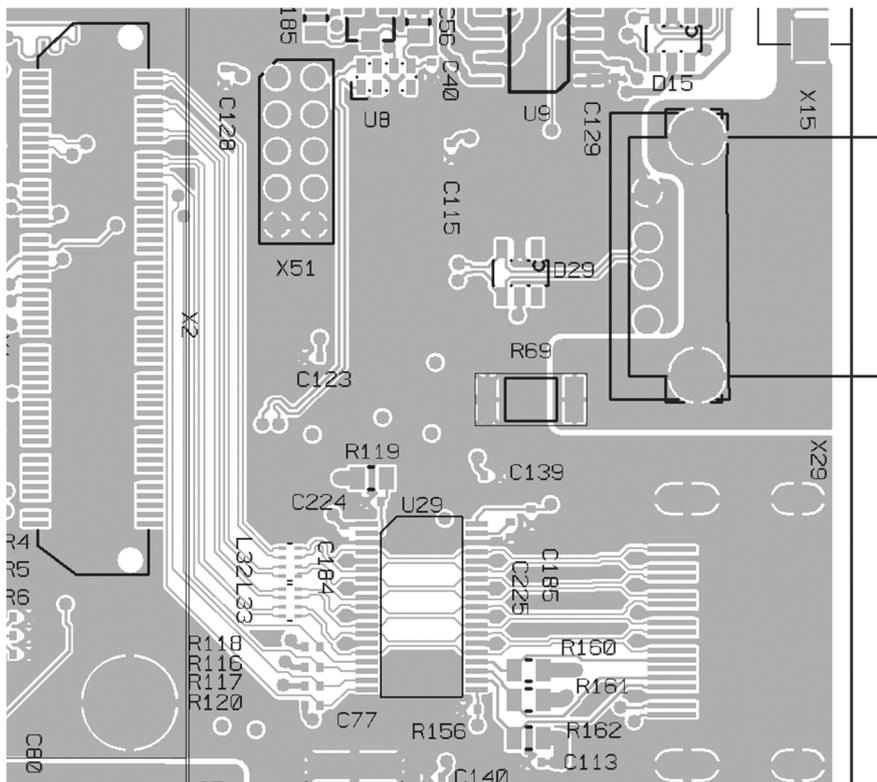


Abb. 52 - Layout: HDMI Interface

3.3.4. Implementierung von WLAN und ZWave

Für das WLAN Modul wurde eine Chipantenne (2450AT43A100³⁹) am Baseboard integriert. Dazu existiert ein Layout Vorschlag des Antennenherstellers (Abb. 54).

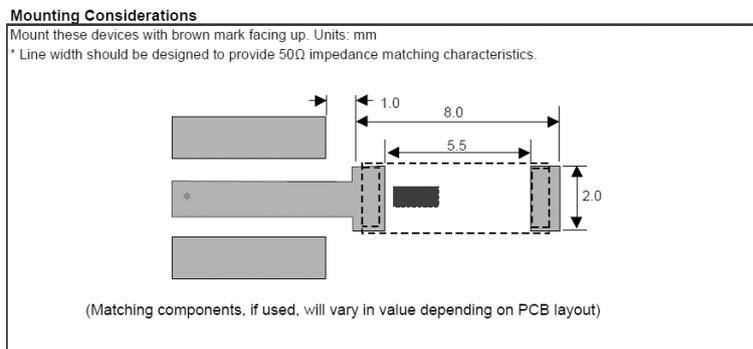


Abb. 54 - Layout: WLAN Antenne – Padanschluss-Konfiguration und vorgeschlagenes Layout

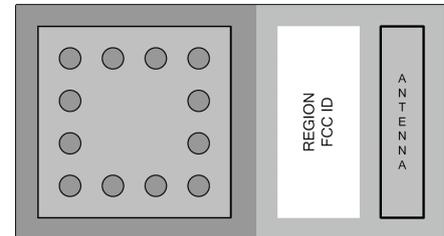


Abb. 53 - ZM5304 schematische Darstellung

Wichtig dabei zu beachten ist, dass die Leitung zur Antenne an die Antennenimpedanz (50Ω) angepasst wird. Dazu wurde das frei verfügbare Programm TX Line verwendet um die Dimensionen und Ausführung der Antennenleitung zur Implementierung richtig vorgeben zu können. Außerdem soll beachtet werden, dass es bei Leitungen auf welchen hohe Frequenzen auftreten wichtig ist, keine scharfen Kanten in die Leitung einzubauen, um Reflexionen an diesen Stellen zu vermeiden. Da es im allerersten Prototypen große Probleme mit dem Antennendesign gab, wurde entschieden ein π Netzwerk am Ende der Antennenleitung vorzusehen um eine eventuell notwendige Anpassung dieser vornehmen zu können. Wird das Netzwerk nicht benötigt, wird das Längsglied einfach mit einem OR Widerstand bestückt.

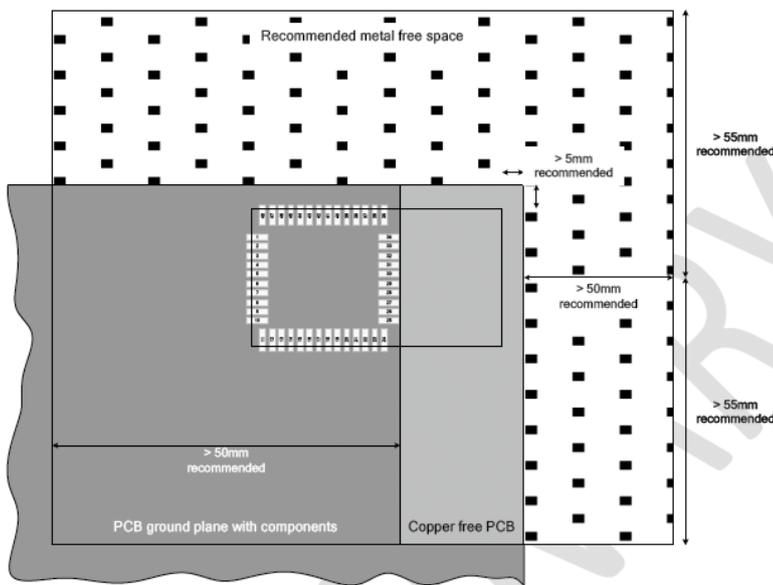


Abb. 55 - Layout: ZM5304 vorgeschlagene Mindestabstände

Da das verwendete ZWave Modul die Antenne integriert hat, und die moderate Geschwindigkeit der UART Schnittstelle keine spezielle Anpassung der Leitungsimpedanz erfordert, sind bei der Implementierung des Moduls auf das Baseboard nur wenige Vorkehrungen zu treffen. Die Blockkondensatoren zur Versorgung des Moduls sollen recht nahe an den Versorgungspins des Moduls platziert werden sowie die nötigen Abstände von leitenden Flächen zur Antenne eingehalten werden (siehe Abb. 55⁴⁰).

³⁹ Chipantenne – Johanson Technology 2450AT43A100

⁴⁰ ZWave ZM5304 Datasheet

In der nachfolgenden Abb. 56 ist die Implementierung der beiden Funkmodule am Baseboard (U22 – WLAN, U39 – ZWave) abgebildet. Gut zu erkennen sind die großflächigen Freistellungen der Kupferflächen im Bereich der Antennen.

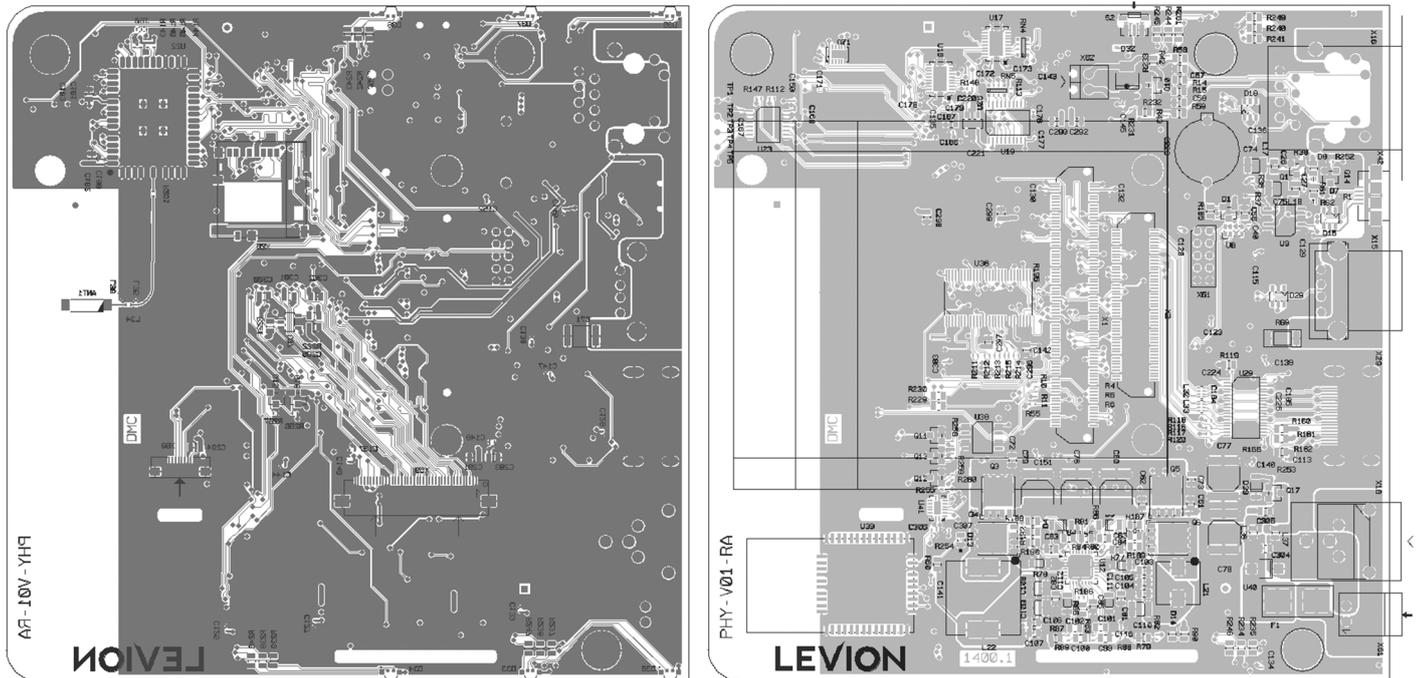


Abb. 56 - Layout: Implementierung von WLAN- (links) und ZWave-Modul(rechts)

3.3.5. Implementierung von Display und Touch

Wie schon im zugehörigen Schaltplanteil beschrieben wird das Display über ein FFC Kabel (Flat Flex Cable) angeschlossen. Das Kabel beinhaltet das komplette RGB Interface. Der LVDS zu RGB Umsetzer ist am Baseboard platziert. In der nachfolgenden Abb. 57 sind die beiden Anschlüsse für Display (X59) und Touch Interface (X60) zu erkennen. Die Kabel werden durch einen Schlitz in der Platine von den Steckern zum Display geführt. Der genaue Aufbau des Geräts ist im 4. Abschnitt beschrieben. Eine der wenigen Randbedingungen bei der Platzierung der Stecker war, dass sich keine Bauteile im Bereich zwischen Stecker und Kabeldurchbruch befinden um das Kabel nicht im Laufe der Zeit durchzuscheuern was zu einem Ausfall des Gerätes führen könnte.

Die Leitungen zum RGB Interface auf der Platine sind weniger kritisch als die Leitungen am Kabel direkt, denn da die RGB Leitungen direkt über einer GND Fläche verlaufen, sind die abgestrahlten Störungen in diesem Bereich recht gering einzuschätzen. Schlimmer ist die Länge des angeschlossenen Kabels, da sich dort wesentlich größere Leiterschleifen und dadurch Rahmenantennen, bedingt durch die großen Leiterabstände (RM 0.5mm) sowie wenigen GND Leitungen, zur Signalstrom Rückleitung, im Kabel selbst, ergeben. Die Leitungslänge des angesteckten Kabels wird hier ungefähr 10cm betragen. Zusätzlich werden die Leitungen aber dann dadurch verlängert, da diese bis zum LCD Treiber, welcher sich direkt im Display befindet, geführt werden. Daraus ergibt sich eine Gesamtlänge der RGB Leitungen von ca. 25cm. Die Ergebnisse im EMV Labor werden dann im 5. Abschnitt im Detail betrachtet. Jedoch kann hier schon festgestellt werden, dass ob der hohen Geschwindigkeiten (18bit @33MHz Pixeltakt) auf diesen Leitungen, sicherlich ein hohes Störpotential von diesen ausgeht.

Das zweite Interface für die Anbindung des Touch ist sehr unkritisch, da am I²C Bus mit sehr niedrigen Datenraten <100kbit gearbeitet wird und dadurch HF Abstrahlung nahezu keine Probleme bereiten sollte.

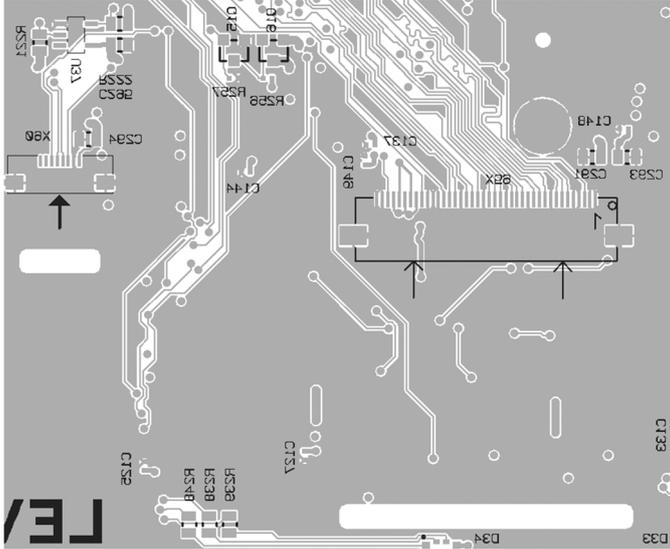


Abb. 57 - Layout: RGB und Touch Interface

4. Realisierung des Prototypen

In diesem Abschnitt soll kurz die Integration der einzelnen Hardwarekomponenten ins Gesamtsystem beschrieben werden. Prinzipiell kann der Aufbau in mehrere Einzelkomponenten aufgeteilt werden:

- Aluminium Rahmengehäuse
- Display und Touch Kombination
- Wandteil
- Kunststoffabdeckung
- Vibrationsmotor
- Baseboard
- imX6 Prozessorboard

In der folgenden Abb. 58, sind diese einzeln abgebildet. Das Display ist dabei schon fertig mit dem Aluminium Rahmengehäuse verklebt.

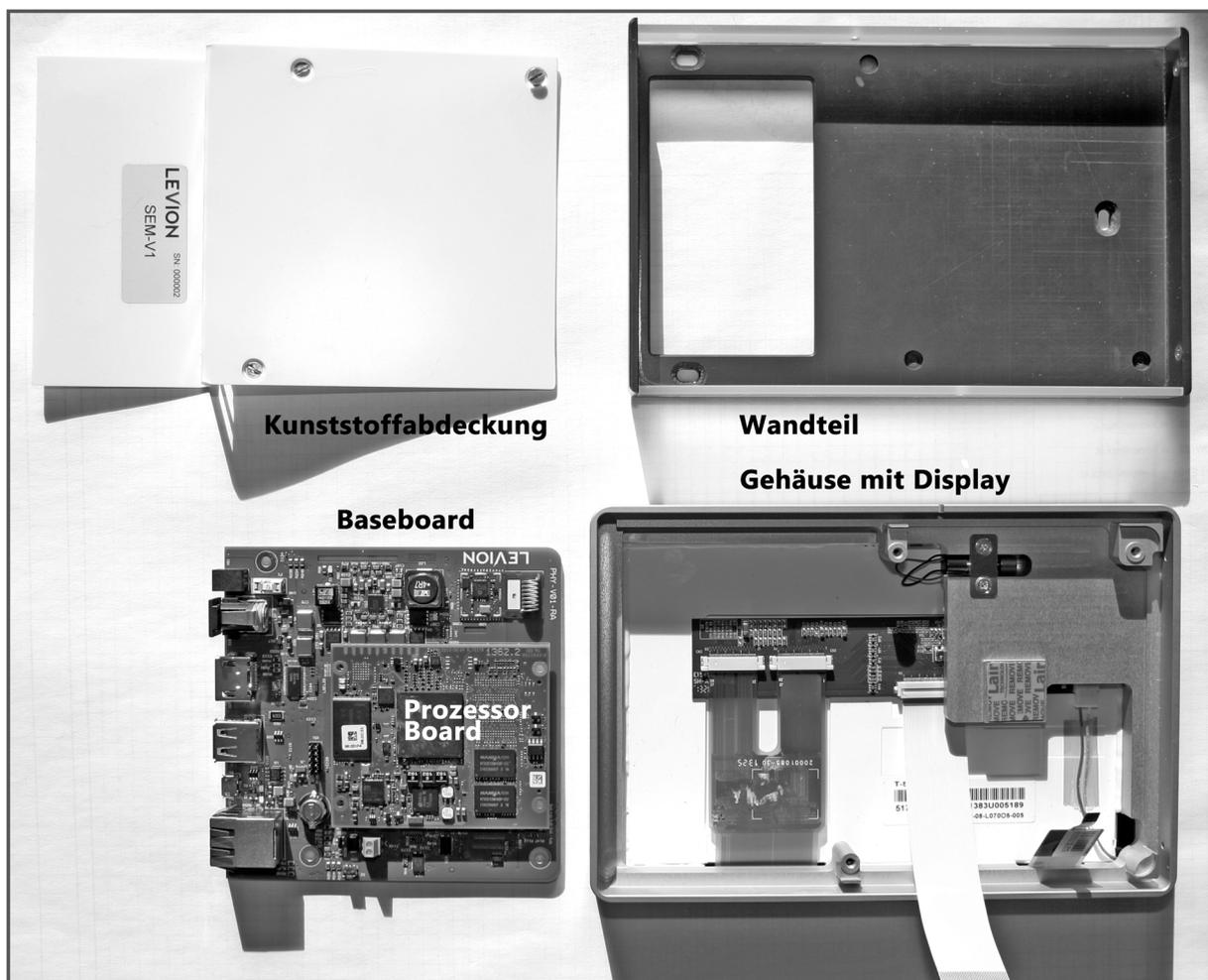


Abb. 58 - SEM: Übersicht der einzelnen Komponenten

Wie dabei auch zu erkennen ist, ist hier ein Wärmeleitpad im Aluminiumgehäuse auf einem ca. 4mm hohen Sockel angeklebt. Wird das Baseboard mit dem aufgesteckten Prozessormodul aufgesteckt, so liegt der Prozessor genau auf diesem auf um eine bestmögliche Wärmeabfuhr zu ermöglichen. Tests haben gezeigt, dass die Wärme durch das Aluminiumgehäuse sehr gut abtransportiert wird, sodass bei

durchgehendem Betrieb mit eingeschaltetem Display die Gehäuse Temperatur an der Außenseite maximal 35°C betrug. Vermutlich wäre daher das thermische Verbinden des Prozessors mit dem Aluminium Gehäuse nicht notwendig gewesen, da dieser nur sehr wenig Abwärme erzeugt und diese dann leicht per Konvektion abtransportiert werden kann. Außerdem sind in Abb. 59 und Abb. 60 auch die drei Anschraubpunkte für das Baseboard gut zu erkennen. Im zusammengesetzten Zustand erkennt man nun auch, warum Durchbrüche in der Platine für das Anstecken der FFC Kabel notwendig sind.

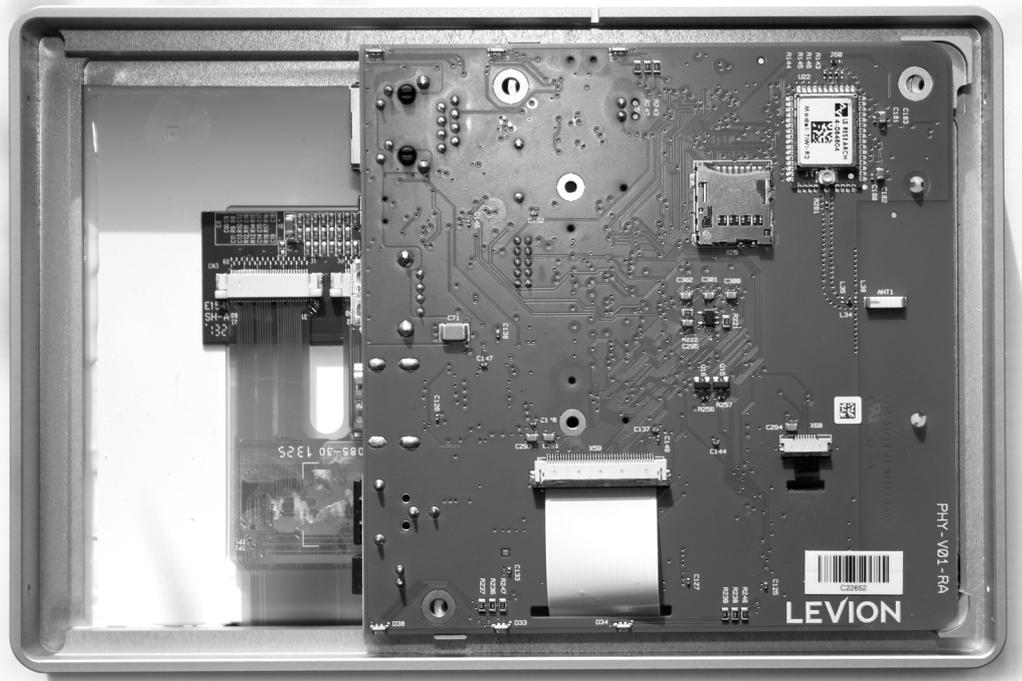


Abb. 59 - SEM: Gehäuse Rückseite ohne Kunststoffabdeckung



Abb. 60 - SEM: Gehäuse Rückseite mit Kunststoffabdeckung

Abb. 60 zeigt den zusammengebauten Zustand des Gehäuses. Das Wandteil wird an der Wand montiert und anschließend das gesamte Gerät einfach aufgesteckt. Mit 4 kleinen Schrauben wird dieses dann seitlich am Wandteil fixiert.

Durch die große Ausnehmung im Wandteil können Versorgungs- und\oder Netzwerkkabel durchgeführt werden, welche von links (Abb. 60) angesteckt werden können. Der große Freiraum dient dazu, um alle Stecker darin unterzubringen. Wird beispielsweise ein HDMI Kabel hier angesteckt so benötigt dieser Stecker nahezu die gesamte Breite.

Bei sehr genauer Betrachtung von Abb. 59 können jeweils 3 sehr kleine RGB Leds (oben und unten) am Platinen Rand ausgemacht werden. In Abb. 58 ist am Wandteil zu erkennen, dass dieser auf zwei Seiten einen halbtransparenten Kunststoff eingesetzt hat. Dieser hat die Aufgabe, dass die Leds ein diffuses Licht an die Wand werfen können und damit dem Benutzer beispielsweise sofort ein Feedback zu aktueller PV Erzeugung (grün) oder Bezug aus dem Netz (rot) geben können. Durch die Verwendung von RGB Leds können hier verschiedenste Farben ausgegeben werden.

In Abb. 61 ist der an die Wand montierte SEM in der Anwendung Wandmontage mit Unterputznetzteil abgebildet. Wie gewünscht trüben keine störenden Kabel das optisch ansprechende Design.



Abb. 61 - SEM: Anwendungsfall - Wandmontage

5. Messergebnisse im EMV Labor

In diesem Abschnitt sind einige Messergebnisse dokumentiert. Da diese im Rahmen einer Seminararbeit im EMV Labor des Instituts für Elektronik durchgeführt worden sind, wird dieses Kapitel nahezu vollständig aus [6] zitiert. Wie schon früher beschrieben gelten für den SEM die in der Norm EN 60730-1:2011 angeführten Prüfpegel und Grenzwerte. Als Softwareversion am SEM wurde eine Vorabversion verwendet, da die Software bei weitem noch nicht der Verkaufsversion entspricht. Die endgültigen Tests sollen dann nochmals in einem akkreditierten Prüflabor mit einer Release Softwareversion durchgeführt werden.

5.1. Störaussendung

In der Norm angegebene Störpegel haben den Zweck, dass in der Nähe befindliche elektronische Geräte durch das Betriebsgerät nicht gestört werden und weiterhin einwandfrei funktionieren. Die einzuhaltenden Grenzwerte sind in der für das Betriebsgerät zutreffenden Norm im Abschnitt Elektromagnetische Verträglichkeit zu finden und wurden im Rahmen dieser Arbeit schon in 2.3.1. aufgeführt.

5.1.1. Funkstörstrahlung

Die ersten Messungen des SEM in der HF Messzelle des Instituts für Elektronik lieferten folgende Ergebnisse:

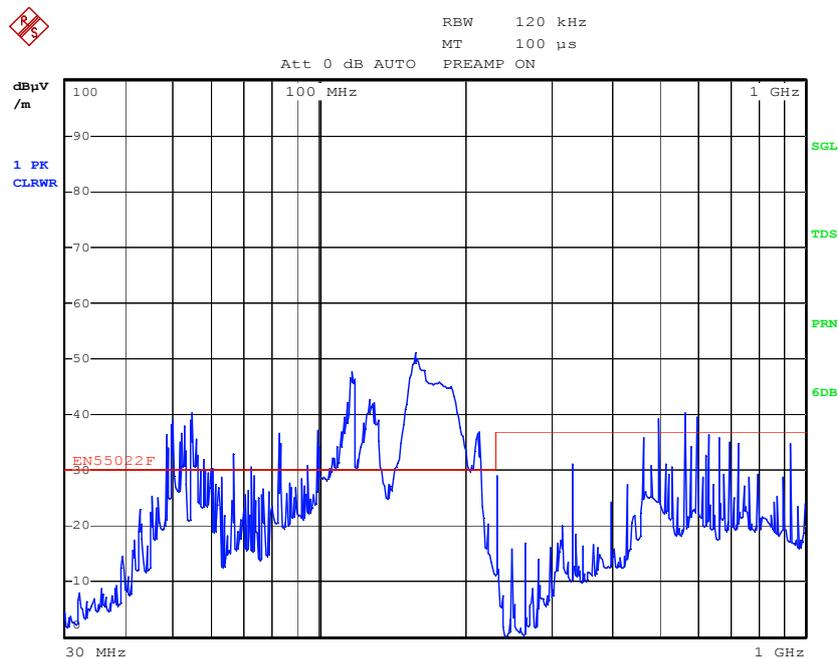


Abb. 62 - Messung: abgestrahlte elektromagnetische Felder

Vertikale sowie horizontale Polarisationsrichtung lieferten annähernd dasselbe Ergebnis. Dabei sind eindeutig Störer auszumachen welche an mehreren gemessenen Frequenzpunkten den Grenzwert weit überschreiten.

Die Identifikation dieser konnte schlussendlich auf drei dominante Störquellen zurückgeführt werden:

- Onboard Stepdown Schaltregler (12V → 5V/3,3V)
- LCD Display bzw. über 10cm langes FFC⁴¹ angeschlossene RGB Leitungen
- Ethernet Schnittstellen-IC

Auf der PCB direkt nach dem Spannungseingang wurden zur Dämpfung von Gleichtakt- sowie Gegentaktstörungen geeignete Filterstrukturen eingebaut, sodass die Störungen ausgehend vom Onboard Stepdown Schaltregler stark reduziert werden konnten. Die Auswirkung verschiedenster Filterstrukturen ist in [6] dokumentiert und diskutiert.

Es wurde auch festgestellt, dass das verwendete FFC Kabel als Störquelle fungiert. Dabei werden Oberwellen um die 500MHz, des 33,26MHz Pixeltaktes, welcher auf den RGB Leitungen anliegt, besonders gut abgestrahlt. Folgende Verbesserungsmaßnahmen könnten daher ergriffen werden:

- Verändern der Flankensteilheit durch verringern der Treiberstärke des Leitungstreibers.
- Schirmen der Datenleitungen sowie möglichst gute Anbindung des Schirms an die Schaltungsmasse.
- Ändern des Designs, sodass der LVDS zu RGB Umsetzer nur mehr mit einer äußerst kurzen FFC Leitung verbunden wird.
- Verändern der Flankensteilheit durch einsetzen geeigneter Filterstrukturen.

In [6] sind erstere drei dieser vier Maßnahmen detaillierter beschrieben und diskutiert sowie durchgeführte Verbesserungsmaßnahmen und Messergebnisse dazu dokumentiert. Die vierte Variante ist in dieser Arbeit im 6. Abschnitt 6. diskutiert.

5.1.2. Leitungsgeführte Störungen

Die Leitungsgeführten Störungen, welche durch unseren Prüfling, respektive den verwendeten Netzteilen (Steckernetzteil sowie Unterputznetzteil) verursacht werden, sind wie in nachfolgendem Aufbau (Abb. 63) dargestellt im EMV Labor des Instituts für Elektronik an der TU Graz gemessen worden.

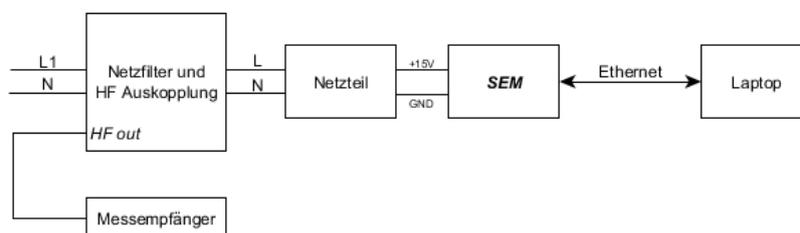


Abb. 63 - Prüfaufbau: leitungsgeführte Störungen [6]

Wie zu erwarten konnten bei diesen Messungen keine Grenzwertüberschreitungen im zu messenden Frequenzbereich von 150kHz bis 30MHz festgestellt werden. Detaillierter sind diese sowie weitere Schlussfolgerungen in [6] dokumentiert.

⁴¹ Flat Flex Cable

5.2. Störfestigkeit

Störfestigkeitsprüfungen haben den Zweck, dass Betriebsmittel welche Störungen in ihrer natürlichen Betriebsumgebung ausgesetzt sind, widerstehen und weiterhin funktionieren sowie im bestimmungsgemäßen Gebrauch verwendet werden können. Bei einem digital arbeitenden System kann schon jetzt vermutet werden, dass dieses nur sehr schwer in seiner Funktion gestört werden kann, da auch die verwendeten digitalen Schnittstellen, welche den meisten Störungen ausgesetzt sind, über automatische Fehlerkorrekturen verfügen. Eine Fehlfunktion des SEM durch externe Elektromagnetische Felder ist nicht zu erwarten. Einzig ESD-, Burst- und Surge Tests könnten durch schlechtes PCB Design oder fehlerhafte Schutzabstände zu Problemen führen. Die zu verwendenden Prüfspannungen sind in der für das Betriebsgerät zutreffenden Norm im Abschnitt Elektromagnetische Verträglichkeit zu finden und wurden schon im Rahmen dieser Arbeit in Abschnitt 2.3.2. 2.3.1. aufgeführt.

5.2.1. Einkopplung von abgestrahlten hochfrequente Elektromagnetischen Feldern

Wie schon in Abschnitt 2.3.2. erwähnt ist der Prüfaufbau dem zur Messung der abgestrahlten elektromagnetischen Felder ähnlich, mit dem Unterschied, dass diesmal die Antenne zur Bestrahlung des Prüflings eingesetzt wird. Da es sich um ein digitales System handelt, ist dieses nur sehr schwer zu beeinflussen.

Es konnte während der gesamten Prüfung, welche in [6] detaillierter protokolliert ist, keinerlei Fehlverhalten des Prüflings festgestellt werden.

5.2.2. Leitungsgeführte Störungen

In diesem Abschnitt werden leitungsgeführte Störungen wie Bursts, Surges, Spannungs-Einbrüche und Unterbrechungen sowie Leitungsgeführte HF betrachtet. Die genauen Messergebnisse der einzelnen Prüfungen sind in [6] dokumentiert.

5.2.2.1. Bursts

In den nachfolgenden Abb. 64 und Abb. 65 sind die Prüfaufbauten für die durchgeführten Burst Tests schematisch dargestellt.

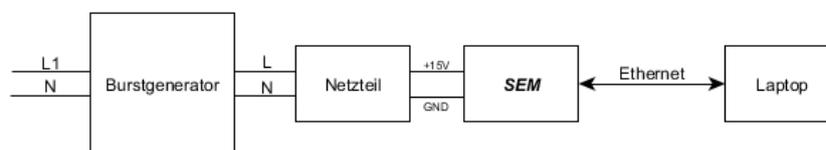


Abb. 64 - Prüfaufbau: Bursts auf der Netzzuleitung [6]

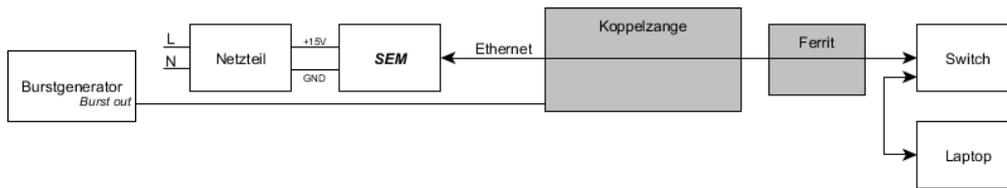


Abb. 65 - Prüfaufbau: Bursts auf Datenleitungen [6]

Auch bei diesen Tests konnte keinerlei Beeinflussung des Prüflings festgestellt werden, obwohl mit höheren Spannungen als notwendig geprüft wurde. Eine detaillierte Dokumentation davon befindet sich in [6].

5.2.2.2. Surges

Surge Prüfungen sind sehr Energiereich und beinhalten dadurch auch das größte Zerstörungspotential. Daher wurden diese Prüfungen zuletzt durchgeführt. Auch für diese Prüfungen war es notwendig zwei separate Tests durchzuführen. Einerseits kann die Fehlerspannung zwischen dem Ethernet-Schirm und dem Erdleiter auftreten (Abb. 66), andererseits können diese gefährlichen induzierten Spannungen auch zwischen den einzelnen Leitern der Hausinstallation auftreten (Abb. 67). Daher muss auch primär in unserer Anwendung das eingesetzte Netzteil diese Prüfungen bestehen.

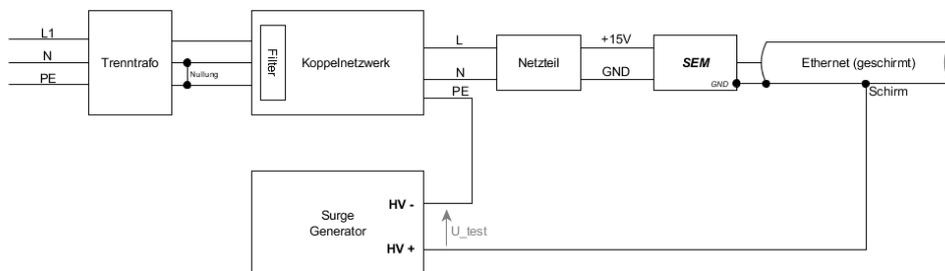


Abb. 66 - Prüfaufbau: Surgeprüfung (Ethernet Schirm-PE) [6]

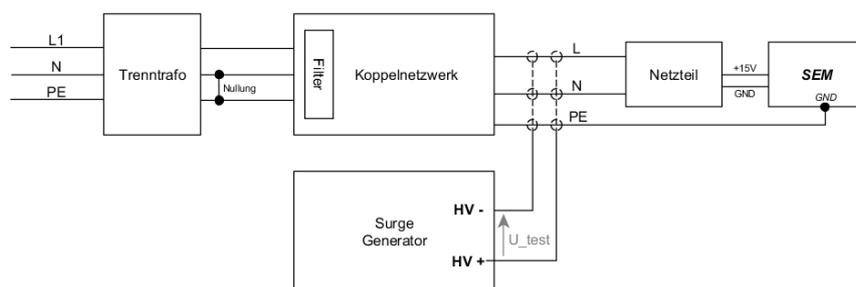


Abb. 67 - Prüfaufbau: Surgeprüfung (L-N-PE) [6]

Auch bei diesen Tests konnte keinerlei Beeinflussung des Prüflings festgestellt werden. Auch ein Ansprechen der Schutzstrukturen konnte durch Messung des Stromes vom Surge Generator nicht nachgewiesen werden. Dies ist ein Indiz dafür dass das Betriebsgerät die Prüfungen schadlos überstanden hat.

5.2.2.3. Spannungs- Einbrüche und Unterbrechungen

Da die meisten Schaltnetzteil für Netzspannung schon im großen Bereich von 115-230V funktionieren, wurde vermutet, dass Spannungseinbrüche kein Problem darstellen. In den durchgeführten Messungen wurde zuerst die Netzspannung auf das in der Norm geforderte Spannungsniveau mithilfe eines Stelltransformators heruntergestellt (Abb. 68).

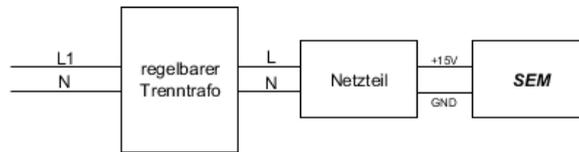


Abb. 68 - Prüfaufbau: Spannungseinbrüche [6]

Weiters konnte mit einem Thyristorunterbrecher die Netzspannung für mehrere Netzperioden unterbrochen werden (Abb. 69).

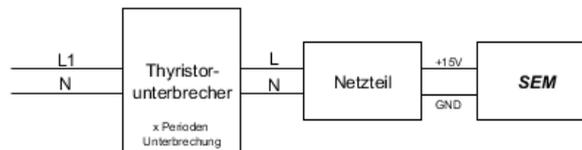


Abb. 69 - Prüfaufbau: Spannungsunterbrechungen [6]

Beide Prüfungen wurden laut Beurteilungskriterien, welche in der Norm angeführt sind bestanden. Eine detaillierte Beschreibung der Einzelprüfungen ist auch hier in [6] zu finden.

5.2.2.4. Einkopplung hochfrequenter leitungsgeführter Störungen

Auf langen Leitungen (laut Norm: >3m Leitungslänge) ist es notwendig leitungsgeführte hochfrequente elektromagnetische Felder einzukoppeln. Dies wurde durch ein CDN bewerkstelligt.

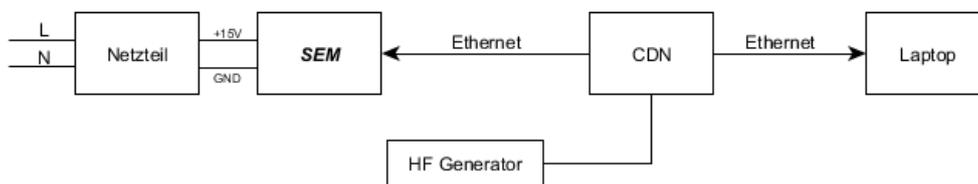


Abb. 70 - Prüfaufbau: Einkopplung leitungsgeführter hochfrequenter Elektromagnetischer Felder [6]

Da normalerweise ein fehlerkorrigierendes Protokoll verwendet wird (TCP) können Übertragungsfehler solange ausgeschlossen werden, solange eine Übertragung möglich ist. Daher wurden für diese Prüfung UDP Pakete an einen Laptop gesendet, welche keine Fehlerkorrektur besitzen, um festzustellen ob durch das Einprägen einer Störung diese Übertragung gestört wird. Da jedoch kein einziges Paket verloren ging, kann attestiert werden, dass im Anwendungsfall durch die Verwendung von TCP keinerlei Probleme durch leitungsgeführte HF zu erwarten sind. Eine detailliertere Beschreibung der Prüfung und Ergebnisse ist in [6] zu finden.

5.2.3. Elektrostatische Entladung

ESDs können im Normalbetrieb bei unserem metallischen Gehäuse nahezu immer auftreten, wenn beispielsweise der Benutzer vorher über einen Teppich geht, dabei Ladungen „aufammelt“ und diese dann in das Gehäuse entlädt. Daher war wichtig, dass der Benutzer möglichst keine Effekte durch ESDs bemerkt.

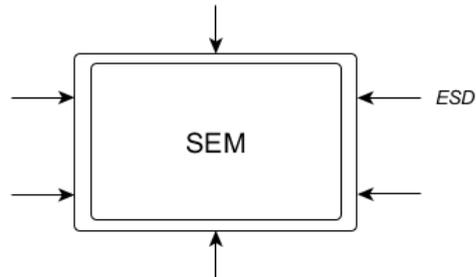


Abb. 71 - Prüfaufbau: ESD Prüfung [6]

Das Gehäuse wurde mit den in der Norm geforderten Prüfspannung, Luft- sowie Kontaktentladung direkt und indirekt an mehreren Stellen (siehe Abb. 71) mit ESD Impulsen „beschossen“. Auch freie Enden von Datenleitungen können durch ESD geprüft werden. Denkbar ist, dass besonders bei Ethernet es möglich sein kann, dass beim Anfassen des Kabelendes ein ESD Impuls in eine Leitung eingepreßt werden könnte. Bei allen Prüfungen konnte keine dauerhafte Beeinflussung des Prüflings festgestellt werden. Lediglich bei direktem Gehäusekontakt wurden Zeilenfehler am Display festgestellt, welche jedoch augenblicklich wieder verschwanden, da das Display eine Bildwiederholfrequenz von 60Hz besitzt. Detaillierte Bilder zu den Prüfungen sind in [6] nachzuschlagen.

6. Verbesserungspotentiale hinsichtlich EMV

Wie schon in den vorhergehenden Kapiteln bemerkt, ist es notwendig einige Maßnahmen zu treffen um die geltenden EMV Prüfungen mit den entsprechenden Grenzwerten, besonders die abgestrahlte HF Störstrahlung betreffend einzuhalten.

Grundsätzlich kann hier angemerkt werden, dass ein Gehäuse, welches vollständig aus Aluminium bestehen würde, sicherlich einige Vorteile mit sich bringt. Ist dieses elektromagnetisch „dicht“, d.h. alle Teile sowie auch Deckel sind flächig leitend, mit z.B. EMV Dichtungen, miteinander verbunden, so kann davon ausgegangen werden, dass es zu keiner bzw. nur sehr geringer Störaussendung kommen würde. Dieser Lösungsansatz kann für dieses Gerät leider nicht verwendet werden, denn einerseits gibt es das Display, welches ja sichtbar bleiben muss und dieses keinesfalls eine besondere Schirmung gegenüber EMV bietet. Spezielle durchsichtige Materialien, welche zusätzlich leitende metallische Schichten eingearbeitet haben, können verwendet werden um speziell auch Geräte mit Displays, aus elektromagnetischer Sicht abdichten zu können. Da es für die verwendeten Funkmodule notwendig ist, dass das Metallgehäuse Öffnungen besitzt, ist eine vollständige elektromagnetische Abdichtung in dieser Anwendung jedoch keinesfalls gewünscht.

Um die Elektromagnetische Verträglichkeit zu verbessern musste daher versucht werden, Störquellen zu identifizieren und geeignete Maßnahmen zu setzen um ein Ausbreiten der Störung über die gesamte PCB zu verhindern bzw. entstehenden Störströmen besonders kurze Rückwege zu ihrer Quelle zu bieten. Da es verschiedenste Störquellen im Design gab, werden an dieser Stelle nur Maßnahmen betrachtet welche in konkretem Zusammenhang mit dem verwendeten Display stehen, da die weiteren gesetzten Maßnahmen um die Störstrahlung, welche vom Onboard Schaltnetzteil ausgeht, zu verringern, in [6] vollständig dokumentiert sind.

6.1. Re-Design Maßnahmen

Während der Re-Design Phase, welche sich ,ob eines aufwändigen Re-Design Schrittes bei Änderungen an der Basisplatine, über mehrere Monate erstreckte, wurden verschiedenste Lösungsansätze sowie Kombinationen davon, getestet und in mehreren Durchläufen im EMV Prüflabor in Villach⁴² durch Messungen in der HF Messzelle verifiziert.

6.1.1. Schaltplan

In einem ersten Re-Design Schritt wurde versucht durch verändern der Flankensteilheit auf den 24 RGB Leitungen zum Display die HF Abstrahlung, besonders im oberen f-Bereich ab 300MHz, zu verringern. Die Überlegung war, dass durch den Einbau von Filtern, welche ab 50MHz eine starke Dämpfung aufweisen, die HF Störstrahlung sich auch dementsprechend stark verringern sollte. Dazu wurden die Filter (siehe Abb. 74) so nah wie möglich nach dem LVDS zu RGB Wandler auf der Platine platziert. Bei den Filterelementen handelte es sich um gerichtete L/C Filternetzwerke des Typs NFA21SL506X1A48 von muRata.

⁴² <http://emv-labor.fh-kaernten.at/>

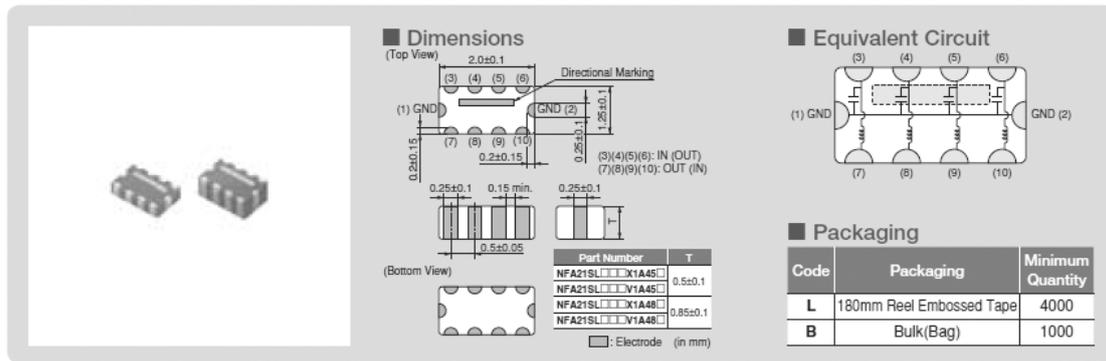


Abb. 72 - NFA21SL506X1A48 Packaging

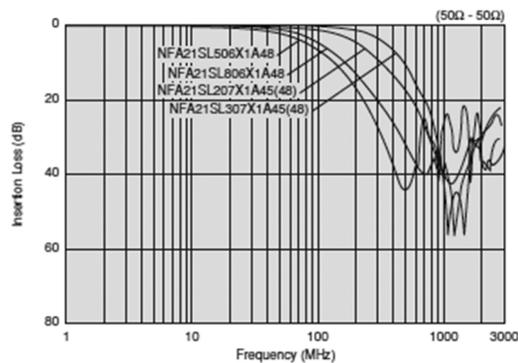


Abb. 73 - NFA21SL506X1A48 Charakteristik

Durch den Einbau der Filterelemente konnten, wie schon erwähnt, die abgestrahlten HF Störungen zwar etwas verringert werden, jedoch wird der notwendige Prüfpegel noch immer überschritten (Abb. 75). Da auch weitere Maßnahmen wie der Einbau von EMV Dichtungen rund um das Display auch keine nennenswerten Verbesserungen brachten, wurde nach einem weiteren Lösungsansatz gesucht.

In weiterer Folge wurde daher festgelegt, dass der eigentliche zu messende Betriebszustand des Gerätes jener ist, bei welchem das Display inklusive der kompletten Grafikeinheit abgeschaltet ist. Denn der Haupteinsatzzweck des Geräts soll dem Anwender dabei helfen Energie zu sparen. Daher wird das Display nach 1 Minute automatisch deaktiviert. Dieser Zustand wird über den gesamten Tageszeitraum der vorrangig aktive Betriebszustand (>99% der Zeit) sein.

Dem Benutzer werden in späterer Folge weitere komfortablere Möglichkeiten über Applikationen und Browser auf mobilen Geräten (Tablets, PCs oder Smartphones) zu Verfügung stehen, um Informationen von dem Gerät abzurufen, oder Einstellungen darauf zu verändern, ohne wirklich das Display benutzen zu müssen.

Ist das System aktiv, jedoch das Display deaktiviert, so kann in Abb. 77 in Abschnitt 6.2. festgestellt werden, dass die Störstrahlung im Spektrum bis 1GHz weit unter den vorgegebenen Grenzwerten liegt. Weitere Messungen bis 6GHz, welche in [6] dokumentiert sind belegen, dass auch im erweiterten Messbereich alle Grenzwerte eingehalten werden.

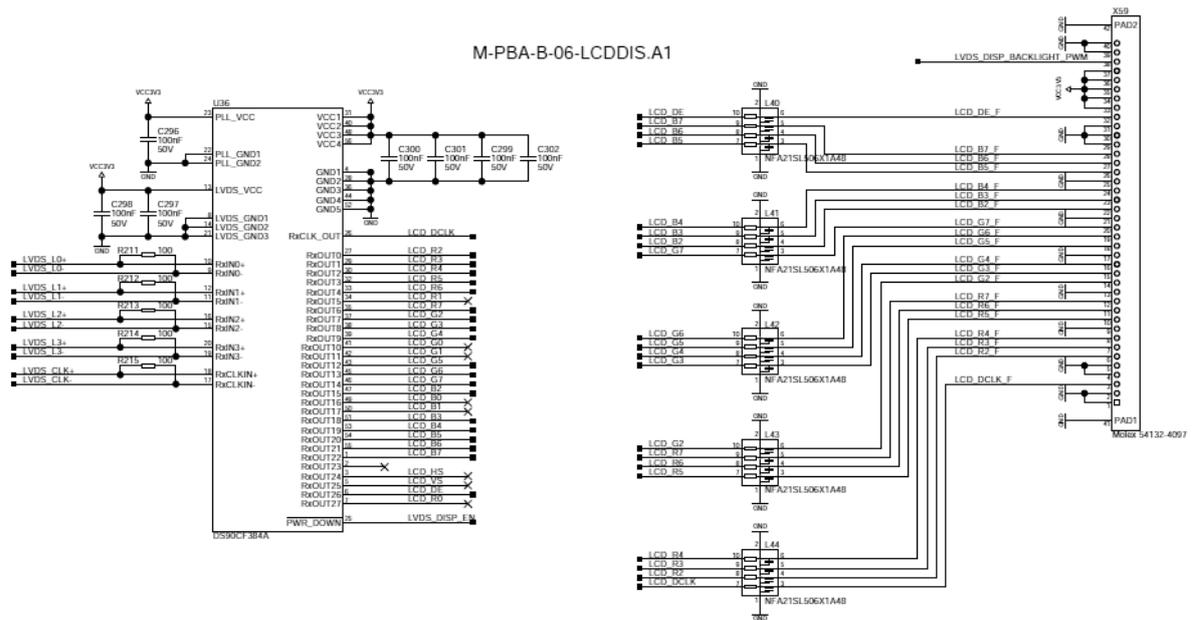


Abb. 74 - Schaltplan: LVDS - RGB Converter nun mit Filterelementen

Nach Rücksprache mit mehreren Experten wurde festgestellt, dass es mit diesem Display womöglich keine Chance gibt die HF Störstrahlung in den Griff zu bekommen, da es sich um ein Importprodukt handelt und dieses eventuell für den Industriebereich entwickelt wurde, für welchen andere Pegel für die HF Störstrahlung gelten. Ob des zeitnah geplanten Marktstarts und den Prototypeninstallationen, sollen mit diesem Display erste Geräte verkauft werden. Zusätzlich dazu ist für das folgende Jahr ein Redesign mit einem anderen Display geplant sodass dieses kleine Problem auch nicht mehr bestehen kann.

Des Weiteren wurde nach Abschaltung des Displays festgestellt, dass es weitere HF Störer bei 375MHz gibt. Durch Variation des Aufbaus (Gehäuse mit Platinen Masse verbunden / nicht verbunden) konnte

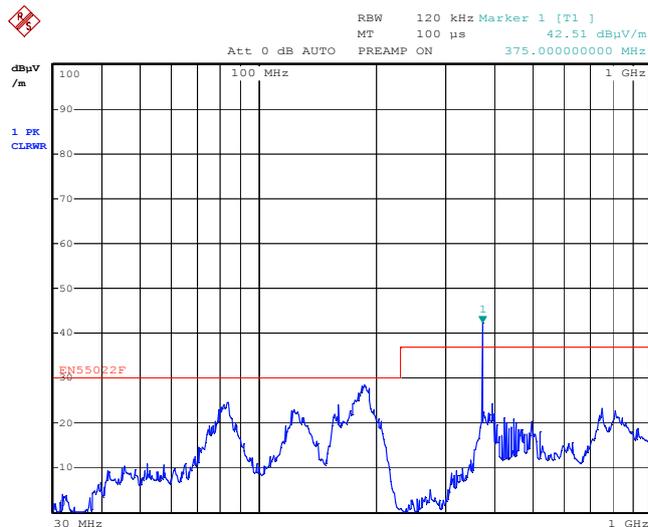


Abb. 75 - Störaussendung bei abgeschaltetem Display

man feststellen, dass es Störfrequenzen gibt welche einen gemeinsamen Teiler mit 125MHz besitzen. Dies ist in der Tat die Arbeitsfrequenz des Gigabit Ethernet IC's welcher am Prozessorboard verbaut ist. Durch vergrößern des Abstandes der Prozessorplatine zum Aluminiumgehäuse konnte die in Abb. 75 sichtbare Störung stark verringert werden. Daher wurde versucht diesen Störer gezielt abzuschirmen. Die Ergebnisse dieser teilweisen Schirmung der Prozessorplatine sind in nachfolgendem Kapitel 6.2. dokumentiert.

6.1.2. PCB Design

Wie bereits in 6.1.1. erwähnt ist es sinnvoll die Filterelemente nahe am RGB zu LVDS Converter zu platzieren. Außerdem ist eine gute Anbindung der Filter an die Platinen-Masse notwendig, sodass hochfrequente Anteile der 33MHz Signale mit so geringer Impedanz als möglich abgeleitet werden können und um den Weg des Störstromes kurz zu halten also keine zusätzliche Rahmenantenne zu produzieren. Durch die schon festgestellten Maßnahmen (Schirmung des Prozessorboards) wurde zumindest im Layout kein weiterer Anpassungsschritt vorgenommen.

6.2. Verifikation der durchgeführten Verbesserungen

Nachfolgende Messungen (Abb. 76, Abb. 77) wurden schon im EMV Prüflabor der FH Kärnten in Villach durchgeführt. Darin sind die Extremwerte der Messungen in horizontaler sowie vertikaler Polarisationsrichtung aufgetragen. In Vorabmessungen konnte festgestellt werden, dass die eingebauten Filter zwar theoretisch helfen sollten, sich aber leider an der HF Störstrahlung nur wenig änderte, sodass auch durch den Einbau von Filtern auf den RGB Leitungen die abgestrahlten Pegel den durch die Norm erlaubten Grenzwert noch immer um ein Vielfaches überschritten. Dies ist in Abb. 76 dokumentiert.

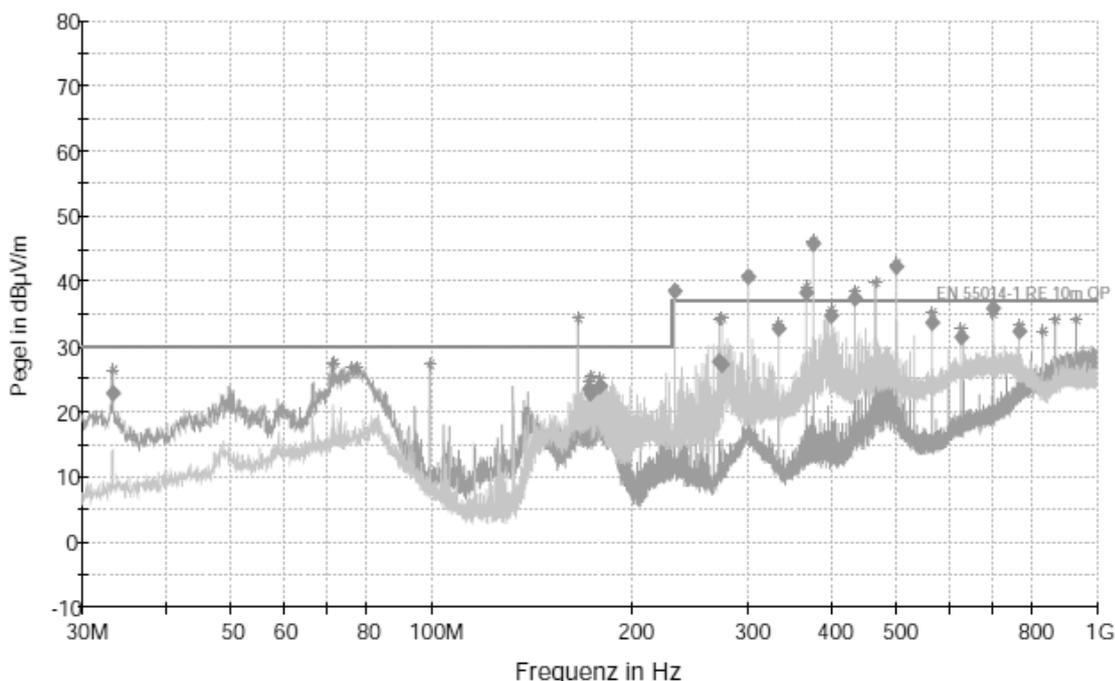


Abb. 76 - HF Störstrahlung trotz der Verwendung von Filtern auf den RGB Leitungen [6]

In Abb. 77 ist die letzte durchgeführte Messung von abgestrahlten HF Feldern dokumentiert. Für den Prüfaufbau wurde wie in [6] erläutert, das Prozessorboard im Bereich des Gigabit Ethernet IC's mit einer auf Masse verbundenen Kupferfolie geschirmt, die Hauptplatine mit dem Aluminiumgehäuse leitend verbunden und das Display deaktiviert, da diese Variante schon im Labor in Graz gute Ergebnisse erzielte.

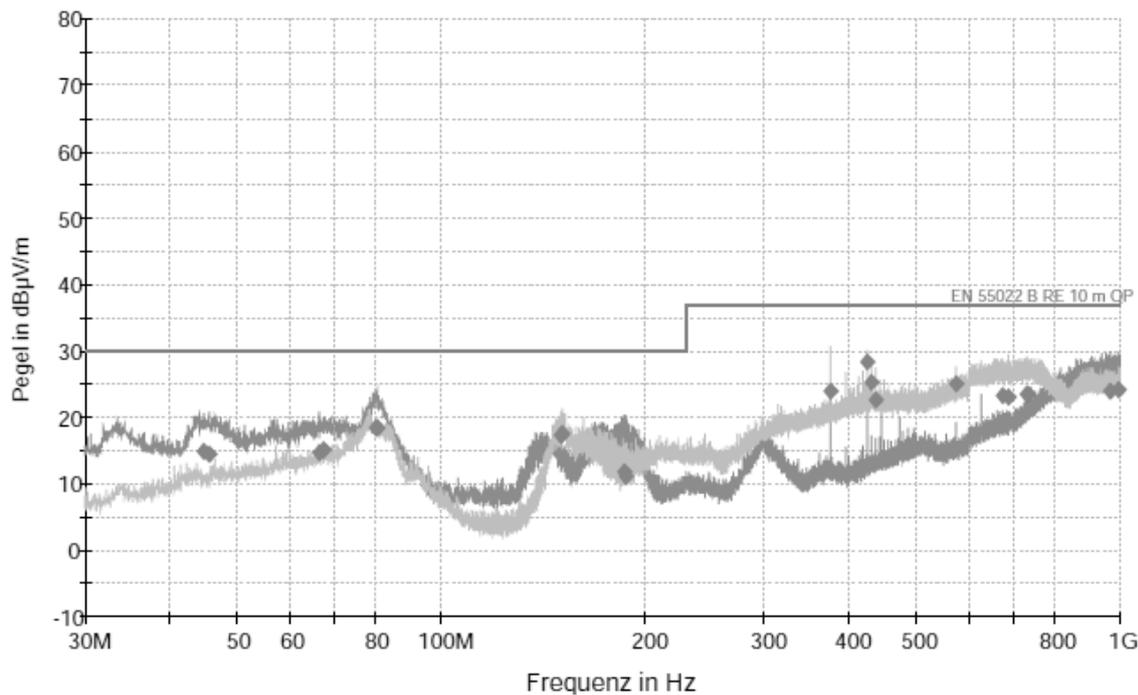


Abb. 77 - HF Störstrahlung nach einer Teilweisen Schirmung des Prozessorboards und Deaktivierung des Displays (repräsentativer Betriebszustand)[6]

6.2.1. Diskussion der Ergebnisse

Um den Umfang dieser Arbeit nicht zu stark zu vergrößern, wurden in diesem Abschnitt nur die letzten vorgenommenen Modifikationen, welche dann zur Lösung des Problems beigetragen haben, dokumentiert.

Durch das Abschalten des Displays, respektive der Grafikeinheit des Prozessors, konnten die 33MHz sowie deren Oberwellen tatsächlich komplett eliminiert werden. Ob es durch kapazitive Kopplungen in das Aluminiumgehäuse oder tatsächlich ausgehend vom Display zu einer Abstrahlung der 33MHz sowie deren Oberwellen kommt sollte in weiteren Versuchen ohne Aluminiumgehäuse noch geklärt werden. Da momentan alle verfügbaren Displays für den SEM fix mit dem Aluminiumrahmen verklebt waren konnte dies nicht geprüft werden. Wichtig war jedoch vorerst, dass es mit dem momentanen Aufbau möglich ist, den vorgegeben Grenzwert einzuhalten, um die „Time-to-Market“ so gering als möglich halten zu können. Mit einer speziellen EMV Dichtung wurde auch versucht den Displayrahmen leitend mit dem Gehäuse zu verbinden, leider auch ohne Erfolg.

In den vielen Stunden im Prüflabor in Villach sowie in Graz wurden noch verschiedene andere Ansätze zur Lösung des Problems betrachtet, sowie weit über hundert Messungen alleine zu den Störungen welche vom Display ausgehen durchgeführt, welche vermutlich, bedingt durch die Komplexität des vorhandenen Problems an sich, alleine eine eigene Arbeit darstellen könnten.

7. Schlussbemerkungen

Abschließend kann man feststellen, dass es schon während der Konzeptionierung des Systems wichtig ist, zu wissen welche Normen zutreffend und welche Grenzwerte einzuhalten sind. Während der fast einjährigen Entwicklungszeit hat sich gezeigt, dass bei der Realisierung eines Prototypen unter Beachtung aller in der Norm genannten Gesichtspunkte, ein wesentlicher Faktor in der Auswahl der verwendeten Materialien und Bauteile liegt.

So wurde bereits schon in einem sehr frühen Stadium der Entwicklung entschieden, auf ein externes Netzteil zu setzen, da dadurch viele potentielle Fehlerquellen (HF Störaussendung sowie Störfestigkeit) in den benötigten EMV Prüfungen vermieden und auch das sehr heikle Thema Sicherheit, für Systemspannungen >50V, ausgelagert werden kann.

Auch der Aufbau des Geräts wurde bewusst so gewählt, dass für die Demontage an der Wand ein Werkzeug notwendig ist. Dadurch ist im Normalbetrieb nur das Aluminiumrahmengehäuse außen berührbar, was die Anzahl der durchzuführenden Prüfungen reduziert. Außerdem können alle notwendigen Kabelverbindungen durch die geschlossene Bauform quasi im Gehäuse versteckt werden und dies trägt wiederum auch zu dem wertigen Erscheinungsbild des Geräts bei. Denn schon Aussehen und Haptik wurden in der Designphase berücksichtigt, schließlich sollte dem potentiellen Kunden ein wertiges Gerät vermittelt werden um sich auch dadurch von verfügbaren Konkurrenzprodukten abzugrenzen.

Da die Messzelle zur Messung der HF Störstrahlung im EMV Labor der TU Graz sehr klein ist, ist es leider nicht möglich die Messergebnisse wie im Normaufbau in einem akkreditierten Prüflabor nachzustellen, besonders wenn Störungen über die Versorgungsleitung abgestrahlt werden. Daher wurden besonders diese Messergebnisse immer wieder kritisch hinterfragt und müssen auf jeden Fall zu einem späteren Zeitpunkt nochmals in einem akkreditierten Labor verifiziert werden.

Alle anderen Messungen können jedoch mit der Ausrüstung welche am Institut für Elektronik zur Verfügung gestellt wurde, ohne Probleme normgerecht aufgebaut und gemessen werden.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 - SEM als zentrales Steuergerät für ein intelligentes Energiemanagement.....	13
Abb. 2 - Aufbau zur Messung von Funkstörspannung auf Leitungen [9]	21
Abb. 3 - Messzelle zur Erfassung Hochfrequenter EM-Felder [9].....	21
Abb. 4 - Prüfaufbau zur Prüfung der Störfestigkeit gegenüber ESD [9].....	24
Abb. 5 - Prüfaufbau zur Einkopplung von schnellen Transienten in die Netzzuleitung (Bursts) [9].....	25
Abb. 6 - Prüfaufbau zur kapazitiven Einkopplung schneller Transienten in Signal und Datenleitungen [9].....	26
Abb. 7 - Prüfaufbau zur Einkopplung Leitungsgeführter Störgrößen auf Netzleitungen Signal und Datenleitungen [9]	27
Abb. 8 - Einkopplung energiereicher transienten (Surge) [9]	28
Abb. 9 - Gesamtsystemübersicht SEMS	29
Abb. 10 - Kennzeichnungen am Netzteil	30
Abb. 11 - ausgewähltes Netzteil	30
Abb. 12 - Display - Touch Kombination - Abmessungen, Auszug aus Datenblatt	32
Abb. 13 - Vibrationsmotor.....	32
Abb. 14 - Micro SD Card Slot	33
Abb. 15 - Ethernetbuchse.....	33
Abb. 16 - USB A-Buchse.....	33
Abb. 17 - Micro USB.....	34
Abb. 18 - HDMI	34
Abb. 19 - WLAN Modul	34
Abb. 20 - ZWave Modul	34
Abb. 21 - Phoenix Micro Combicon	35
Abb. 22 - DC Rundstecker Buchse.....	35
Abb. 23 - i.MX 6 Solo Block Diagramm.....	36
Abb. 24 - i.MX 6 - Thermisches Management	37
Abb. 25 - SEM Blockdiagramm	38
Abb. 26 - imx6-quad-top-view.....	39
Abb. 27 - imx6-quad-Bottom-view	39
Abb. 28 - Verpolschutz und Eingangsfiler für die DC Spannungsversorgung.....	40
Abb. 29 - Schaltverluste eines MOSFETs	41
Abb. 30 - Schaltplan: Step-down Regler.....	41
Abb. 31 - USB Stecker	41
Abb. 32 - Schaltplan: ESD Schutzdiodenarray	42
Abb. 33 - Schaltplan: USB Schutzstrukturen	43
Abb. 34 - Schaltvorgang eines MOS Inverters (P Channel 'ON' zu N Channel 'ON' Übergang)	44
Abb. 35 - Stromkompensierte Drossel (2 differentielle Paare)	44
Abb. 36 - Ethernet Übertrager.....	45
Abb. 37 - Schaltplan: Ethernet Schutzbeschaltung.....	46
Abb. 38 - Schaltplan: USB Interfaces.....	46
Abb. 39 - Schaltplan: HDMI Schnittstelle	47
Abb. 40 - TPD12S521.....	47

Abb. 41 - TPD12S521 Connection	47
Abb. 42 - 802.11 Kanaleinteilung.....	48
Abb. 43 - 802.11 verschiedene Standards [11]	49
Abb. 44 - Schaltplan: WLAN Modul mit SDIO Interface und angeschlossener Chip Antenne.....	50
Abb. 45 - Schaltplan: ZWave Modul.....	51
Abb. 46 - Schaltplan: LVDS-RGB.....	52
Abb. 47 - Schaltplan: Touch Interface	52
Abb. 48 - PCB Layer Stackup	53
Abb. 49 - Schaltplan: +3V3 Ausgang des Reglers.....	54
Abb. 50 - Layout: Spannungsregler (+3V3 Teil)	54
Abb. 51 - Layout: Ethernet	55
Abb. 52 - Layout: HDMI Interface	56
Abb. 54 - Layout: WLAN Antenne – Padanschluss-Konfiguration und vorgeschlagenes Layout.....	57
Abb. 53 - ZM5304 schematische Darstellung.....	57
Abb. 55 - Layout: ZM5304 vorgeschlagene Mindestabstände	57
Abb. 56 - Layout: Implementierung von WLAN- (links) und ZWave-Modul(rechts).....	58
Abb. 57 - Layout: RGB und Touch Interface	59
Abb. 58 - SEM: Übersicht der einzelnen Komponenten	60
Abb. 59 - SEM: Gehäuse Rückseite ohne Kunststoffabdeckung.....	61
Abb. 60 - SEM: Gehäuse Rückseite mit Kunststoffabdeckung	61
Abb. 61 - SEM: Anwendungsfall - Wandmontage	62
Abb. 62 - Messung: abgestrahlte elektromagnetische Felder	63
Abb. 63 - Prüfaufbau: leitungsgeführte Störungen [6]	64
Abb. 64 - Prüfaufbau: Bursts auf der Netzzuleitung [6]	65
Abb. 65 - Prüfaufbau: Bursts auf Datenleitungen [6]	66
Abb. 66 - Prüfaufbau: Surgeprüfung (Ethernet Schirm-PE) [6]	66
Abb. 67 - Prüfaufbau: Surgeprüfung (L-N-PE) [6]	66
Abb. 68 - Prüfaufbau: Spannungseinbrüche [6]	67
Abb. 69 - Prüfaufbau: Spannungsunterbrechungen [6].....	67
Abb. 70 - Prüfaufbau: Einkopplung leitungsgeführter hochfrequenter Elektromagnetischer Felder [6]	67
Abb. 71 - Prüfaufbau: ESD Prüfung [6].....	68
Abb. 72 - NFA21SL506X1A48 Packaging	70
Abb. 73 - NFA21SL506X1A48 Charakteristik	70
Abb. 74 - Schaltplan: LVDS - RGB Converter nun mit Filterelementen.....	71
Abb. 75 - Störaussendung bei abgeschaltetem Display	71
Abb. 76 - HF Störstrahlung trotz der Verwendung von Filtern auf den RGB Leitungen [6]	72
Abb. 77 - HF Störstrahlung nach einer Teilweisen Schirmung des Prozessorboards und Deaktivierung des Displays (repräsentativer Betriebszustand)[6].....	73

Ein weiterer Abdruck bzw. weitere Verwendung der Abbildungen sind vom Urheber genehmigungspflichtig.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Hochfrequente elektromagnetische Abstrahlung	20
Tabelle 2 - Einteilung und Übersicht über Prüfungen.....	22
Tabelle 3 - Kriterien für die Übereinstimmung.....	23
Tabelle 4 - Prüfschärfegrad für elektrostatische Entladungen.....	24
Tabelle 5 - Prüfschärfegrad für hochfrequente elektromagnetische Felder an Gehäusen	25
Tabelle 6 - Prüfschärfegrad für hochfrequente elektromagnetische Felder an Gehäusen	25
Tabelle 7 - Prüfschärfegrad für Burst.....	26
Tabelle 8 - Prüfanwendung der Prüfung mit schnellen transienten elektrischen Störgrößen/Burst....	26
Tabelle 9 - Prüfschärfegrad für leitungsgeführte Störgrößen auf Netzleitungen, Ein- Ausgangsleitungen und Gleichstromversorgungsleitungen.....	27
Tabelle 10 - Prüfschärfegrad für Spannungstöße	28
Tabelle 11 - Spannungseinbrüche (50 Hz/60 Hz).....	28
Tabelle 12 - Spannungsunterbrechung (50 Hz/60 Hz)	28

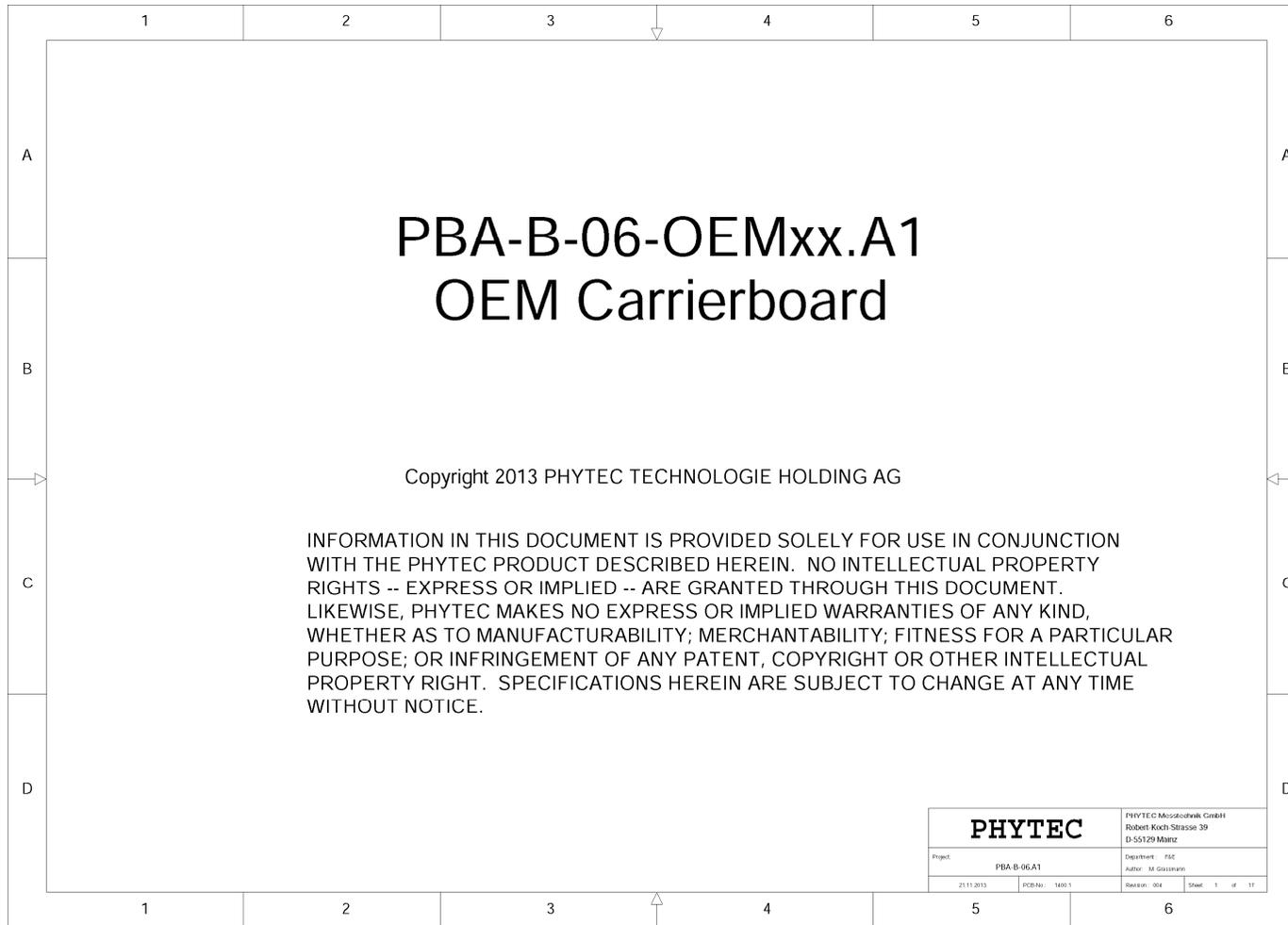
Literaturverzeichnis

- [1] B. Schmülling, *Ausgewählte Themen der elektrischen Antriebstechnik 1 - Elektromobilität Vorlesungsunterlagen - Technische Universität Graz*, 2013.
- [2] U. Bachhiesl, *Energie und Umwelt Vorlesungsunterlagen - Technische Universität Graz*, 2013.
- [3] U. Bachhiesl, *Erneuerbare Energien in der Praxis Vorlesungsunterlagen - Technische Universität Graz*, 2013.
- [4] G. Nischler, *Regulierung in der Praxis Vorlesungsunterlagen - Technische Universität Graz*, 2013.
- [5] T. Benz, *Der Zellulare Ansatz – Grundlage einer erfolgreichen , Regionen übergreifenden Energiewende*, 2015.
- [6] C. Mentin, *Elektromagnetische Verträglichkeit eines Prototypen , Störfestigkeits- und Störaussendungsmessungen*, 2015.
- [7] F. Hofer, *Home Automation Communication Standards Comparison*, 2014.
- [8] ÖVE/ÖNORM EN60730-1:2011, *Automatische elektrische Regel- und Steuergeräte für den Hausgebrauch und ähnliche Anwendungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 60730-1:2010, modifiziert)*. Austrian Standards, 2011.
- [9] H. Hartl, E. Krasser, G. Winkler, W. Pribyl, and P. Söser, *Elektronische Schaltungstechnik*. Pearson, 2008.⁴³
- [10] P. Söser, *Integrierte Schaltungen Vorlesungsunterlagen - Technische Universität Graz*, 2013.
- [11] J. Ebert, *Wireless Communication Networks and Protocols Vorlesungsunterlagen - Technische Universität Graz*, 2013.

⁴³ Ein weiterer Abdruck bzw. weitere Verwendung der Abbildungen aus dem Buch Elektronische Schaltungstechnik sind vom Verlag genehmigungspflichtig.

Anhang

Schaltplan Version 1



Overview

Page	Schematic	Makro/Partlist
1	Project	
2	Overview	
3	Block Diagram	
4	Modul Connector	M-OEM01-PHYFLEX1.A0
4	Optional Modul Connector	PBA-B-06-OEMxx.A1
5	Power Supply	M-OEM01-POWER1.A0
6	SD-Card1	M-OEM01-SD1.A0
7	Buttons	M-OEM01-Button3.A0
7	Boot Config	PBA-B-06-OEMxx.A1
7	Test connector	M-OEM01-FIX3.A0
7	RGB LEDs	M-OEM01-RGLED.A1
8	RTC	M-OEM01-RTC1.A0
8	Backup BATTERY	M-OEM01-BAT2.A1
8	Motor control	M-PBA-B-06-Motor.A0
8	Input protection	M-PBA-B-06-Input.A0
9	10/100Mbit Ethernet0	M-OEM01-Mb-ETH0.A0
10	USB0	M-OEM01-USB01.A0
11	EMV Capacitors	M-OEM01-EMV3.A0
12	WIFI	M-OEM01-WIFI.A0
12	WIFI	M-PBA-B-06-ANT1.A0
13	HDMI	M-OEM01-HDMI.A0
14	Connector	PBA-B-06-OEMxx.A1
15	Custom Display	M-PBA-B-06LCDDIS.A0
15	Touch connector	M-PBA-B-06LCDDIS.A0
16	Layout LS-Side	
17	Layout BS-Side	

Operating Ratings

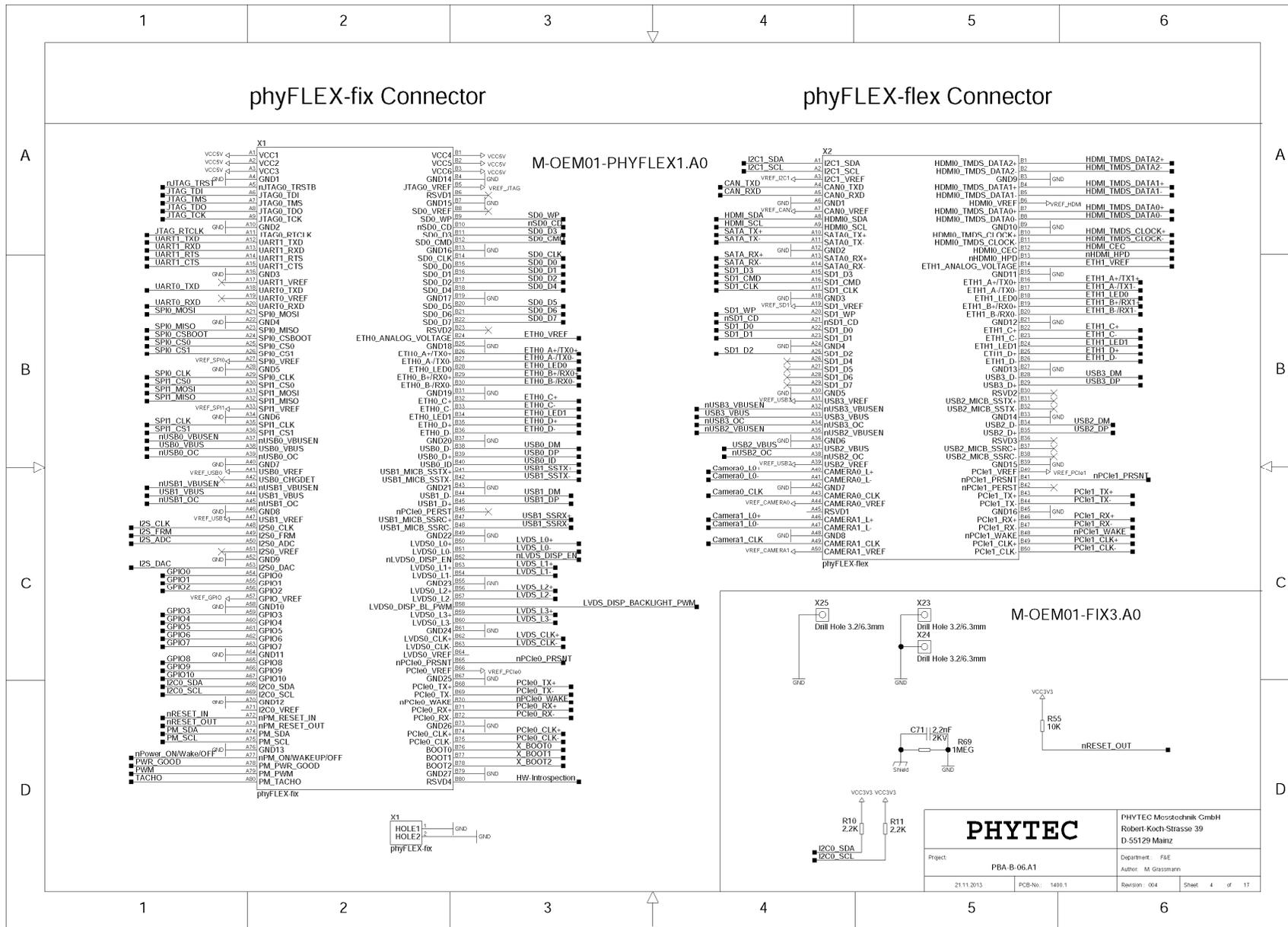
Operating Voltage: 12V +/- 10%
 absolut maximum Voltage: 24.4V
 maximum clamping Voltage: 24.4V
 minimum Breakdown Voltage: 16.7V

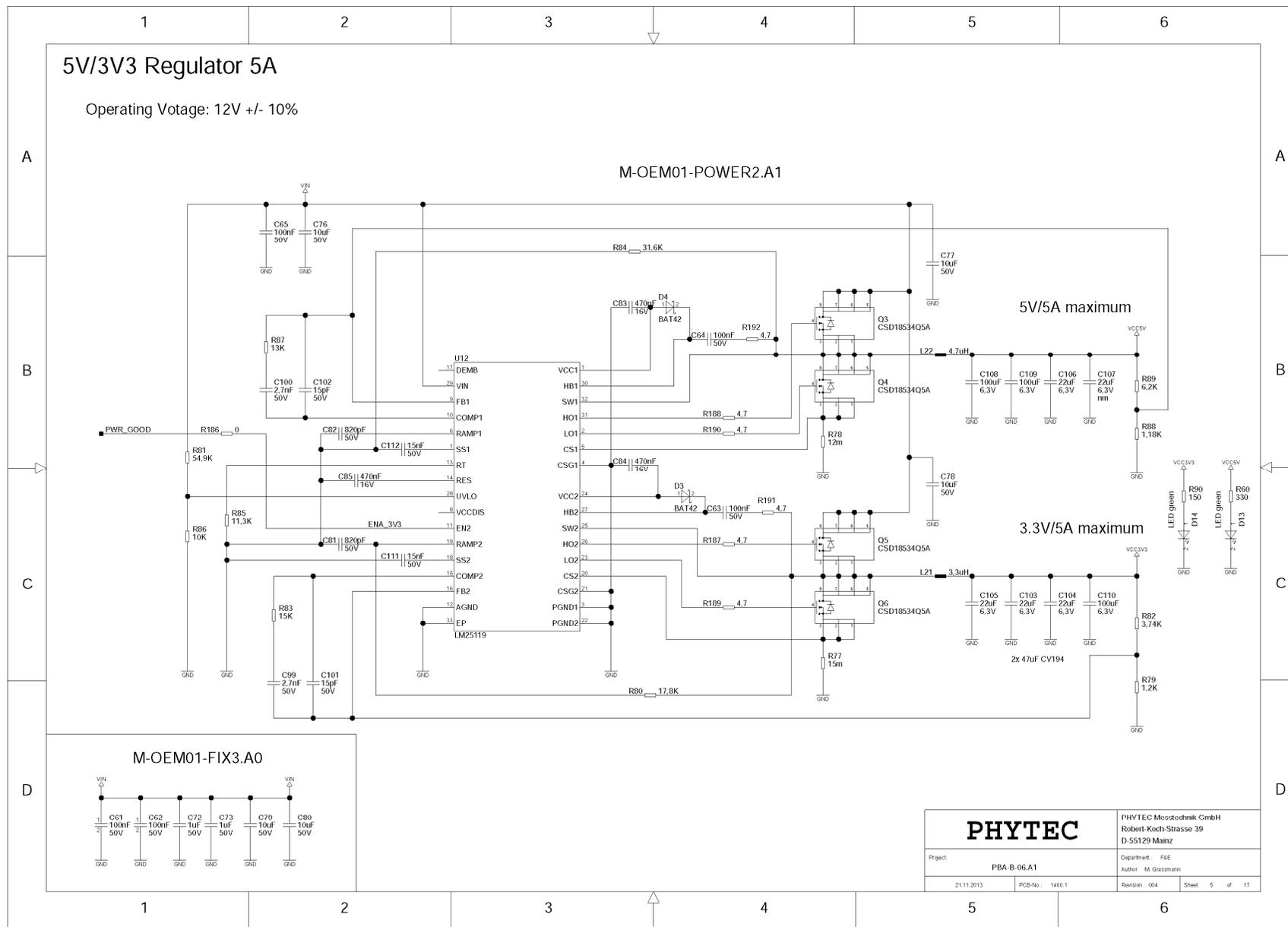
Storage Temperature: -20°C to +55°C
 Ambient Temperature: -40°C to +85°C (some exceptions)
 (exceptions are labeled with their temperature specifications)

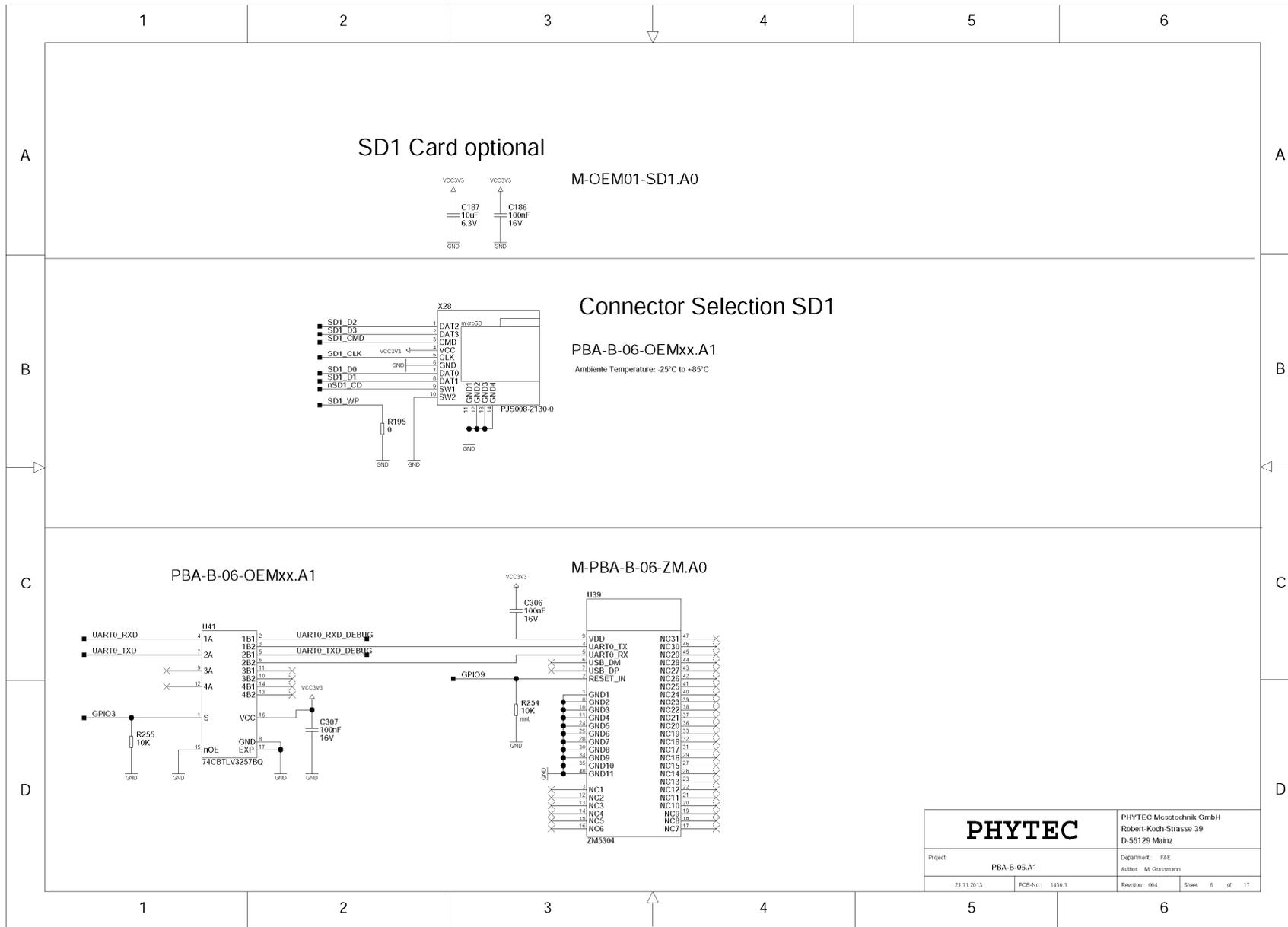
Size: 110mm x 110mm x 40mm

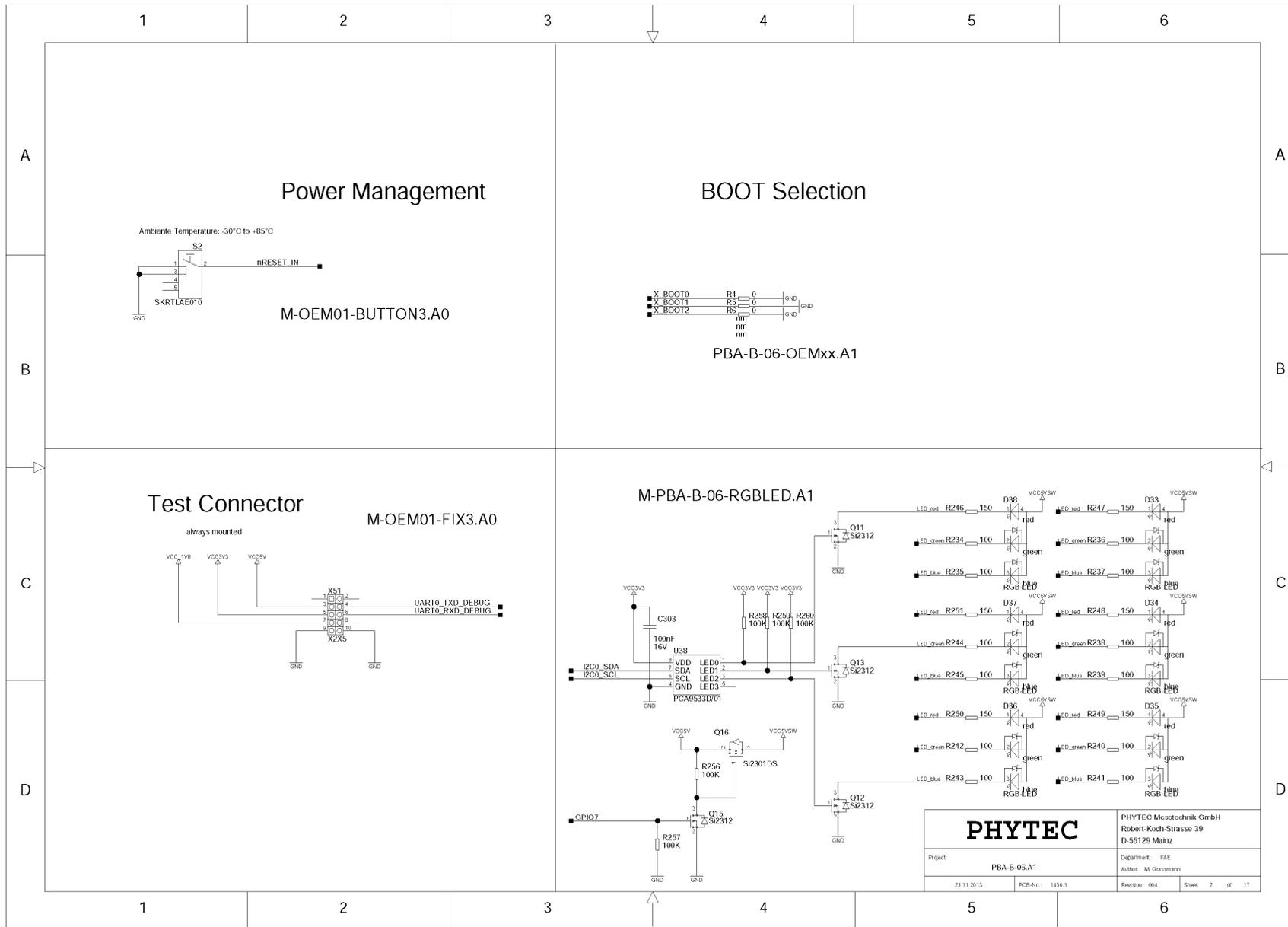
	EUROPE	NORTH AMERIKA
Address:	PHYTEC Messtechnik GmbH Robert-Koch-Str. 39 D-55129 Mainz GERMANY	PHYTEC America LLC 203 Parfitt Way SW, Suite G100 Bainbridge Island, WA 98110 USA
Ordering Information:	+49 (6131) 9221-32 sales@phytec.de	1 (800) 278-9913 sales@phytec.com
Technical Support:	+49 (6131) 9221-31 support@phytec.de	1 (800) 278-9913 support@phytec.com
Fax:	+49 (6131) 9221-33	1 (206) 780-9135
Web Site:	http://www.phytec.de http://www.phytec.eu	http://www.phytec.com

PHYTEC		PHYTEC Messtechnik GmbH Robert-Koch-Strasse 39 D-55129 Mainz	
Project: PBA-B-06A1		Department: F&E Author: M. Glasmann	
21.11.2013	PCB-No.: 1400.1	Revision: 004	Sheet 2 of 17

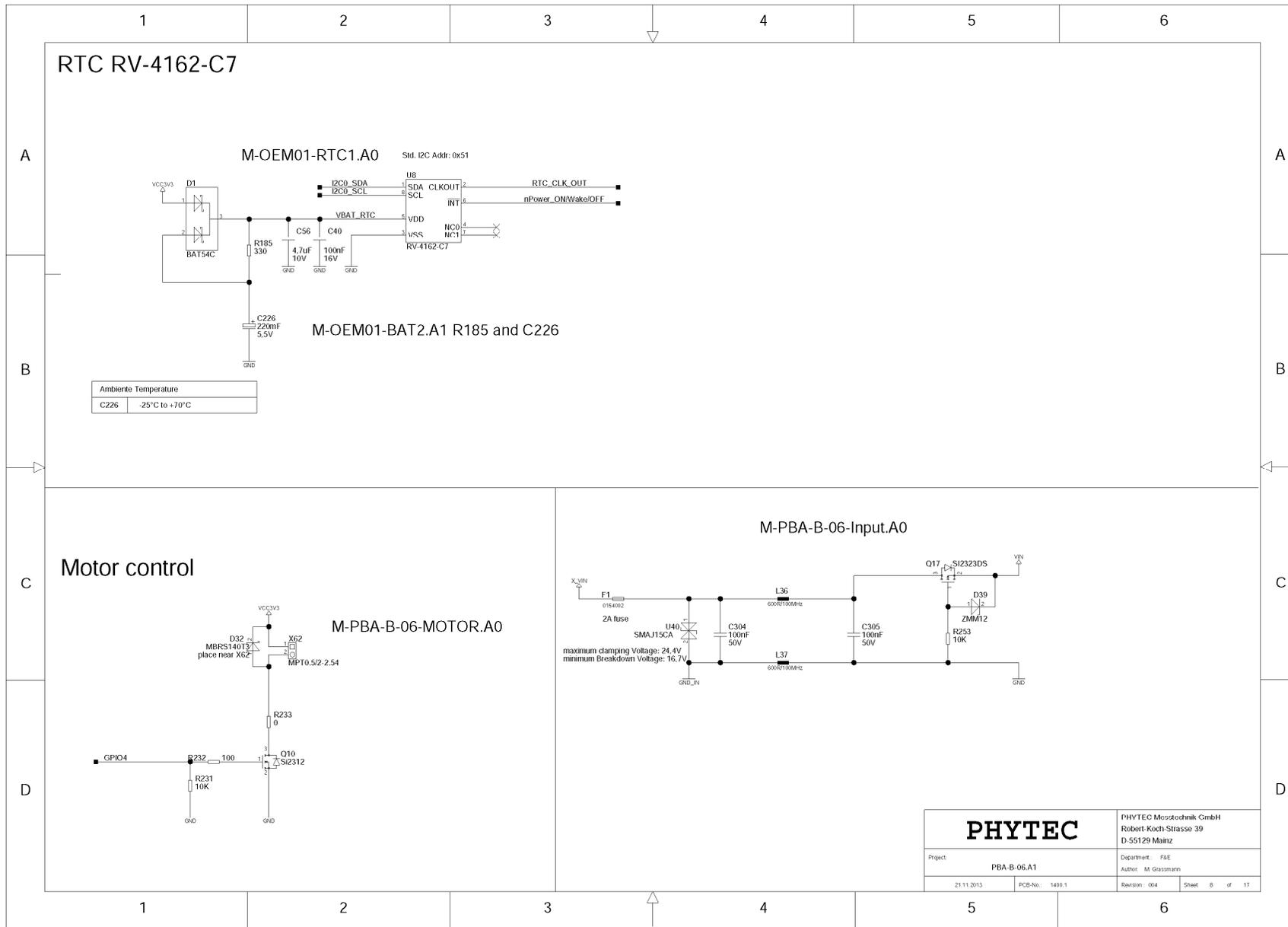




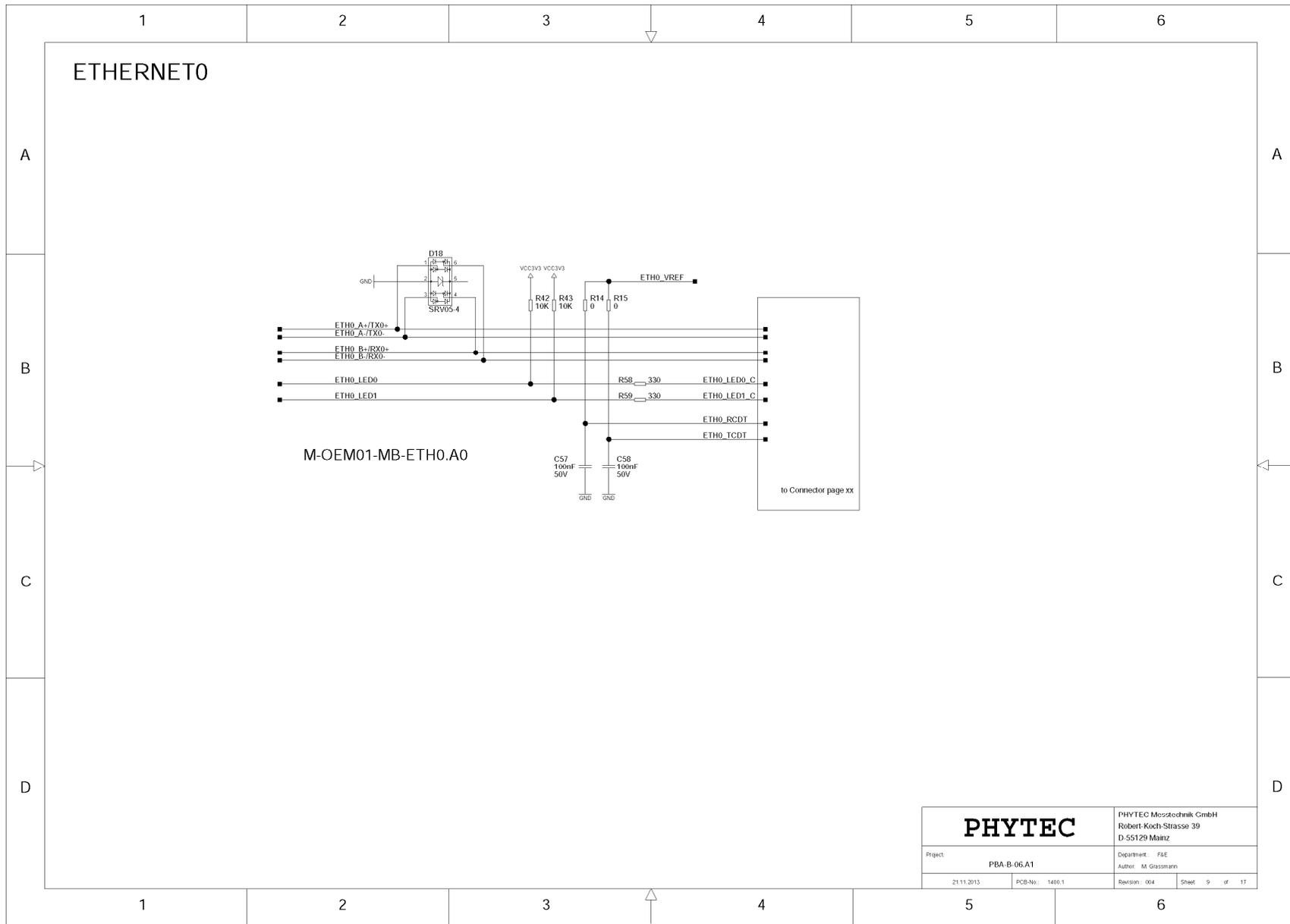


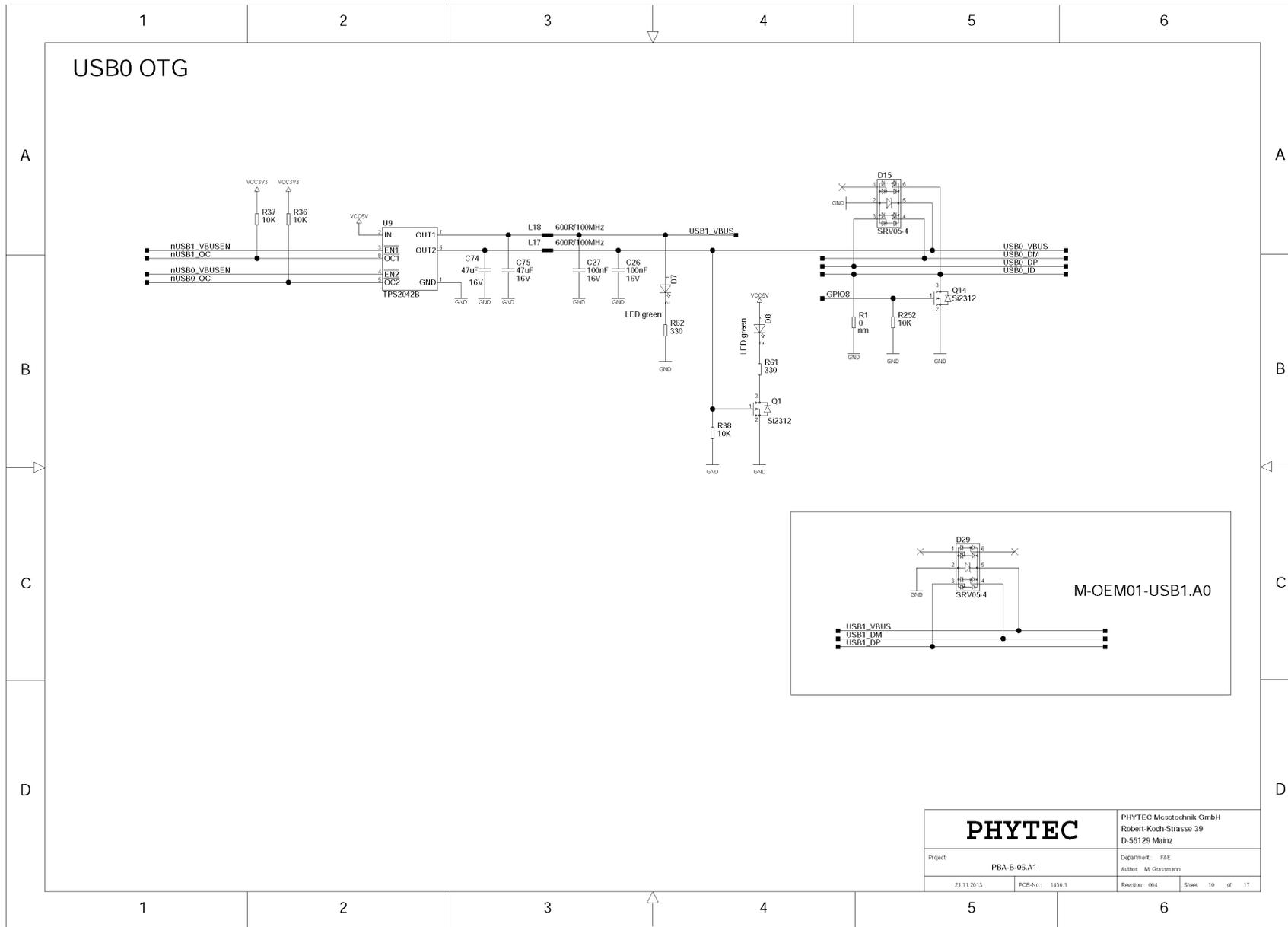


PHYTEC		PHYTEC Messtechnik GmbH Robert-Koch-Strasse 39 D-55129 Mainz	
Project:	PBA-B-06.A1	Department:	FXE
21.11.2013	PCB-No.: 1400.1	Author:	M. Grassmann
		Revision:	004
		Sheet:	7 of 17

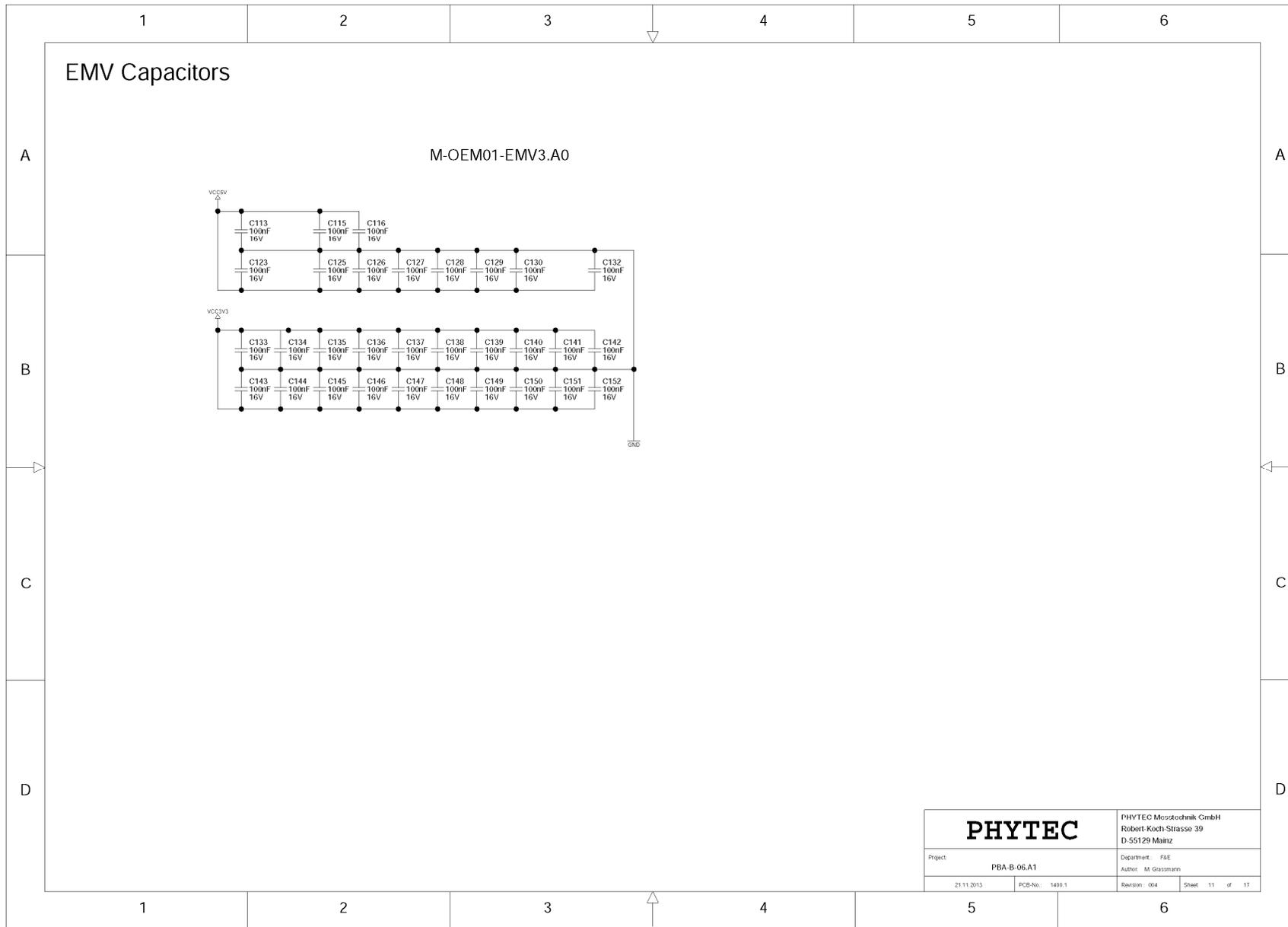


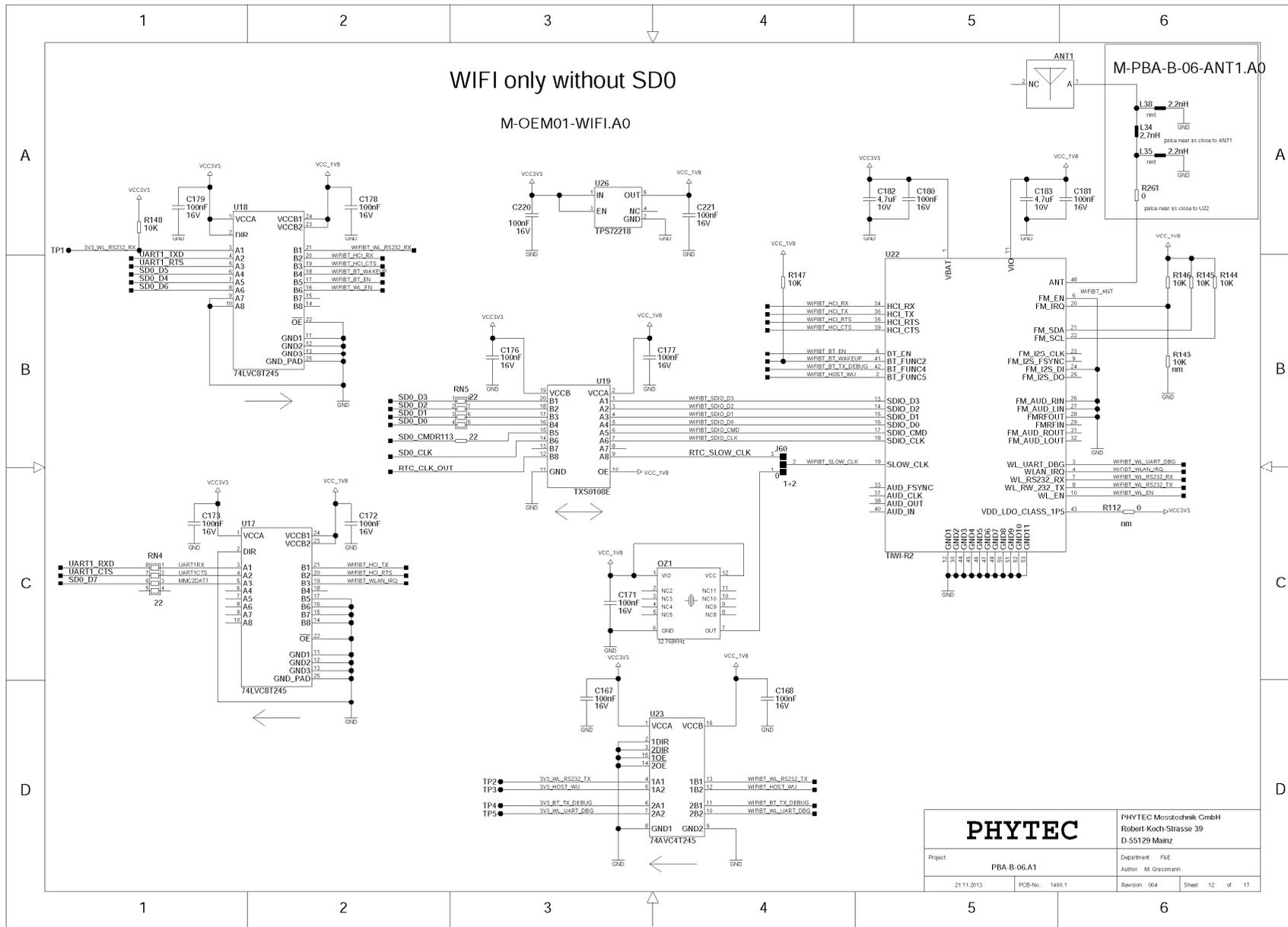
PHYTEC			
PHYTEC Messtechnik GmbH Robert-Koch-Strasse 39 D-55129 Mainz			
Project:	PBA-B-06.A1	Department:	FXE
21.11.2013	PCB-No.: 1400.1	Author:	M. Glassmann
		Revision:	004
		Sheet:	6 of 17



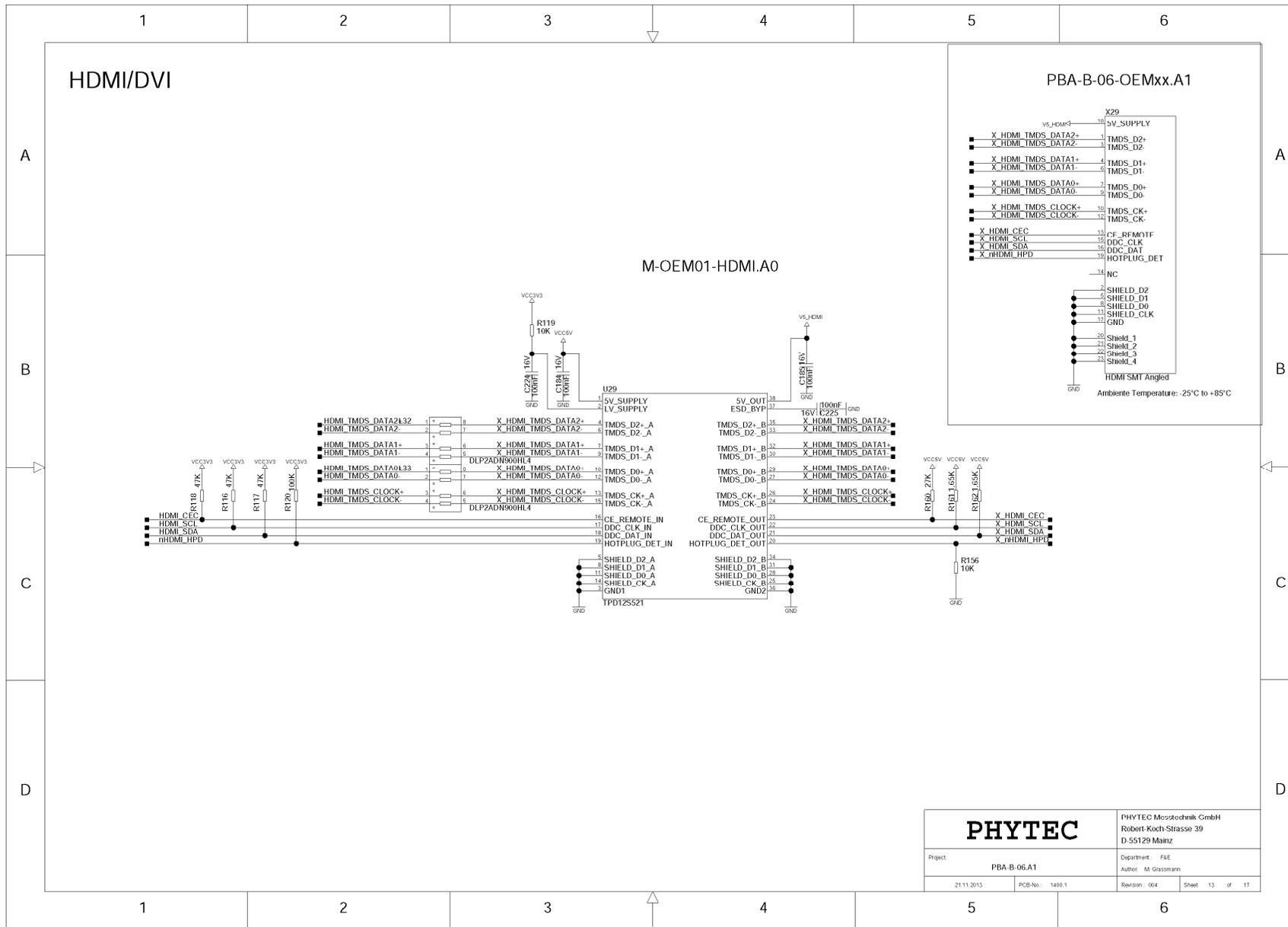


PHYTEC		PHYTEC Messtechnik GmbH Robert-Koch-Strasse 39 D-55129 Mainz	
Project:	PBA-B-06A1	Department:	F&E
21.11.2013	PCB-No.: 1400.1	Author:	M. Glassmann
		Revision:	004
		Sheet:	10 of 17

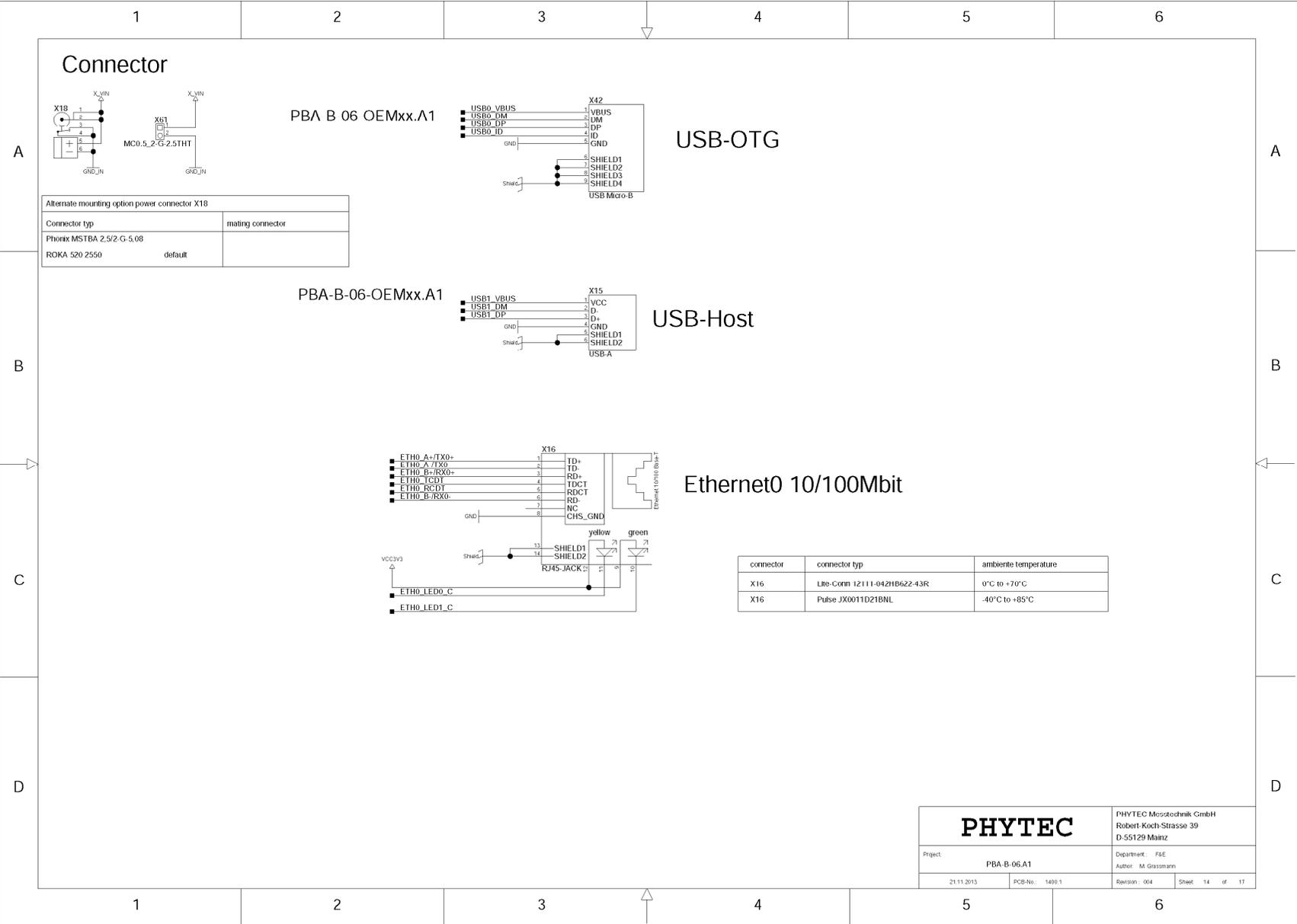




PHYTEC		PHYTEC Messtechnik GmbH Robert-Koch-Strasse 39 D-55129 Mainz	
Project:	PBA-B-06.A1	Department:	FXE
21.11.2013	PCB-No.: 1400.1	Author:	M. Gissmann
		Revision:	004
		Sheet:	12 of 17



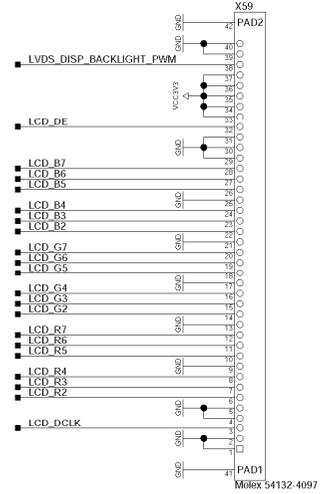
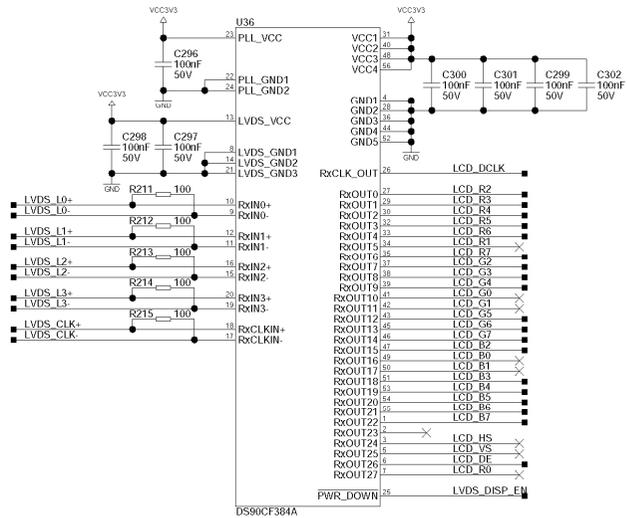
PHYTEC		PHYTEC Messtechnik GmbH Robert-Koch-Strasse 39 D-55129 Mainz	
Project:	PBA-B-06A1	Department:	F&E
21.11.2013	PCB-No.: 1400.1	Author:	M. Glassmann
		Revision:	004
		Sheet:	13 of 17



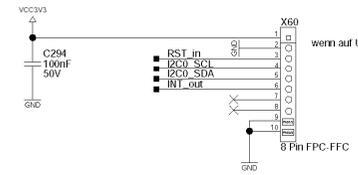
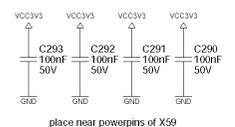
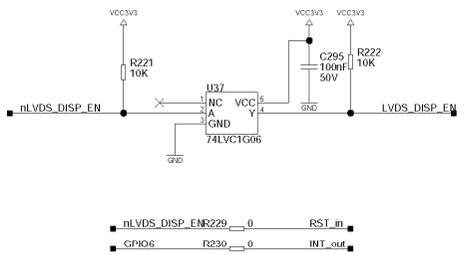
PHYTEC		PHYTEC Messtechnik GmbH Robert-Koch-Strasse 39 D-55129 Mainz	
Project: PBA-B-06.A1		Department: F&E Author: M. Glassmann	
21.11.2013	PCB-No.: 1400.1	Revision: 004	Sheet 14 of 17

LCD Adapter Custom Display SCF0700C48GGU25

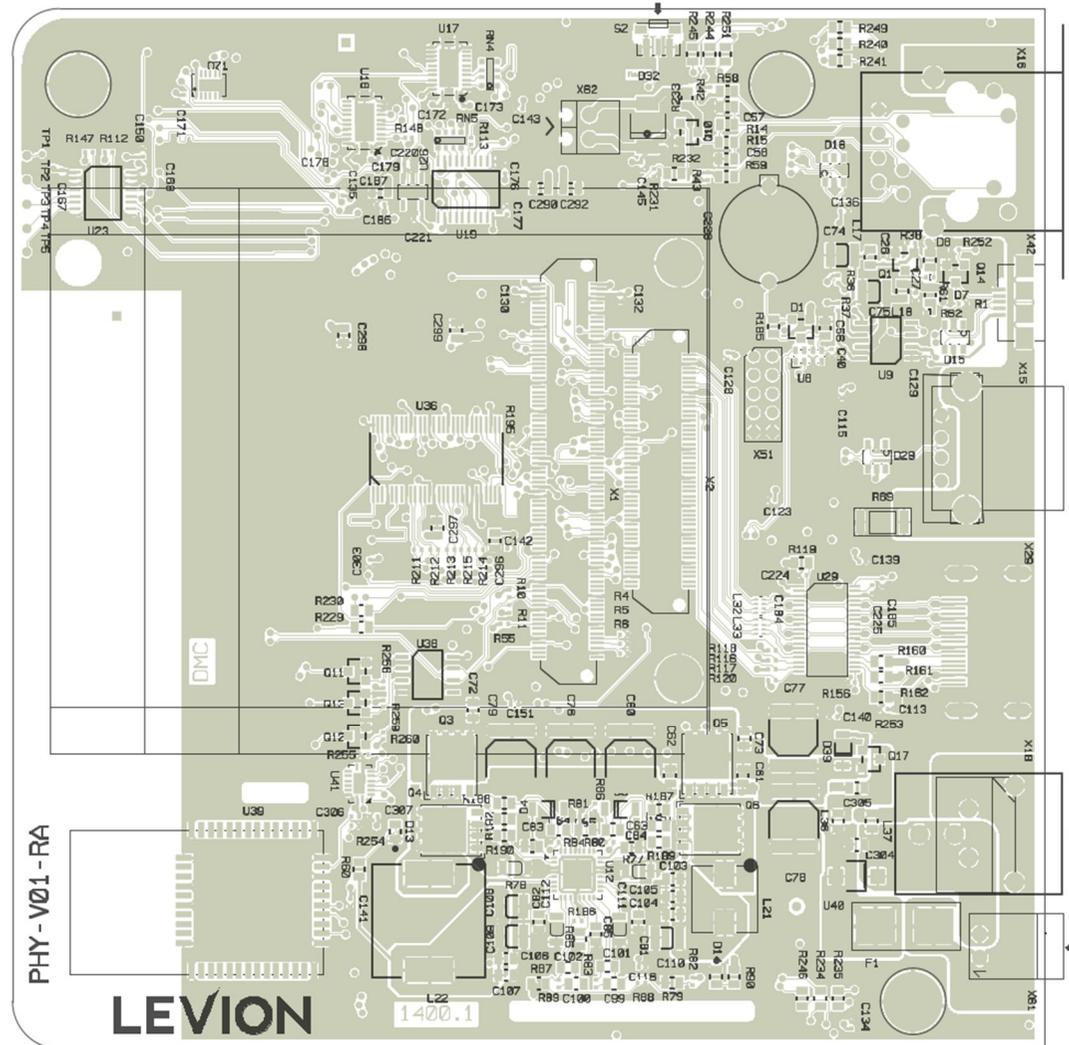
M-PBA-B-06-LCDDIS.A0



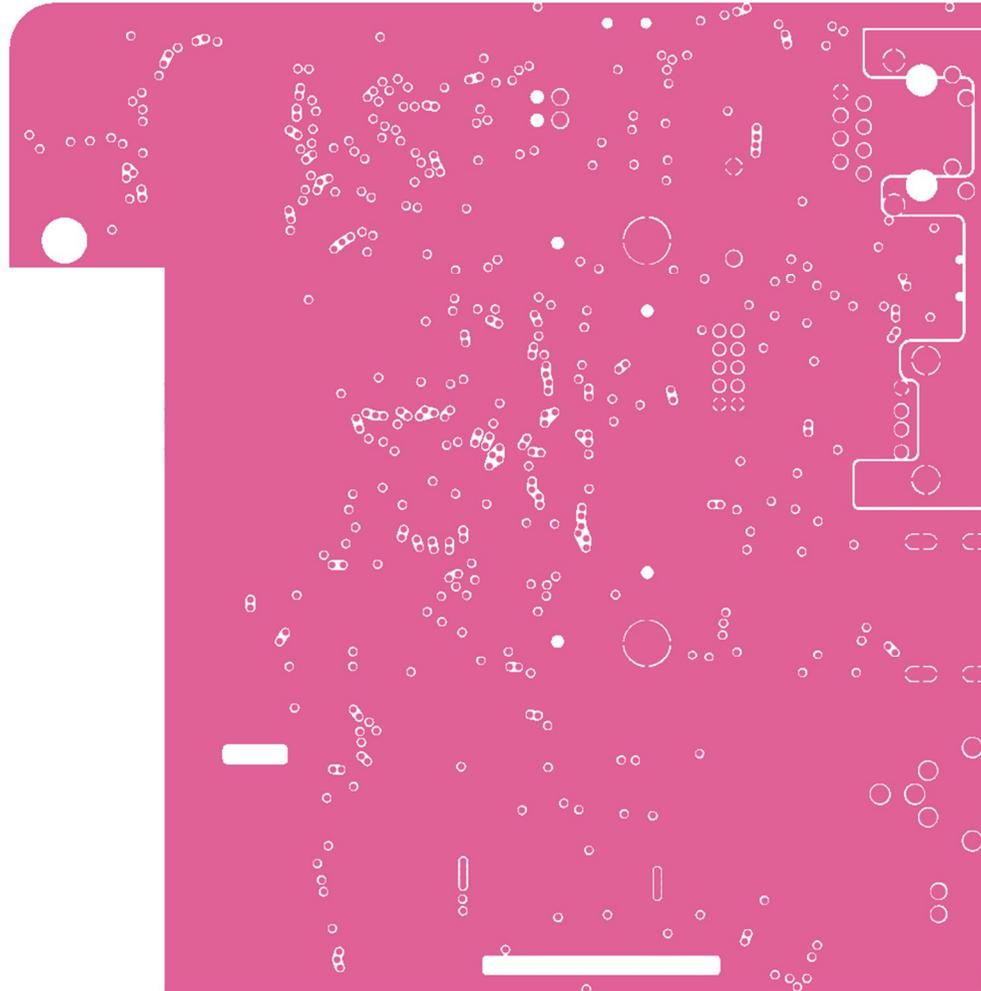
SCF0700C48GGU25 Touch Connector



PHYTEC		PHYTEC Messtechnik GmbH Robert-Koch-Strasse 39 D-55129 Mainz	
Project:	PBA-B-06.A1		Department: F&E
21.11.2013	PCB-No.: 1400.1	Revision: 004	Author: M. Gassmann
			Sheet 15 of 17



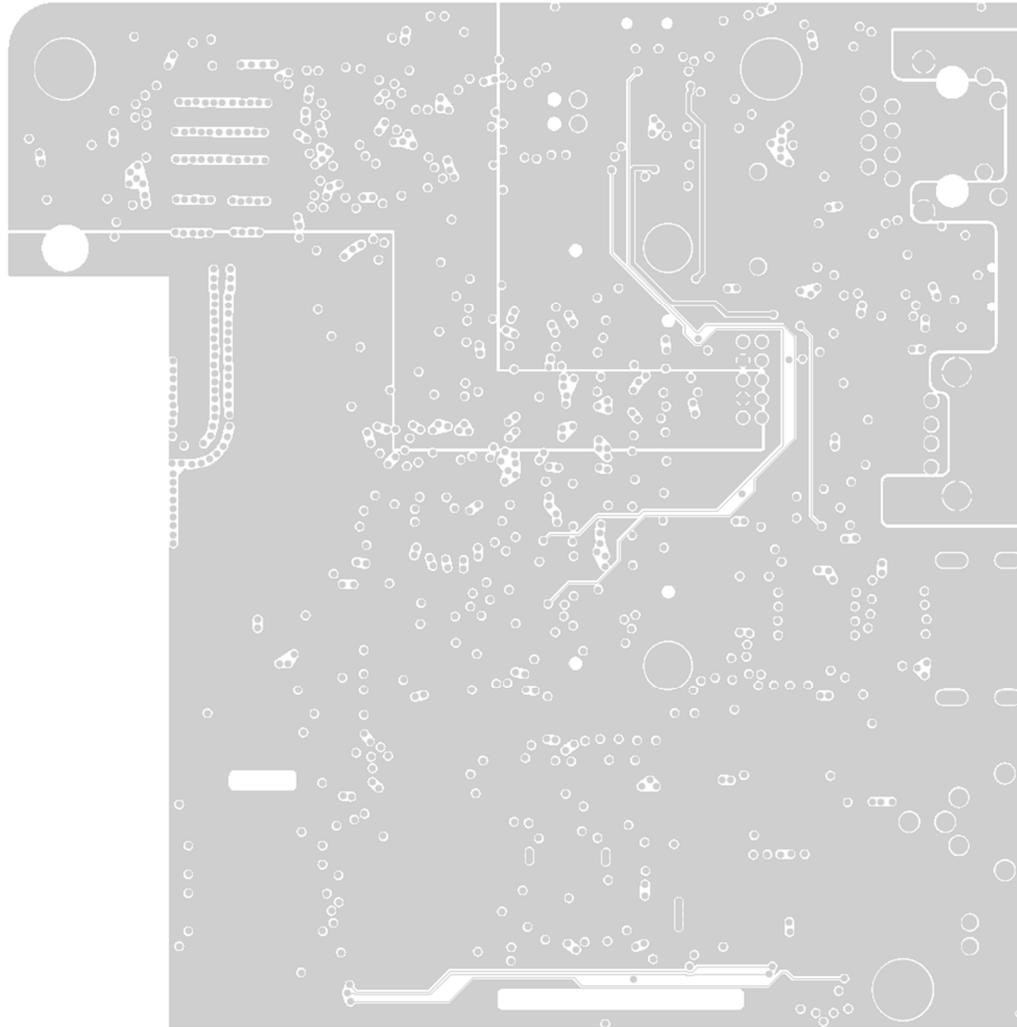
PCB Bauteile und TOP Layer



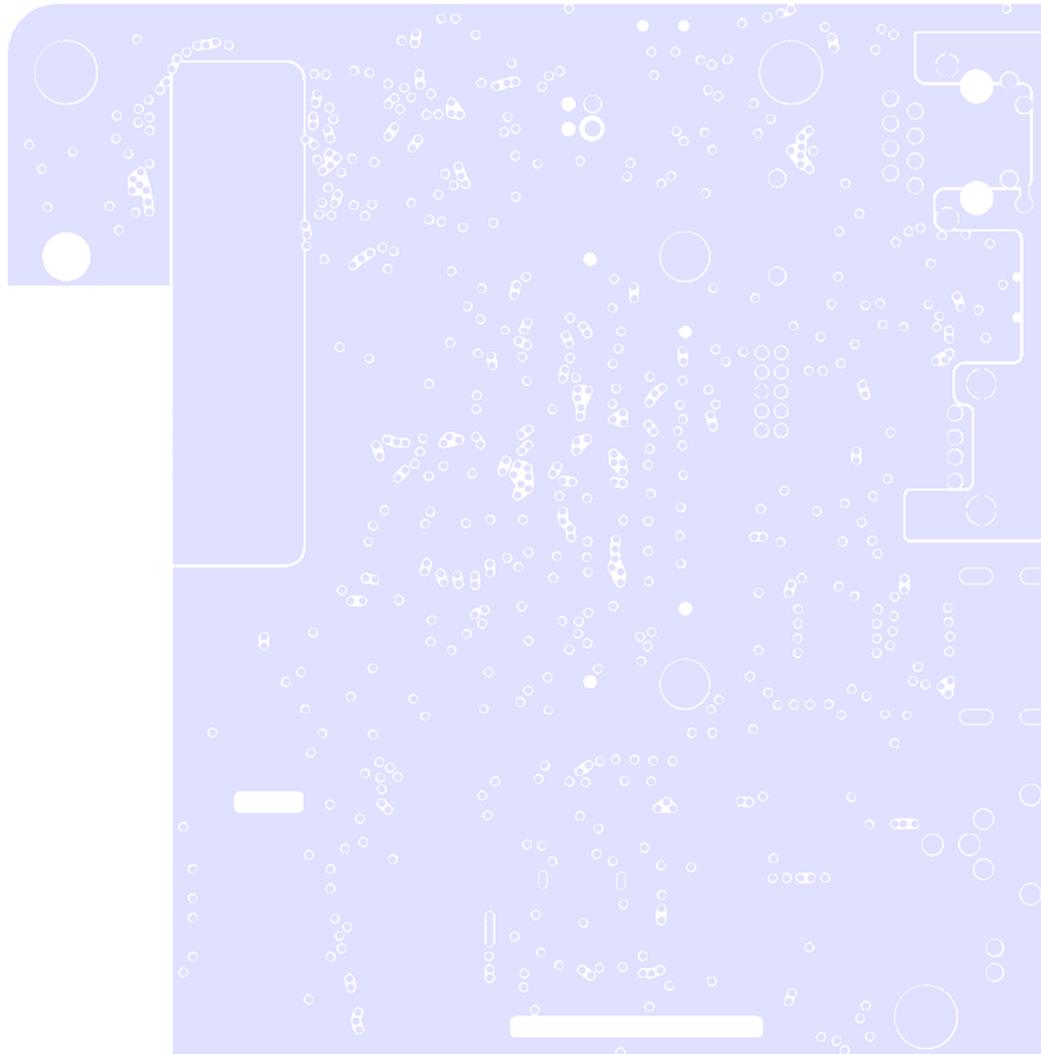
PCB Layer 2



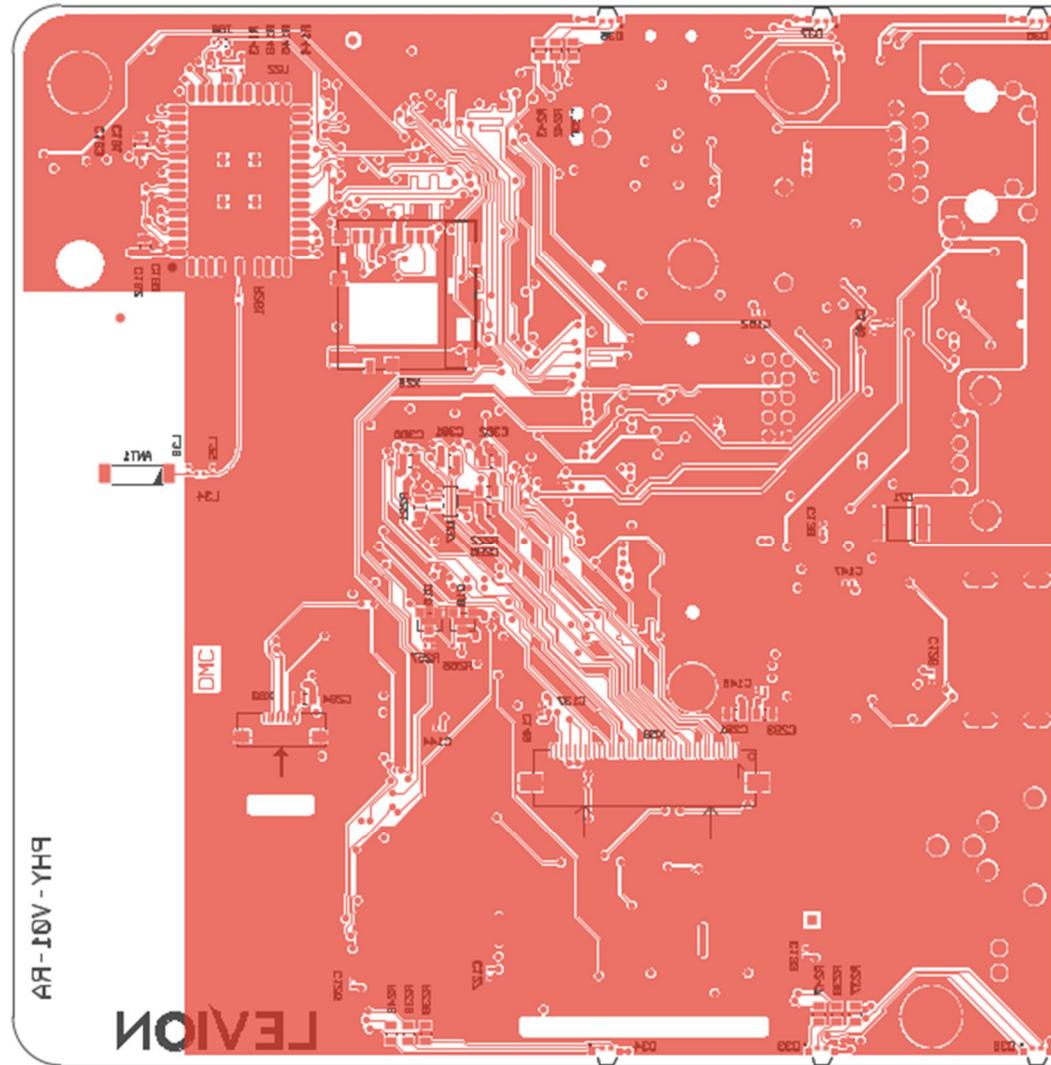
PCB Layer 3



PCB Layer 4



PCB Layer 5



PCB Bauteile und Bottom Layer