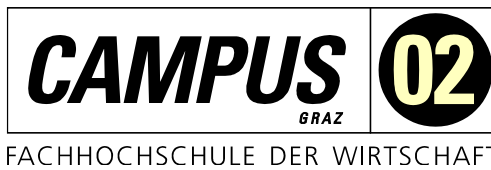


**Masterarbeit**

# **ENTWICKLUNG EINES MANIPULATORS FÜR EINE GTEM-ZELLE**

ausgeführt am



Fachhochschul-Masterstudiengang  
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

**Christoph Sudy, BSc**

1610322014

betreut und begutachtet von

Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Pauritsch

Graz, im Jänner 2018

.....  
Unterschrift

## **EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

.....  
Unterschrift

## **DANKSAGUNG**

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich auf meinem Weg bis hin zur Vollendung der Masterarbeit begleitet haben.

Besonders bedanken möchte ich mich an dieser Stelle bei Frau Marianne Hackl, meiner Partnerin, die mich in meinen Vorhaben stets tatkräftig unterstützt und mich mit ihren ermutigenden Worten immer wieder aufbaut.

Ein weiterer Dank gilt meiner Familie, die immer da ist und Verständnis für meine geringe Verfügbarkeit in den letzten Monaten hatte.

Ich möchte mich natürlich auch bei der Fachhochschule Campus 02 und bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Pauritsch bedanken, der mir diese Arbeit erst ermöglicht und mich dabei stets unterstützt hat.

## **KURZFASSUNG**

Elektronische Komponenten haben die Eigenschaft, dass sie elektromagnetische Strahlung abgeben bzw. empfangen, sei es nun gewollt, wie bei diversen Funktechnologien, oder ungewollt, wie beispielsweise bei integrierten Schaltungen. Dadurch kann es passieren, dass gegenseitige Beeinflussungen bzw. Beeinträchtigungen für elektronische Anwendungen oder die menschliche Gesundheit entstehen. Um dieses Problem unter Kontrolle zu halten, ist es notwendig, ein Gerät zu prüfen bevor man es in den Verkehr bringt. Eine GTEM-Zelle (Gigahertz Transverse Electromagnetic Cell) dient zur Messung von elektromagnetischer Verträglichkeit und stellt bei entwicklungsbegleitenden Tests eine geeignete Umgebung zur Verfügung. Um eine Vergleichbarkeit mit einer Freifeldmessung zu ermöglichen, muss jedoch bei Störabstrahlungsmessungen der Prüfling in der Zelle in verschiedene Positionen gedreht werden.

Die FH Campus 02 ist in Besitz einer kleineren GTEM-Zelle und muss diese Drehungen des Prüflings derzeit manuell und mit provisorischen Hilfsmitteln durchführen. Dadurch werden die Ergebnisse teilweise verfälscht und sind nur schwer reproduzierbar. In dieser Masterarbeit soll ein Manipulator entwickelt werden, der diese Aufgabe übernimmt und das Messverfahren so optimiert.

Um die Randbedingungen und Anforderungen an den Manipulator zu bestimmen, wurden im Zuge dieser Arbeit die elektromagnetische Verträglichkeit und unterschiedliche Messmöglichkeiten dieser untersucht. Es wurden auch 4 Manipulatoren verglichen, welche teilweise bei größeren Messzellen zum Einsatz kommen.

Mithilfe dieser Erkenntnisse wurde dann ein Prototyp in SolidWorks konstruiert und anschließend gefertigt. Hierbei wurden die Technologien der Fachhochschule wie 3D-Drucker und Lasercutter genutzt. Mit diesem Prototyp wurden anschließend Vergleichstests in der GTEM-Zelle durchgeführt, um zu zeigen, dass die Messergebnisse absolut vergleichbar, das Arbeiten einfacher, komfortabler und das Ergebnis wiederholbarer ist im Vergleich zum bisher verwendeten Hilfsmittel.

Das Ergebnis der Masterarbeit ist ein funktionierender erster Prototyp eines manuell bedienbaren Manipulators, bei dem bereits alle konstruktiven Vorbereitungen für eine Automatisierung getroffen sind. Außerdem enthält die Arbeit als Ergebnis eine Liste mit Verbesserungsvorschlägen und Tipps, welche bei der nächsten Generation des Manipulators umgesetzt werden sollten.

## **ABSTRACT**

Electronic components emit or receive electromagnetic radiation, either it intentionally, with various wireless technologies, or unwanted, with integrated circuits. As a result, mutual interference or impairment for electronic devices or human health may occur. To keep this problem under control, it is necessary to test a device before placing it on the market. A GTEM cell (Gigahertz Transverse Electromagnetic Cell) can be used to measure electromagnetic compatibility and provides a suitable environment for development-related tests. In order to allow comparability with an Open Area Test Site measurement the equipment under test must be rotated into different positions in case of measuring the emissions.

The University of Applied Sciences Campus 02 is in possession of a smaller GTEM cell and currently has to perform these rotations of the test object manually and with temporary aids. Due to this the results are partially falsified and are difficult to reproduce. It was the aim of this master thesis to develop a manipulator, which takes over this task and thus optimizes the measurement procedure.

In order to determine the boundary conditions and requirements for this manipulator, an investigation was carried out to figure out electromagnetic compatibility and the different measuring possibilities to measure it. Moreover 4 manipulators were compared, which are partly used for larger measuring cells.

With the help of these insights, a prototype was designed in SolidWorks and subsequently manufactured. Here, the technologies of the University of Applied Sciences, such as 3D printers and laser cutters are used. With this prototype and the previously used tool benchmark tests were carried out. The tests showed that results are comparable but operations are easier, more comfortable and the results are more repeatable with the developed manipulator.

The result of the master thesis is a first working prototype of a manually operated manipulator, in which all constructive preparations for an automation have already been made. In addition, the work contains a list of suggestions for improvement and hints which should be implemented in the next generation of the manipulator.

## INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
1.1	Aufgabenstellung .....	1
1.2	Ausgangssituation .....	2
2	Elektromagnetische Verträglichkeit.....	5
2.1	Definition und allgemeine Aspekte .....	5
2.2	Arten von Kopplungen .....	7
2.2.1	Struktur der Beeinflussungswege .....	8
2.2.2	Galvanische Kopplung .....	9
2.2.3	Kapazitive Kopplung .....	9
2.2.4	Induktive Kopplung .....	10
2.2.5	Strahlungskopplung .....	11
2.3	Gleich- und Gegentaktstörungen.....	11
2.3.1	Gegentaktstörungen .....	12
2.3.2	Gleichtaktstörungen .....	12
2.4	Elektromagnetische Schirmung .....	13
2.5	Nahfeld und Fernfeld .....	15
2.6	Gesetzliche Aspekte der EMV .....	17
2.6.1	Organisationen und Gremien.....	18
2.6.2	Aufbau der Richtlinien und Normen.....	19
2.6.3	CE-Kennzeichnung und Konformität .....	20
3	Messmöglichkeiten.....	22
3.1	Freifeldmessung .....	22
3.2	Semi-Absorberkammern und Vollabsorberraum .....	24
3.3	Modenverwirbelungskammer.....	26
3.4	TEM-Zelle .....	27
3.5	GTEM-Zelle.....	29
3.5.1	Aufbau und Funktionsweise.....	29
3.5.2	Korrelation zur Freifeldmessung.....	30
3.5.3	Einflüsse auf die Messung und Messunsicherheiten.....	32
3.5.4	Vor- und Nachteile der GTEM-Zelle .....	34
4	Existierende Varianten von Manipulatoren .....	35
4.1	Marktrecherche bereits existierender Systeme .....	35
4.1.1	Modell MPH von Teseq .....	35
4.1.2	Modell MPC von Teseq .....	36
4.1.3	Manipulatorvariante von ETS-Lindgren .....	36
4.1.4	Variante Brainstorm .....	37
4.1.5	Alternative Varianten .....	38
4.2	Entwicklungsrelevante Aspekte .....	39
4.3	Evaluierung der Manipulatorvarianten .....	41

5	Konstruktion eines Manipulators .....	44
5.1	Konstruktionskonzept der automatisierten Bewegungen .....	45
5.2	Konstruktionskonzept der manuellen Bewegungen .....	48
5.3	Konstruktionskonzept der Montageplatte .....	50
5.4	Zusammenführen der Konzepte .....	52
6	Fertigung und Bau eines Prototyps .....	58
6.1	3D-Drucken der Komponenten .....	58
6.2	Herstellen der Montageplatte .....	59
6.3	Zusammenbau des Prototyps .....	60
7	Vergleichsmessungen .....	62
7.1	Prüfaufbau .....	62
7.2	Messungen mit und ohne Manipulator .....	63
7.3	Vergleich der Messmethoden und -hilfsmittel .....	64
7.4	Performance des Manipulators .....	66
8	Zusammenfassung .....	71
9	Erkenntnisse und Ausblick .....	74
9.1	Erkenntnisse aus der Arbeit .....	74
9.2	Ausblick .....	75
	Literaturverzeichnis .....	76
	Abbildungsverzeichnis .....	78
	Tabellenverzeichnis .....	81

# 1 EINLEITUNG

Die Fachhochschule Campus 02 wurde im Jahr 1996 gegründet und bildet seitdem junge Menschen in den Bereichen Technik und Wirtschaft aus. Seit ihrer Gründung ist die Fachhochschule stetig gewachsen. So wurden aus den 95 Studierenden im Jahr 1996 rund 1250 in der Gegenwart. Aber auch räumlich kann sich die FH Campus 02 heute mit einem eigenen Lehrgebäude, dem „Campus Zusertal“ definitiv präsentieren.

Derzeit bietet die Fachhochschule 5 mögliche Studienrichtungen an, in denen man sich weiterbilden kann. Aufgrund der hohen Nachfrage nach gut ausgebildetem Personal sollen in naher Zukunft jedoch weitere Studienrichtungen folgen.

Was diese Institution deutlich von vielen anderen Fachhochschulen unterscheidet, ist das Angebot berufsbegleitender Studiengänge. Somit wird es den Studierenden ermöglicht, ihr erlerntes Wissen jeden Tag aufs Neue in Taten umzusetzen und so wertvolle Erfahrung zu sammeln. Dies bereichert jedoch nicht nur die Studierenden, sondern auch die zahlreichen namhaften Unternehmen, die auf die meist exzellent ausgebildeten Absolventen der FH setzen.

Am Campus findet der Bezug zur Wirtschaft sowie zur Forschung einen sehr hohen Stellenwert. Aus diesem Grund wird intensiv mit vielen der heimischen Unternehmen kooperiert. Als Beispiele können unzählige Abschlussarbeiten, Forschungsprojekte, Marktanalysen und vieles mehr genannt werden.

Ein weiterer nennenswerter Fakt über die FH ist die hervorragende Kontaktpflege zu ihren Absolventen. Dadurch können die ehemaligen Studierenden immer am neuesten Stand der Wissenschaft bleiben und die Fachhochschule profitiert von wertvollen Kontakten in der Wirtschaft.

Die FH Campus 02 bietet als Institution ihren Studierenden immer wieder die Möglichkeit, wissenschaftliche Arbeiten zu aktuellen Themen zu verfassen. Die Idee dieser Masterarbeit entstand ebenfalls aus einer Problemstellung der Fachhochschule. Aus diesem Grund ergibt sich für die Abschlussarbeit eine enge Kooperation zwischen der FH und dem Studierenden.

## 1.1 Aufgabenstellung

Für die heutige Gesellschaft ist die Technologie und damit auch die Elektronik ein ständiger Begleiter. Elektronische Komponenten haben jedoch den Nebeneffekt, dass sie elektromagnetische Strahlung abgeben bzw. empfangen, sei es nun gewollt, wie bei diversen Funktechnologien, oder ungewollt, wie beispielsweise bei integrierten Schaltungen. Dadurch kann es passieren, dass gegenseitige Beeinflussungen bzw. Beeinträchtigungen für elektronische Devices oder die menschliche Gesundheit entstehen. Um dieses Problem unter Kontrolle zu halten, ist es notwendig, ein Gerät zu prüfen bevor man es in den Verkehr bringt. Nur dann ist man berechtigt, das CE-Kennzeichen anzubringen und die damit verbundene Konformitätserklärung auszustellen. Diese Prüfungen können an akkreditierten Prüfstellen durchgeführt werden. Da derartige Prüfungen jedoch sehr kostspielig sind, ist es wichtig, diese nach Möglichkeit gleich beim ersten Mal positiv zu absolvieren. Um das zu ermöglichen, müssen bereits während der Entwicklung eines Gerätes sogenannte Pre-Compliance-Tests durchgeführt werden. Somit ist durch ständige Entwicklungsschleifen ein effektives und kosteneffizientes Entwickeln möglich. Große Unternehmen führen diese Tests häufig mit Vollabsorberkammern (EMV-Kammern) durch. Eine EMV-

Kammer zum Messen dieser Einflüsse ist aber räumlich sehr groß und in der Anschaffung sehr teuer. Daher besitzt das Messtechniklabor der FH Campus 02 eine GTEM-Zelle (Gigahertz Transverse Electromagnetic Cell), mit der es ebenfalls möglich ist, Störaussendungen bzw. Störfestigkeit zu messen. Um eine Messung einer solchen Zelle mit einer Messung mittels Absorberkammer bzw. einer Freifeldmessung vergleichen zu können, soll der zu entwickelnde Manipulator den Prüfling zumindest um 90° drehen und schwenken können. Dies deckt sich jedoch nicht mit der entsprechenden Norm, da der Prüfling laut Norm in den 3 orthogonalen Achsen gedreht und vermessen werden muss. Im Falle eines Abweichens von der Norm soll auch untersucht werden, ob dies einen Einfluss auf das Messergebnis hat.

Die Drehung des Prüflings muss derzeit händisch durchgeführt werden und ist dadurch recht umständlich. In der folgenden Arbeit soll eben dieses Verfahren vereinfacht werden.

In dieser Masterthesis soll zu Beginn eine Literaturrecherche zum Thema EMV (elektromagnetischer Verträglichkeit) betrieben werden, um das notwendige Hintergrundwissen für die spätere Umsetzung zu schaffen und festzuhalten. Im Zuge der Recherchen soll auch ein besonderes Augenmerk auf die unterschiedlichen Messverfahren gelegt werden, mit denen es möglich ist, Störaussendungen und Störfestigkeit zu messen. Da für dieses Projekt die GTEM-Zelle relevant ist, gilt dem Messverfahren besondere Aufmerksamkeit. Nach dem Festigen der notwendigen Kenntnisse sollen unterschiedliche Manipulatorvarianten untersucht werden, mit denen eine Umsetzung möglich wäre. Dazu werden Systeme mit gleichen oder ähnlichen Anforderungen begutachtet und evaluiert. Ist die beste Möglichkeit gefunden, soll diese entsprechend den vorhandenen Anforderungen adaptiert werden. Anschließend soll mit SolidWorks ein Modell konstruiert werden, welches in weiterer Folge mit einem 3D-Drucker hergestellt werden soll. Hierbei soll in erster Linie ein Prototyp generiert werden, der manuell betrieben wird. Es sollen jedoch alle Vorkehrungen getroffen werden, um das System mit geringem Aufwand zu automatisieren. Mit dem funktionstüchtigen Prototyp sollen dann Vergleichsuntersuchungen durchgeführt werden, die die Funktion des Manipulators bestätigen. Das Ergebnis der Masterarbeit soll ein funktionierender Prototyp sein, mit dem gearbeitet werden kann. Außerdem sollen mögliche Potentiale aufgezeigt werden, mit denen man das System weiter verbessern könnte.

## 1.2 Ausgangssituation

Die zu modifizierende GTEM-Zelle im Besitz der FH Campus 02 ist von der Firma ETS-Lindgren. Die Modellbezeichnung für die Zelle lautet „Model 5402“. Dieses Modell weist äußere Maße von  $1,4 \times 0,75 \times 0,5 \text{ m}^3$  auf und wiegt ca. 40 kg. In nachfolgender Abbildung ist die Messzelle ersichtlich. Die Form der Zelle ist funktionell bedingt pyramidenförmig und läuft somit am Ende spitz zusammen. Diese Zelle besitzt zwei Türen, über die man in das Innere der Zelle gelangt. Eine Tür befindet sich an der Seite der Zelle und eine zweite an der Unterseite. Die maximale Prüfebene beträgt  $16,7 \times 12,5 \text{ cm}^2$  und die maximale Septumhöhe beträgt 25 cm. Die GTEM-Zelle der Fachhochschule entspricht allen Anforderungen gemäß EN 61000-4.





Abb. 1: GTEM-Zelle der FH Campus 02 GmbH, Quelle: ETS-Lindgren (2013), Online-Quelle [28.11.2017], S. 1.

Bei der Entwicklung des Manipulators soll darauf geachtet werden, dass dieser auf der Tür im Zellenboden (90° versetzt zur Haupttür an der Unterseite) verschraubt werden kann. Somit kann bei Bedarf bzw. bei Fehlfunktion des Manipulators einfach die Türe ausgetauscht werden und die Messzelle ist dennoch voll einsatzfähig. Dadurch beschränkt sich die Montage des Manipulators auf eine Fläche von 90 x 90 mm<sup>2</sup>. Für diese Größenordnung von Zellen sind keine verfügbaren Manipulatoren am Markt erhältlich.

Das Bestücken des Manipulators mit einem Prüfling soll über die Hauptzugangstür an der Seite der Zelle erfolgen. Die Zelle selbst darf bis auf die Türe an der Unterseite keinesfalls bearbeitet oder modifiziert werden.

Eine Anforderung an den Manipulator lässt sich bereits aus der Funktion der GTEM-Zelle ableiten. Da diese dazu dient, elektromagnetische Felder zu messen, dürfen natürlich nur sehr wenig bzw. keine Materialien eingesetzt werden, die die Ergebnisse verfälschen könnten. Dies bedeutet, dass keine magnetisch leitenden Werkstoffe eingesetzt werden sollen.

Die Prüflinge, die vermessen werden sollen, sind meist Platinen und weisen eine maximale Größe von 150 x 150 mm<sup>2</sup> auf. Es ist jedoch keine zwingende Anforderung, Platinen dieser Größe drehen zu können. Dieses Maß bildet lediglich einen Richtwert. Falls es während der Entwicklung belegbare Gründe gibt, mit dem Gesamtsystem kleiner zu werden, ist das möglich. Es sollte aber dennoch versucht werden, auch Platinen, welche dieser Größenordnung entsprechen, manipulieren zu können.

Bei der Verwendung im Labor muss der Prüfling derzeit aufwendig per Hand gedreht werden. Dies ist sowohl umständlich und zeitraubend als auch ungenau, da man den Prüfling nur sehr schwer um genau 90° drehen kann. Derzeit werden zum Messen zwar diverse Hilfsmittel eingesetzt, wie beispielsweise Aufbauten aus Styropor oder Ähnlichem, aber dennoch gestaltet sich der Messvorgang oft sehr mühsam.

Die FH stellt ihre Räumlichkeiten und ihr Equipment für die Realisierung dieser Arbeit zur Verfügung. Somit können alle zusätzlichen Werkzeuge, die benötigt werden, auch frei verwendet werden. Außerdem dürfen die 3D-Drucker in Anspruch genommen werden, um spätere Prototypen zu drucken. Bei Bedarf wird auch ein Budget für notwendige Anschaffungen wie Bauteile oder Elektronik freigegeben. Somit steht die FH Campus 02 voll hinter dem Projekt und unterstützt es, soweit es ihr möglich ist.

Die Entwicklung in diesem Projekt soll schrittweise erfolgen. So soll in erster Linie ein funktionierender Manipulator entwickelt werden, mit dem ein sehr komfortables und genaues Arbeiten möglich ist. Die Funktion des Manipulators soll mithilfe von Kontrollmessungen nachgewiesen werden. Erst wenn dieses Ziel erfüllt ist, soll der Manipulator mit Motoren erweitert werden, um einen automatisierten Betrieb zu

ermöglichen. Sollte das aufgrund von Komplikationen während der Entwicklung im Umfang dieser Arbeit nicht möglich sein, wird das seitens des Auftraggebers akzeptiert. Um ein Elektrifizieren des Systems jedenfalls zu erleichtern, soll dieser Aspekt bereits in der Basisentwicklung berücksichtigt werden.

Der Auftraggeber wünscht sich auch explizit, dass die Problemstellung von der elektrotechnischen Seite aus beleuchtet wird. Der Grund dafür liegt darin, dass beim Arbeiten mit einem so sensiblen Messgerät viele elektrotechnische Aspekte dargelegt und erörtert werden müssen. Daher sollen von Kenntnissen aus diesen Betrachtungen Rückschlüsse auf die mechanischen Anforderungen getroffen werden.

## 2 ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

Um die Ausmaße der geforderten Konstruktion zu verstehen und mögliche Randbedingungen festlegen zu können, muss zuallererst die elektromagnetische Verträglichkeit betrachtet und verstanden werden. In diesem Kapitel soll dieses Thema für die geforderte Aufgabe hinreichend recherchiert werden, um ein bestmögliches Ergebnis bezüglich der Entwicklung eines Manipulators zu ermöglichen. Des Weiteren soll die Sinnhaftigkeit für Messzellen bzw. EMV-Tests im Allgemeinen dargelegt werden.

### 2.1 Definition und allgemeine Aspekte

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bedeutet zum einen, dass ein Gerät elektromagnetisch ausreichend geschützt ist, um von seiner Umgebung nicht gestört zu werden, und zum anderen, dass das besagte Gerät selbst so aufgebaut ist, dass es weder sich noch andere Geräte stört.

Eine detaillierte Beschreibung des Begriffes „EMV“ findet sich auch in der EMV-Richtlinie 2014/30/EU. So ist EMV in dieser definiert als:

„die Fähigkeit eines Betriebsmittels, in seiner elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu arbeiten, ohne dabei selbst elektromagnetische Störungen zu verursachen, die für andere Betriebsmittel in derselben Umgebung unannehmbar wären“<sup>1</sup>

Diese Definition bezieht sich ebenfalls auf elektrische Anlagen in ihrer Gesamtheit.

Elektrische Anlagen bzw. Geräte können zur selben Zeit Sender und Empfänger sein. Diese sind also elektromagnetisch verträglich, wenn sie als Sender tolerierbare Emissionen und als Empfänger tolerierbare Empfindlichkeit für Immissionen, also ausreichende Störfestigkeit, aufweisen.<sup>2</sup>

Diese recht abstrakte Betrachtungsweise wird deutlicher, wenn man ein vereinfachtes Modell der EMV untersucht. Im Beeinflussungsmodell gibt es immer eine Störquelle bzw. einen Sender, einen Kopplungspfad und eine Störsenke oder auch Empfänger genannt. Die Störquelle kann hierbei natürlichen oder künstlichen Ursprungs sein. Die Störsenke ist in dieser Betrachtungsweise stets künstlich. Der Kopplungspfad entspricht dem Weg, den die Energie zurücklegt. Dieser Weg kann beispielsweise leitungsgebunden oder über elektrische, magnetische oder elektromagnetische Felder verwirklicht sein. In Unterkapitel 2.2 wird auf die einzelnen Arten von Kopplungen noch detailliert eingegangen.<sup>3</sup>

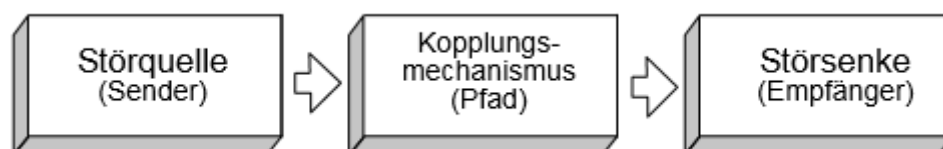


Abb. 2: Beeinflussungsmodell der elektromagnetischen Verträglichkeit, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 3.

---

<sup>1</sup> Amtsblatt (2014), Online-Quelle [28.11.2017], S. 84.

<sup>2</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 2.

<sup>3</sup> Vgl. Wolfperger (2008), S. 4-6.

Die gewünschten Ergebnisse und Grenzwerte bezüglich EMV sind in ihrer Erreichung natürlich nicht selbstverständlich und es gibt verschiedenste Möglichkeiten, negative Beeinflussungen zu vermindern. Bereits bei der Entwicklung von Systemen muss das Thema EMV berücksichtigt werden. Im Folgenden sollen kurz die Schritte einer erfolgreichen Entwicklung bezüglich EMV erläutert werden, um aufzuzeigen, wie sensibel diese Thematik ist:<sup>4</sup>

- In der Definitionsphase werden die EMV-Umgebung festgelegt und die anzuwendenden Normen und Grenzwerte ausgewählt.
- Die Projektierungsphase beinhaltet die Untersuchung, welche Folgen und Konsequenzen die Grenzwerte bezüglich der Entwicklung aufweisen. Daraus lassen sich dann Vorgehensweisen für Konstruktion, Schaltungsentwurf, Layout usw. ableiten.
- In der Entwicklungsphase werden die Erkenntnisse aus den beiden vorigen Phasen umgesetzt und in eine Schaltung oder Ähnliches umgewandelt.
- Danach wird in der Layoutphase versucht, bei voller Funktion der Schaltung, ihre EMV bestmöglich zu gestalten.
- In der abschließenden Testphase wird die Einhaltung der geforderten Grenzwerte überprüft.

Eine strukturierte und definierte Entwicklungsvorgehensweise ist deshalb von Bedeutung, weil es ansonsten häufig vorkommt, dass bei anschließenden EMV-Tests keine positiven Ergebnisse erreicht werden können. Dann muss bei einer bereits fertigen Entwicklung nachgebessert werden. Dies ist meist mit erhöhten Kosten verbunden. Außerdem ist der erneute Gang zur EMV-Teststelle ebenfalls sehr teuer.

In der unten angeführten Abbildung ist dies noch einmal optisch verdeutlicht. Dargestellt sind zum einen die Kosten einer Entwicklung mit umfangreichen präventiven Maßnahmen bezüglich EMV ( $K_{\text{Präventiv}}$ ,  $K_P$ ) und zum anderen eine Entwicklung mit mäßigen präventiven Vorkehrungen, bei der zusätzlich noch Nachbesserungskosten ( $K_N$ ) anfallen. Auf der X-Achse ist die Wahrscheinlichkeit von elektromagnetischen Beeinflussungen aufgetragen. Die gepunktete Linie zeigt die steigenden Nachbesserungskosten.

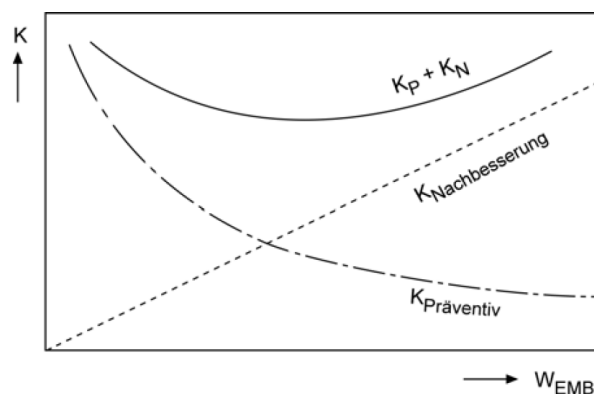


Abb. 3: Kostenvergleich zwischen vorbeugender und normaler Entwicklung bezüglich EMV, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 6.

<sup>4</sup> Vgl. Franz (2013), S. 1-2.

Anhand von generellen Schätzungen kann davon ausgegangen werden, dass die Kosten für EMV-Überlegungen und –Maßnahmen ca. 5% der Entwicklungskosten betragen.<sup>5</sup>

Die zuvor bereits erwähnten Begriffe Störfestigkeit (Immission) und Störaussendung (Emission) sollen aufgrund ihrer Bedeutung detaillierter erläutert werden:

Störfestigkeit ist die Grenze, bis zu der ein elektrisches Gerät Störgrößen ohne Fehlfunktionen ertragen kann. Wird diese Grenze überschritten, kann es zu reversiblen oder irreversiblen Störungen kommen. Durch eine Abschwächung des Kopplungsweges können auch grundsätzlich größere Störungen verkraftet werden, da an der Störsenke nur ein geminderter Anteil der Störung ankommt. Wann die Störgrenze erreicht ist, kann durchaus eine subjektive Entscheidung sein. Ein Beispiel dafür sind analoge Systeme. Hierbei können Störungen sehr unterschiedlich wahrgenommen werden.

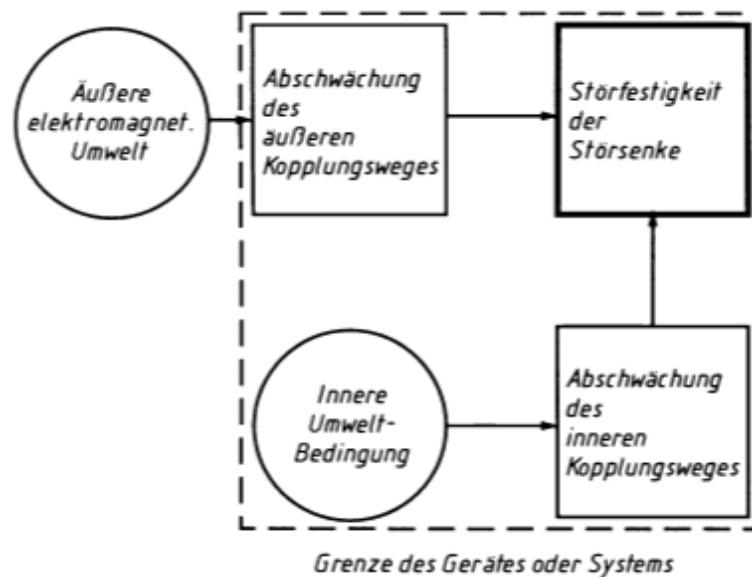


Abb. 4: Einordnung der Störsenke in ihrer Umwelt, Quelle: Rodewald (2000), S. 21.

Als Störaussendung ist die unbeabsichtigte Abgabe von Spannungen, Strömen oder Feldern eines Gerätes definiert.<sup>6</sup> Diese können andere Systeme erheblich beeinträchtigen. Besondere Störer sind beispielsweise Signale mit sehr dynamischen Flankenwechseln wie Rechtecksignale oder Ähnlichem.

## 2.2 Arten von Kopplungen

Wenn es nun trotz bemüheter Entwicklungsarbeit vorkommt, dass man bezüglich EMV negative Resultate erhält, ist eine systematische Fehlersuche erforderlich. Dabei ist es sehr hilfreich, wenn man bei den grundlegenden Kopplungsarten mithilfe des Ausschlussverfahrens vorgeht.<sup>7</sup> Es passiert zwar häufig, dass die unterschiedlichen Kopplungen in Kombination auftreten, aber es kann umfassend bei der Fehlersuche

<sup>5</sup> Vgl. Morgan (2007), S. 10.

<sup>6</sup> Vgl. Rodewald (2000), S. 22.

<sup>7</sup> Vgl. Gonschorek (2005), S. 75-76.

helfen, wenn man eine oder mehrere Arten der Kopplung ausschließen kann. Ein grundlegendes Verständnis der Kopplungsarten erleichtert die Fehlersuche zudem enorm.

Die vier wichtigsten Kopplungsarten können unterschieden werden in:

- Galvanische Kopplung, auch bekannt als Impedanzkopplung oder leitungsgebundene Kopplung
- Kapazitive oder elektrische Kopplung
- Induktive oder magnetische Kopplung
- Elektromagnetische oder Strahlungskopplung

### 2.2.1 Struktur der Beeinflussungswege

Es bieten sich unterschiedlichste Wege an, wie die Kopplungen die Störquelle beeinträchtigen können. Dies kann beispielsweise über die Netzleitungen, die Datenleitungen, die Erd- und Masseleitungen oder über direkte Wellen an die Senke sein.

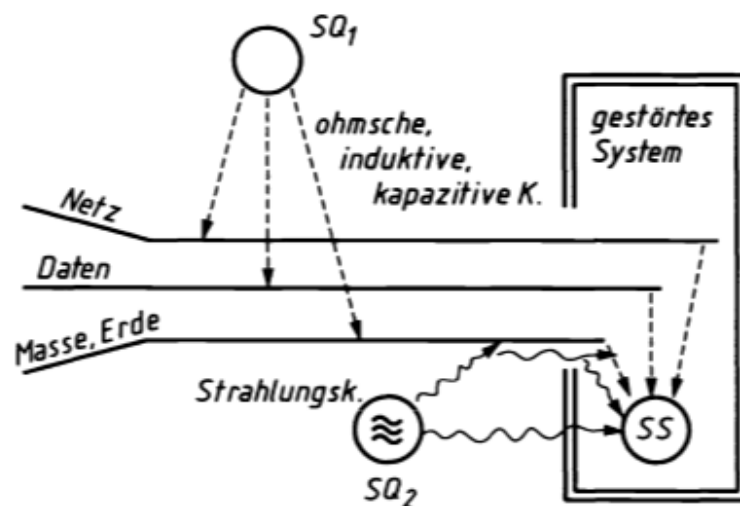


Abb. 5: Beeinflussungswege der Kopplungsarten, Quelle: Rodewald (2000), S. 16.

Ob und wann Felder von energieführenden Leitern ausgehen, hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab. Zum Ersten von der Geschwindigkeit der Feldänderung im Leiter bzw. der dazugehörigen Wellenlänge  $\lambda$  und zum Zweiten von der Länge der Leitung, von der das Feld erzeugt wird. Wenn die Wellenlänge  $\lambda$  wesentlich größer ist als die Leitungslänge  $a$ , dann bleiben die Felder leitungsgebunden. Ist  $\lambda$  gleich groß oder nur geringfügig größer der Länge  $a$ , dann bleibt ein Teil der Wellen leitungsgebunden und ein Teil der Wellen wird abgestrahlt. Dieser abgestrahlte Teil ist bei Rundungen und Kanten des Leiters besonders ausgeprägt.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Vgl. Rodewald (2000), S. 17.

Aus diesem Wissen lassen sich folgende Faustformeln ableiten:<sup>9</sup>

- $\lambda > 10 \cdot a \rightarrow$  Felder sind leitungsgebunden
- $\lambda < 10 \cdot a \rightarrow$  Felder sind leitungsgebunden und strahlen aus

## 2.2.2 Galvanische Kopplung

Die galvanische Kopplung tritt auf, wenn die Ströme der Störquelle und Störsenke über eine gemeinsame Impedanz fließen. Durch den Spannungsabfall an dieser Impedanz teilt sich ein Kreis dem anderen mit. Dies geschieht häufig bei gemeinsamen Bezugsleitern oder gemeinsam genutzter Masse. Abhilfe kann unter anderem geschafft werden, indem man die Kreise auf mehrere Gruppen aufteilt.<sup>10</sup>

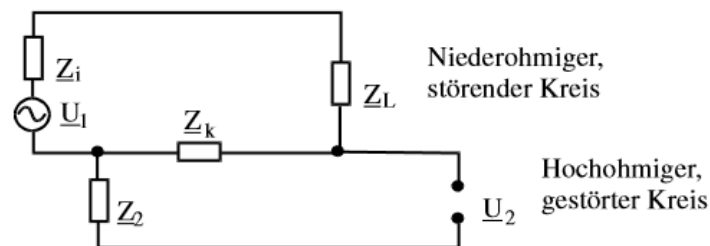


Abb. 6: Prinzip der galvanischen Kopplung, Quelle: Gonschorek (2005), S. 82.

## 2.2.3 Kapazitive Kopplung

Zwischen zwei spannungsführenden Leitern befindet sich ein elektrisches Feld. Gibt es nun eine Spannungsänderung, fließt ein Verschiebungsstrom zwischen diesen Leitern. Falls nun andere Leiter diesen Weg kreuzen, fließt auch durch sie ein Teil des Stromes und dieser generiert dann unerwünschte Spannungen.<sup>11</sup>

Vereinfacht gesagt kann man sich die zwei Leiter als Kondensatorplatten vorstellen. Der Raum dazwischen, egal wie groß dieser ist, ist das Dielektrikum. Bei Spannungsänderungen treibt das einen Verschiebungsstrom über den imaginären Kondensator. Alle dazwischen liegenden Leiter werden durchflossen. In der nachfolgenden Abbildung ist dies dargestellt. Die imaginären, physisch nicht vorhandenen, aber dennoch wirkenden Kondensatoren sind mit der unterbrochenen Linie dargestellt.

<sup>9</sup> Vgl. Rodewald (2000), S. 18.

<sup>10</sup> Vgl. Gonschorek (2005), S. 82.

<sup>11</sup> Vgl. Rodewald (2000), S. 87.

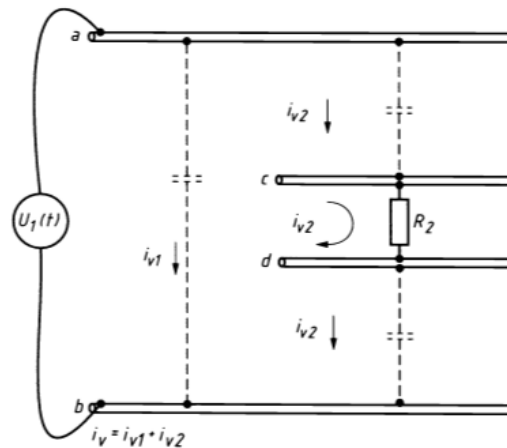


Abb. 7: Prinzip der kapazitiven Kopplung, Quelle: Rodewald (2000), S. 88.

## 2.2.4 Induktive Kopplung

Bei der induktiven Kopplung erfolgt eine Signalübertragung von einem System auf ein zweites über magnetische Felder. Somit können alle Betriebsmittel, welche zeitlich veränderliche Ströme führen, Störquellen sein. Voraussetzung für die induktive Kopplung sind eine Störquelle mit schnellen Stromänderungen und eine Störsenke in Form einer Leiterschleife.<sup>12</sup>

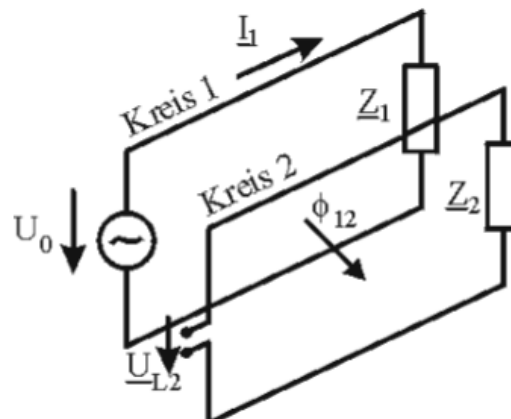


Abb. 8: Induktive Kopplung zwischen zwei Stromkreisen, Quelle: Gonschorek (2005), S. 90.

Dieser Effekt ist ähnlich einem Transformator. Auf der einen Seite gibt es eine Leiterschleife mit dynamischen Spannungswechseln und auf der anderen Seite eine Leiterschleife, in die in Folge des Induktionsgesetzes der Ruhe Spannungen induziert werden.

<sup>12</sup> Vgl. Gonschorek (2005), S. 90.



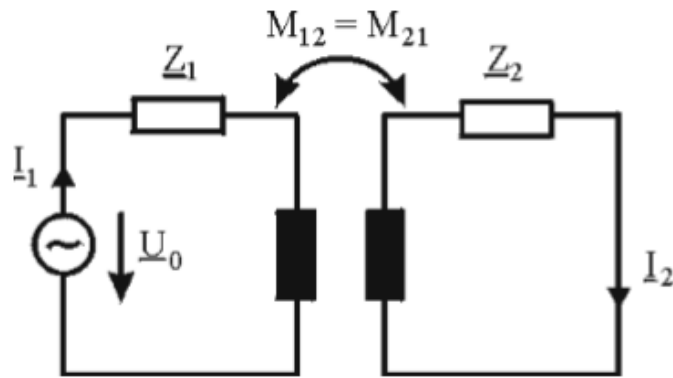


Abb. 9: Ersatzschaltbild der induktiven Kopplung, Quelle: Gonschorek (2005), S. 91.

### 2.2.5 Strahlungskopplung

Die Nomenklatur der Strahlungskopplung ist nicht ganz eindeutig, da hierbei zwischen Nah- und Fernfeld unterschieden werden muss. Betrachtet man jede Kopplung im nicht leitenden Raum als Strahlungskopplung, so würden auch die kapazitive und induktive Kopplung in diese Begrifflichkeit fallen. Daher wird in dieser Arbeit der Begriff Strahlungskopplung ausschließlich auf den Zusammenhang mit dem Fernfeld beschränkt. Das Nah- und Fernfeld werden im weiteren Verlauf ebenfalls noch erläutert.<sup>13</sup>

Bei der Strahlungskopplung werden vom Störer also sowohl elektrische als auch magnetische Felder, welche über den Wellenwiderstand verknüpft sind, ausgesendet. Die Störsenke, welche diese Strahlung empfängt, muss dabei keine Antenne besitzen. Auch jegliche herkömmliche Schaltungen können diese Strahlung empfangen und somit negativ beeinträchtigt werden.<sup>14</sup>

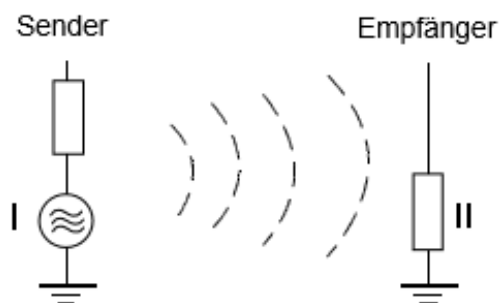


Abb. 10: Prinzip der Strahlungskopplung, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 29.

## 2.3 Gleich- und Gegentaktstörungen

Das Begriffspaar Gleich- und Gegentaktstörung wird in Bezug auf die elektromagnetische Verträglichkeit bzw. die Kopplungsarten häufig verwendet. Darum sollte dieses näher erläutert werden, um das Verständnis in Bezug auf EMV zu vergrößern.

<sup>13</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 29.

<sup>14</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 29-30.

### 2.3.1 Gegentaktstörungen

Gegentaktstörungen können durch die magnetische Kopplung, gemeinsame Impedanzen mit weiteren Kreisen (galvanische Kopplung) oder durch Gleichtakt-/Gegentaktkonversion verursacht werden. Gegentaktstörungen treiben Ströme, die in gleicher Richtung wie die Ströme des Nutzsignals fließen. Das heißt auch, dass sie im Hin- und Rückleiter eines Stromkreises in die entgegengesetzte Richtung fließen, woher auch die Namensgebung stammt. Die Ströme rufen an der Empfängerimpedanz einen unerwünschten Störspannungsabfall hervor. Dieser tritt bei nicht geerdeten Schaltungen als Gegentaktstörspannung, bei symmetrisch betriebenen Stromkreisen als symmetrische Spannung und bei unsymmetrisch betriebenen Kreisen als unsymmetrische Störspannung in Erscheinung.<sup>15</sup>

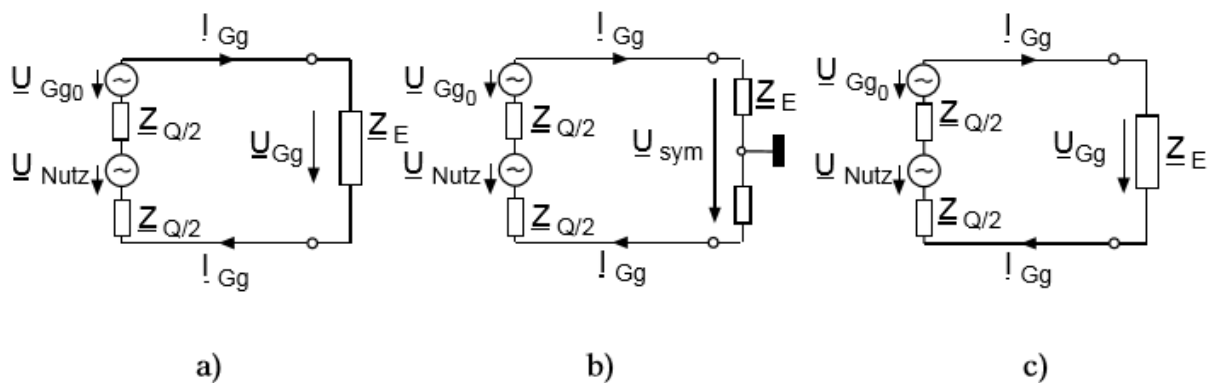


Abb. 11: Definition von Gegentaktstörungen, a) in nicht geerdeten Stromkreisen, b) in symmetrisch betriebenen Stromkreisen, c) in unsymmetrisch betriebenen Stromkreisen, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 33.

Gegentaktstörungen können weitgehend verhindert bzw. stark eingedämmt werden, indem man die Signalleitungen miteinander verdrillt oder mit anwendungsspezifischen Filtern arbeitet.

### 2.3.2 Gleichtaktstörungen

Gleichtaktstörungen werden häufig von kapazitiver Kopplung verursacht. Sie treten immer zwischen Stromkreis und dem Potential Erde auf. Gleichtaktstörquellen verursachen Gleichtaktströme, die in allen Leitern eines Stromkreises gleichsinnig zum Empfänger fließen. Somit kann in erdfreien Kreisen grundsätzlich gar kein Strom fließen, da kein Strompfad vorhanden ist. Dadurch entsteht auch kein unerwünschter Störspannungsabfall am Empfänger. Gegen Erde lässt sich zwar eine unsymmetrische Störspannung messen, am Empfänger liegt jedoch lediglich die Differenz der beiden unsymmetrischen Spannungen an, was dem Nutzsignal entspricht. Dennoch kann es auch bei erdfreien Systemen zu Problemen kommen, wenn die Gleichtaktspannung zu hoch ist. Im schlimmsten Fall kann es zu Überschlügen führen, welche große Schäden anrichten können.<sup>16</sup>

Bei geerdeten Systemen können Gleichtaktströme durch Hin- und Rückleiter über Erde und Streukapazitäten zurück zur Gleichtaktstörquelle fließen. Haben Hin- und Rückleiter dieselbe Impedanz

<sup>15</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 32-33.

<sup>16</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 34-35.

und Streukapazitäten, verursacht dies jedoch noch immer keine Störspannung an der Empfängerimpedanz. Wenn nun aber ungleiche Impedanzen vorhanden sind, werden ungleich große Ströme durch Hin- und Rückleiter getrieben. Das verursacht dann Störspannungsabfälle am Empfänger. Dieses Phänomen wird als Gleichtakt/Gegentaktkonversion bezeichnet.<sup>17</sup>

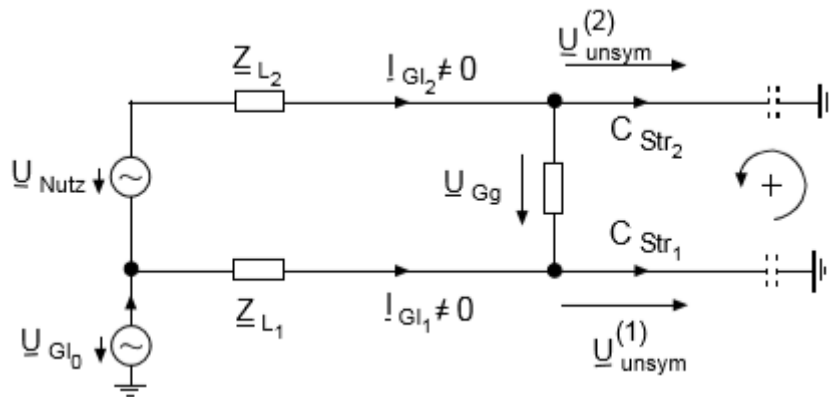


Abb. 12: Schema der Bildung von Gleichtaktströmen, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 35.

Gleichtaktstörungen können beispielsweise vermieden werden, indem man Differenzsignale über Leitungspaare überträgt, anstatt mit einem Bezugspotential zu arbeiten. Eine weitere Möglichkeit wäre es, mithilfe eines Trenntransformators die Übertragung galvanisch zu trennen. Die Schirmung von Leitungen ist ebenfalls eine gute Möglichkeit, dass Gleich- sowie Gegentaktstörungen bereits im Ursprung vermieden werden können.

## 2.4 Elektromagnetische Schirmung

Eine der in der Praxis am häufigsten angewendeten EMV-Maßnahmen ist die Schirmung. Mithilfe der Schirmung können sowohl Störquelle als auch Kopplungspfad und Störsenke bezüglich ihrer EMV verbessert werden. Als Schirmung wird sowohl die Kabelschirmung als auch das Schirmen von Gehäusen und Ähnlichem bezeichnet.

Die Definition eines elektromagnetischen Schirmes lautet: „Ein elektromagnetischer Schirm ist ein Entstörmittel, welches dazu dient, elektromagnetische Felder innerhalb oder außerhalb eines bestimmten Bereichs zu schwächen.“<sup>18</sup>

Aus dieser Definition geht klar hervor, dass ein Schirm entweder dazu dient sein Inneres vor äußeren Einflüssen zu schützen oder das Äußere vor seinem Inneren zu schützen. Die Schirmung dämpft die Kopplung, leitet parasitäre Wellen zwischen Störquelle und Störsenke ab und erhöht damit die elektromagnetische Verträglichkeit. Die Schirmung dient häufig jedoch nicht nur zur Verbesserung der EMV, sondern schützt auch die Umwelt vor elektromagnetischen Einflüssen. Außerdem wird Schirmung ebenfalls verwendet, um Informationen zu schützen. Werden Informationen von einer Quelle zu einer

<sup>17</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 35-36.

<sup>18</sup> Wolfsperger (2008), S. 6.

Senke übertragen, kann durch eine Schirmung verhindert werden, dass diese manipuliert oder abgehört werden können.<sup>19</sup>

Das Arbeitsprinzip der Schirmung funktioniert so, dass die elektromagnetischen Felder in den Schirm eindringen und dort Ladungen influenzieren oder Ströme induzieren. Diese elektrischen bzw. magnetischen Felder überlagern sich dann mit den initiierten Feldern und kompensieren diese teilweise. Dadurch wird die störende Ursache abgeschwächt, egal ob diese sich innen oder außen vom Schirm befindet.<sup>20</sup>

Die Schirmung kann mit dem Schirmfaktor Q dargestellt werden. Dieser ist ein Verhältnis aus Feldstärke im gedämpften zum ungedämpften Zustand an einem bestimmten Punkt. Der Schirmfaktor kann sowohl bei einem magnetischen Feld (2.1) als auch bei einem elektrischen Feld (2.2) ermittelt werden.

		$\underline{Q}/1 + j1$	Schirmfaktor
$\underline{Q} = \frac{H_i}{H_a}$	(2.1)	$\frac{H_i}{\text{m}}$	Magnetische Feldstärke mit Schirmung
		$\frac{H_a}{\text{m}}$	Magnetische Feldstärke ohne Schirmung
		$\underline{Q}/1 + j1$	Schirmfaktor
$\underline{Q} = \frac{E_i}{E_a}$	(2.2)	$\frac{E_i}{\text{m}}$	Elektrische Feldstärke mit Schirmung
		$\frac{E_a}{\text{m}}$	Elektrische Feldstärke ohne Schirmung

Dieses Verhältnis wird häufig logarithmisch dargestellt, da hier die Vorteile des Logarithmus wie beispielsweise Addieren statt Multiplizieren weitgehend genutzt werden können. Das Maß wird dann als Schirmdämpfung bezeichnet und kann ebenfalls wieder aus dem elektrischen bzw. dem magnetischen Feld ermittelt werden. Im Folgenden ist die Formel jedoch allgemein dargestellt.

$a_s = 20 \log \frac{1}{ \underline{Q} }$	(2.3)	$a_s/\text{dB}$	Schirmdämpfung
		$\underline{Q}/1 + j1$	Schirmfaktor

---

<sup>19</sup> Vgl. Wolfspurger (2008), S. 9-11.

<sup>20</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 195.

Um eine ungefähre Übersicht für die Größenordnung der Schirmdämpfung zu erhalten, sind anschließend Schirmdämpfungswerte von 0-120 dB dargestellt und mit ihrer Bedeutung kommentiert:<sup>21</sup>

- 0 - 10 dB: Sehr geringe Schirmung. Keine Abschirmung gegen Störungen, aber durchaus ein Effekt messbar.
- 10 - 30 dB: Minimaler Bereich für erwähnenswerte Schirmung. In leichten Fällen können Störungen eliminiert werden. Die Schirmkonstruktion ist meist sehr einfach.
- 30 - 60 dB: Die durchschnittliche Schirmung für alle kleinen und einige mittlere Probleme im HF-Bereich. Hohe Schirmdämpfung gegen Magnetfelder im NF-Bereich. Auf eine gute Schirmkonstruktion muss geachtet werden! Eine Messung der Schirmung ist noch mit gewöhnlichen Einrichtungen möglich.
- 60 - 90 dB: Sehr gute Schirmung für mittlere bis große EMV-Probleme im HF-Bereich. Eine Messung der Schirmwirkung ist nur mit speziellen Einrichtungen möglich.
- 90 - 120 dB: Im Allgemeinen das Maximum, das mit äußerst guten Schirmungsausführungen möglich ist.

Die elektromagnetische Schirmung ist ein sehr großes Themengebiet, zu dem es umfassende wissenschaftliche Literatur gibt. Da das Thema in dieser Masterthesis jedoch nicht von überwiegender Bedeutung ist, soll an dieser Stelle, nach den Grundkenntnissen, nicht näher darauf eingegangen werden.

## 2.5 Nahfeld und Fernfeld

Bei quasistatischen Feldern – das sind Felder, bei denen die Änderungsgeschwindigkeit so gering ist, dass diese überall gleichzeitig bemerkbar sind – macht sich die Kopplung nicht bzw. nur lokal bemerkbar. Hierbei kann je nach Antenne der elektrische oder der magnetische Teil überwiegen. Sie werden als ortsfeste Felder oder Nahfelder bezeichnet. Genau genommen sind diese Felder aber nicht exakt an den Ort des Feldes gebunden. Da sich hier der Skineffekt bemerkbar macht, fließt der Strom nur in einer dünnen Schicht am Außenrand des Leiters. Aus diesem Grund spricht man von einem quasistationären Feld.<sup>22</sup>

Befindet sich ein Empfänger in großem Abstand zum Sender, ist er im sogenannten Fernfeld, indem ein nichtstationäres, sich ausbreitendes Feld herrscht. Hierbei sind der elektrische und magnetische Anteil miteinander verbunden und können nicht im Einzelnen betrachtet werden. Es resultiert ein elektromagnetisches Feld.<sup>23</sup>

Entscheidend für die Definition von Nah- und Fernfeld ist jedoch nicht nur der Abstand der Antenne, sondern auch die Änderungsgeschwindigkeit der Felder. Im Zeitbereich ist ein Feld als Nahfeld definiert, wenn die Zeitspanne, in der die Feldänderung erfolgt, im Verhältnis zur Laufzeit groß ist. Im

---

<sup>21</sup> Vgl. Technische Universität Hamburg-Harburg Gonschorek/Singer (Hrsg.) (1992), S. 200.

<sup>22</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 196-198.

<sup>23</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 198.

Frequenzbereich spricht man von einem Nahfeld, wenn die Wellenlänge  $\lambda$  größer ist als die Ausdehnung im Definitionsbereich.<sup>24</sup>

Zum besseren Verständnis soll die Distanzierung zwischen Nah- und Fernfeld auch mathematisch erörtert werden. Eine elektromagnetische Welle besteht, wie zuvor erwähnt, aus einem elektrischen und einem magnetischen Wellenteil. Im Fernfeld eines Senders sind das elektrische Feld und das magnetische Feld genau in Phase. Hierbei spricht man auch von einer TEM-Welle (Transverse-Electromagnetic Mode). Diese Wellenart wird im Verlauf der Arbeit noch von größerer Bedeutung sein. Der Poyntingsche Vektor kann durch das Kreuzprodukt dieser beiden Vektoren beschrieben werden. Die Ausbreitungsrichtung der Welle steht senkrecht auf die beiden Vektoren  $\vec{E}$  und  $\vec{H}$ .<sup>25</sup>

		$\vec{S} / \frac{W}{m^2}$	Poynting Vektor
$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$	(2.4)	$\vec{E} / \frac{V}{m}$	Elektrische Feldstärke
		$\vec{H} / \frac{A}{m}$	Magnetische Feldstärke

Durch die Orthogonalität der Felder werden zahlreiche ansonsten vorhandene Faktoren ausgelöscht und Berechnungen werden dadurch wesentlich vereinfacht.

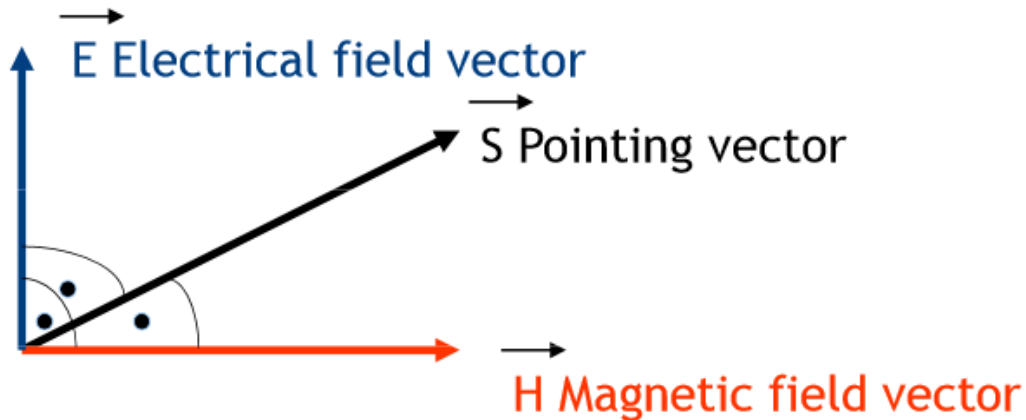


Abb. 13: TEM-Welle mit resultierendem Poynting Vektor, Quelle: Klink (2011), Online-Quelle [28.11.2017], S. 9.

Sind beide Felder in Phase, ergibt sich im freien Raum ein Verhältnis von  $377 \Omega$  zwischen diesen. Dieser Wert wird als Feldwellenwiderstand des freien Raumes bezeichnet.<sup>26</sup>

<sup>24</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 198.

<sup>25</sup> Vgl. Gonschorek (2005), S. 42-43.

<sup>26</sup> Vgl. Gonschorek (2005), S. 43.

$$\Gamma_0(Z_0) = \frac{E_\vartheta}{H_\varphi} = 377 \Omega \quad (2.5)$$

$\Gamma_0(Z_0)/\Omega$

Feldwellenwiderstand

$E_\vartheta/\frac{V}{m}$

Elektrische Feldstärke

$H_\varphi/\frac{A}{m}$

Magnetische Feldstärke

Im Nahfeld überwiegt für gewöhnlich das elektrische Feld. Dies wird dann als Hochimpedanzfeld bezeichnet. Überwiegt das magnetische Feld, wird dies als Niederimpedanzfeld beschrieben. Da die Felder im Nahfeld nicht in Phase liegen, entsteht eine komplexe Wellenimpedanz zwischen ihnen.<sup>27</sup>

Das Nahfeld nimmt mit 20 dB pro Dekade ab und nähert sich dadurch dem Fernfeld an, bis sich die Felder zu einem elektromagnetischen Feld zusammensetzen. Dies ist in der unteren Abbildung veranschaulicht.

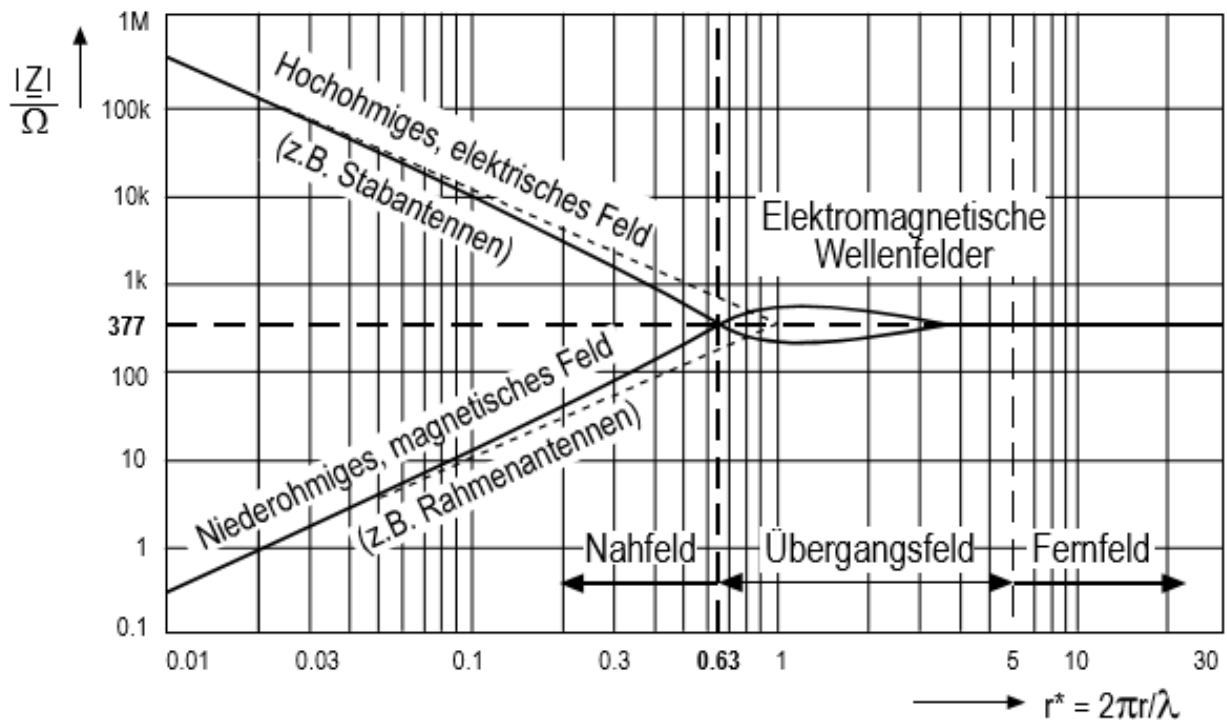


Abb. 14: Übergang von Nah- auf Fernfeld, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 204.

## 2.6 Gesetzliche Aspekte der EMV

Die elektromagnetische Verträglichkeit ist ein branchenübergreifendes Thema. Jedes Gerät und jede Anlage, welche elektrische bzw. elektronische Bauteile birgt, ist betroffen. Daher sind über die Jahre weltweit unterschiedlichste Organisationen und Gremien gegründet worden, welche sich mit diesem Gebiet beschäftigen. Diese haben wiederum für spezifische Bereiche unterschiedlichste Richtlinien und Normen

<sup>27</sup> Vgl. Gonschorek (2005), S. 43.

verfasst. Daher ist es bei einer solch komplexen Thematik im ersten Moment schwierig, einen Überblick über die Vielfalt zu erhalten. Da ein derartiges Problem auch während dem Verfassen der Arbeit auftreten könnte, soll im Folgenden versucht werden, einen überschaubaren Überblick über die relevanten gesetzlichen Aspekte und Normen zu ermöglichen.

### 2.6.1 Organisationen und Gremien

Da man trotz oben erwähnter Vielfalt danach strebt, weltweit gleiche oder sehr ähnliche EMV-Regelungen zu finden, bricht man in der Regel die Vorschriften von der globalsten Organisation immer weiter herunter bis zu den kleineren nationalen.

Auf internationaler Ebene befasst sich die IEC (International Electrical Commission) mit der gesamten Normung der Elektrotechnik und damit auch mit dem Thema der elektromagnetischen Verträglichkeit. Speziell diesem Thema ist auf internationaler Ebene deren Unterorganisation CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) gewidmet.<sup>28</sup> Dadurch kann die CISPR, was die EMV betrifft, auf Augenhöhe mit der IEC betrachtet werden. Eine weitere nennenswerte Organisation, welche sich unter anderem mit diesem Thema beschäftigt, ist die ISO (International Standards Organization). Diese befasst sich zwar meist nicht direkt mit dem Thema EMV, sondern mit elektrischen Teilsystemen in Geräten oder Systemen, die im Wesentlichen nicht elektrischer Natur sind (z.B. Elektronik in Kraftfahrzeugen). Aufgrund ihrer Macht kann die ISO jedoch ebenfalls als nennenswerter Mitspieler in diesem Bereich angesehen werden.<sup>29</sup> Ergänzend sei erwähnt, dass es auch weitere Gremien gibt, die an dieser Stelle jedoch außen vor gelassen werden.

Die nächste Instanz darunter auf europäischer Ebene bildet die CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique). Diese gibt die EN-Normen heraus und übernimmt dabei Wortlaut und Inhalt der internationalen Normen.<sup>30</sup>

Danach folgt die nationale Ebene. Hier gibt es in Österreich den ÖVE (Österreichischer Verband für Elektrotechnik), welcher die ÖNORMEN hervorbringt. Oft gebräuchlich sind in Österreich auch die deutschen Normen DIN und VDE, welche von der DKE (Deutsche Elektrotechnische Kommission) herausgegeben werden.

Diese Struktur ist anbei noch einmal grafisch zusammengefasst. Auf nationaler Ebene würde auch Österreich mit der ÖNORM seinen Platz finden.

---

<sup>28</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 466.

<sup>29</sup> Vgl. Rodewald (2000), S. 28.

<sup>30</sup> Vgl. Rodewald (2000), S29.



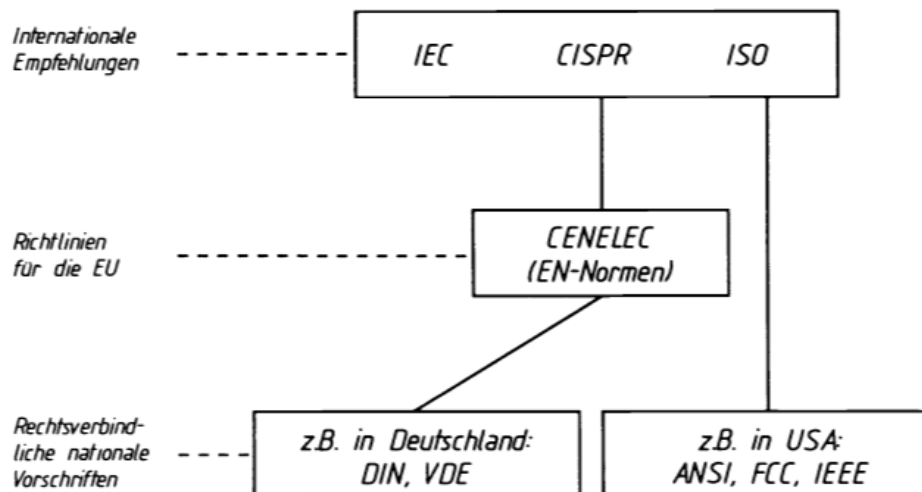


Abb. 15: Die wichtigsten Normungsorganisationen bezüglich EMV im Überblick, Quelle: Rodewald (2000), S. 29.

## 2.6.2 Aufbau der Richtlinien und Normen

Zusammenfassend kann zu den einzelnen vorhin erwähnten Norm-Hierarchien gesagt werden, dass die internationalen Normen ausschließlich den Charakter von Empfehlungen aufweisen. Die EN-Normen bauen auf diese auf und sind verbindliche Richtlinien in der EU. Nationale Normen sind meist mit den europäischen Normen harmonisiert und sind für das jeweilige Land rechtlich verbindlich.<sup>31</sup>

Gesetzlich war bis zum 13.12.1995 das Hochfrequenzgerätegesetz gültig, indem es Regelungen bezüglich der Emission gab. Danach durfte nur nach dem am 13.11.1992 eingeführten Gesetz über die Elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten (EMVG) gehandelt werden. In diesem gibt es nun nicht nur umfassende Regelungen hinsichtlich der Emission, sondern auch ein Reglement zur Immission und zur Immunität. Es gibt auch noch weitere Gesetze, in denen die elektromagnetische Verträglichkeit von Bedeutung ist. Diese sollen im Zuge der Masterthesis aber nicht genauer analysiert werden, da sie für das Thema nicht relevant sind.<sup>32</sup>

Die EMV-Normen sind im Wesentlichen in drei unterschiedliche Klassen aufgebaut:<sup>33</sup>

- Grundnormen oder Basic Standards beschreiben bestimmte Störphänomene sowie Prüfverfahren, Messmethoden, Prüfaufbauten und Grenzwerte.
- Fachgrundnormen oder Generic Standards beziehen sich auf eine bestimmte räumliche Umgebung und alle Geräte darin. Es wird zwischen einer Gruppe A für eine industrielle Umgebung und einer Gruppe B für allgemeine Wohnbereiche entschieden. Diese Klasse enthält u.a. Grenzwerte zur Störaussendung und Störfestigkeit in den unterschiedlichen Umgebungen.
- Produktfamilien- und Produktnormen oder Product Standards beschreiben speziell zu beachtende Bedingungen für ein Produkt oder eine Produktgruppe bezüglich Prüf- und Messaufbauten,

<sup>31</sup> Vgl. Rodewald (2000), S. 29.

<sup>32</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 466 ff.

<sup>33</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 468-469.

Betriebsbedingungen des Prüflings beim Messen bzw. Prüfen, zulässige Grenzwerte und Prüfschärfen.

Diese Klassen sind Schritt für Schritt und nacheinander anzuwenden, beginnend bei der spezifischsten und hin zur allgemeinen.

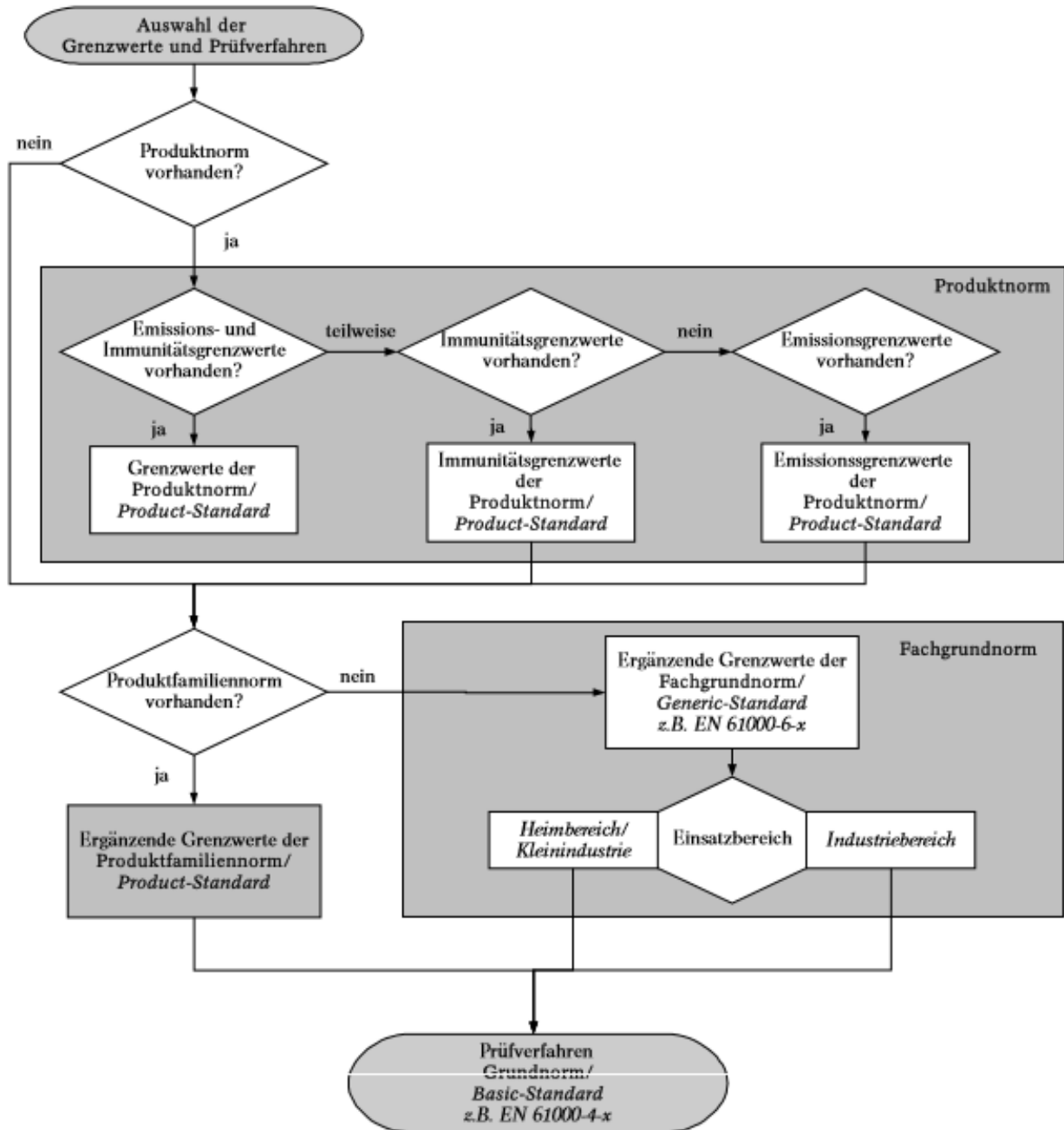


Abb. 16: Auswahlverfahren der Normklassen, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 469.

### 2.6.3 CE-Kennzeichnung und Konformität

Bauteile, Geräte oder Baugruppen, welche in der EG (Europäische Gemeinschaft) vertrieben werden und für Endbenutzer erhältlich sind, unterliegen einer CE-Kennzeichnungspflicht. Hat ein Inverkehrbringer eines Gerätes alle für das Produkt relevanten und gültigen Normen, Richtlinien und Gesetze eingehalten, ist es ihm nach Ausstellen einer Konformitätserklärung erlaubt, selbst das CE-Kennzeichen auf sein

Produkt anzubringen. Das CE-Zeichen ist jedoch kein Qualitätssiegel und es bedeutet nicht, dass das Produkt einwandfrei funktioniert.<sup>34</sup>

Für den Nachweis der Konformität bezüglich EMV muss der Hersteller oder ein EMV-Dienstleister das besagte Gerät typprüfen. In einfachen Fällen ist es auch erlaubt, „anhand der maßgebenden Erscheinungen“ des Gerätes die EMV zu beurteilen. Ist das geschehen und ausreichend dokumentiert, darf eine Konformitätserklärung für dieses und alle baugleichen Geräte ausgestellt werden, sofern auch alle anderen Richtlinien und Normen, die nicht das Thema EMV betreffen, eingehalten und belegt wurden.<sup>35</sup>

Das CE-Kennzeichen sollte jedoch nie leichtfertig und ohne Gewissheit über die Einhaltung aller Aspekte angebracht werden. Da der Inverkehrbringer für das Anbringen des CE-Zeichens verantwortlich ist, wird dieser auch bei einer möglichen Haftung herangezogen. Das CE-Kennzeichen hat wie folgt auszusehen:



Abb. 17: CE-Kennzeichen und Designhilfe, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 475.

---

<sup>34</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 474-479.

<sup>35</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 475.

### 3 MESSMÖGLICHKEITEN

Im nachfolgenden Kapitel soll auf unterschiedliche Testmethoden, mit denen man EMV-Messungen machen kann, eingegangen werden. Es soll die Freifeldmessung betrachtet werden, da diese in der Historie eine übergeordnete Rolle spielt und auch heute als die Standardmessmethode gehandhabt wird. Außerdem sollen unterschiedliche Arbeitsweisen in abgeschirmten Räumen untersucht werden. Es werden die Eigenschaften sowie die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren aufgezeigt. Besondere Aufmerksamkeit wird hierbei auf die GTEM-Zelle gelegt, da die spätere Entwicklung auf diese Messzelle bezogen ist. Aber auch ähnliche bzw. alternative Methoden sollen behandelt werden, um die Unterschiede darzustellen und den Einsatz einer GTEM-Zelle nachvollziehbarer zu machen. Dabei soll beispielsweise geklärt werden, warum der Prüfling in der GTEM-Zelle bei einem Vergleich mit einer Absorberkammer gedreht werden muss bzw. warum diese Messmethode so häufig angewendet wird.

#### 3.1 Freifeldmessung

Die Freifeldmessung war lange Zeit die am häufigsten eingesetzte Messung und ist in den Normen sehr gut beschrieben. Die ideale Freifeldmessung benötigt einen perfekt leitenden, unendlich großen Untergrund, der frei von jeglichen Hindernissen ist und nahezu keine elektromagnetischen Strahlungen in der Umgebung aufweist. In der Realität ist man weit von diesen Bedingungen entfernt. Gleichwohl werden Freifeldmessungen nach wie vor eingesetzt und sind in jeder Norm beschrieben und erlaubt.<sup>36</sup>

Für eine reale Freifeldmessung, häufig auch als OATS (open-area test site) bezeichnet, benötigt man einen ausreichend großen, sehr flachen Untergrund, auf dem keine Hindernisse vorhanden sind. Damit nähert man sich an die Idealbedingungen an. Laut CISPR sind diese Größenverhältnisse gegeben, wenn man das Feld als Ellipse aufbaut. Dabei bilden das zu messende Objekt (EUT – Equipment under test) und die Messantenne das Zentrum dieser Ellipse, wobei der doppelte Abstand zwischen diesen den großen Durchmesser des Messplatzes definiert. Der kleinere Durchmesser ist mit  $\sqrt{3}$  mal dem Abstand zwischen EUT und Antenne festgelegt. Als Abstand zwischen Prüfling und Antenne sind laut Norm 3, 10 und 30 m definiert, je nach Größe des Prüflings und nach Messart, die man durchführen möchte.<sup>37</sup>

---

<sup>36</sup> Vgl. Christopoulos (2007), S. 384.

<sup>37</sup> Vgl. Montrose/Nakauchi (2004), S. 78-79.

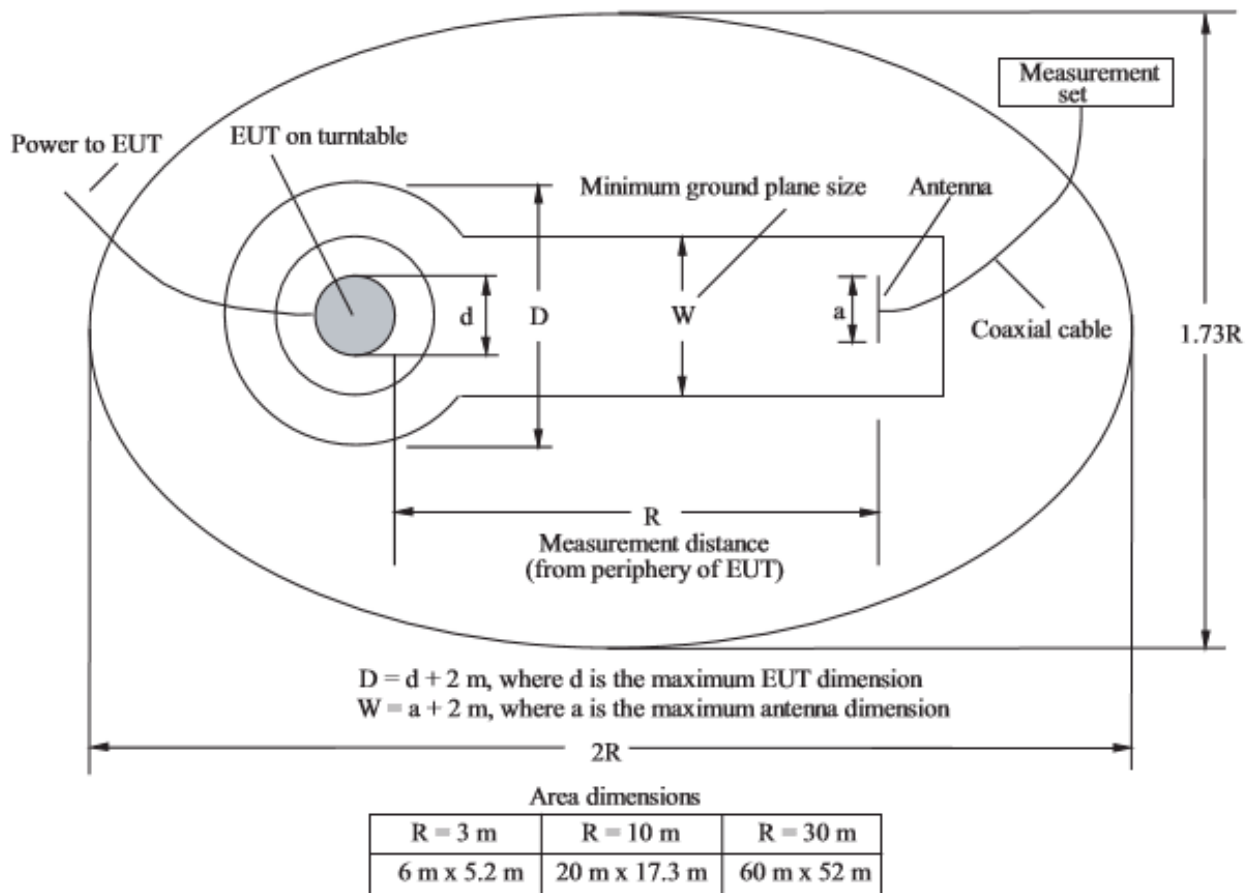


Abb. 18: Aufbau eines Freifeldmessplatzes, Quelle: Montrose/Nakauchi (2004), S. 79.

Um die Messgenauigkeit zu steigern, wird häufig eine reflektierende Metallplatte auf dem Boden des Messplatzes positioniert. Es können jedoch auch durchaus zufriedenstellende Ergebnisse ohne Metallplatte erzielt werden. Dazu muss der Boden aus sehr homogenem Material bestehen und darf nicht aus Sand oder Stein sein. Die Gefahr hierbei ist dennoch, dass es zu unerwünschten Reflexionen durch den Boden kommt. Je nach Laufzeit verstärken oder schwächen diese das Signal und verfälschen dadurch das Ergebnis.<sup>38</sup>

Bei der Messung selbst ist es dann notwendig, das Messobjekt zu drehen. Daher wird es meist auf einer Höhe von 0,8 – 1 m und auf einem drehbaren Tisch positioniert. Die Antenne muss in der Höhe variabel sein und die Messungen müssen sowohl mit vertikaler als auch horizontaler Polarisierung durchgeführt werden. Die Störfeldstärke ist bei jeder Messfrequenz für horizontale und vertikale Polarisierung der Empfangsantenne zu ermitteln. Die Maximalwerte (Drehtisch und Höhenvariation) werden festgehalten.<sup>39</sup>

Die Nachteile dieser Messmethode liegen klar auf der Hand. Man benötigt sehr viel Platz, welcher meist kostenintensiv ist und auch noch sehr eben sein muss. Außerdem ist man auf einem Freifeldplatz von der Witterung und anderen äußeren Einflüssen abhängig. Ein weiteres großes Problem ist auch, dass es

<sup>38</sup> Vgl. Montrose/Nakauchi (2004), S. 79-80.

<sup>39</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 303.

heutzutage nahezu unmöglich ist, Plätze zu finden, an denen man keine oder nur geringe Störsignale in der Umgebung hat. Auch die Dauer der Messungen ist häufig ein Problem, da man sowohl das EUT drehen muss als auch mit unterschiedlichen Polarisierungen der Antenne messen muss. Einige dieser Nachteile kann man zwar mit einer Semi-Absorberkammer – das ist quasi eine Freifeldmessung in einer Halle – kompensieren, das Platzproblem bleibt jedoch nach wie vor vorhanden.

Natürlich weist die Freifeldmessung auch Vorzüge auf. Sie ist eine bewährte Messmethode und dadurch auch sehr genau in den Normen beschrieben und festgelegt. Mit dieser Methode können Emissionen und Immissionen gemessen werden. Auch ein Abdecken eines sehr hohen Frequenzbereichs ist mit der Messmethode möglich.

Insgesamt überwiegen allerdings die Nachteile dieser Messung. Daher wird die OATS heutzutage häufig durch Messungen in einer Absorberkammer ersetzt.

### 3.2 Semi-Absorberkammern und Vollabsorberraum

Bei den bereits erwähnten Semi-Absorberkammern werden die Wände und die Decke der Kammer mit einem absorbierenden Material bedeckt, da ansonsten Reflexionen an diesen auftreten würden. Die Reflexionen würden sich dann mit den ankommenden Wellen überlagern und dann entweder konstruktive oder destruktive Interferenzen bilden. Dadurch würde das Ergebnis der Messungen verfälscht werden. Durch die Absorber erfolgt aber eine stetige reflexionsarme Impedanzanpassung des Feldwiderstandes im Schirminneren ( $Z_0 = 377 \Omega$ ) an den Feldwiderstand der Schirmwand ( $Z_0 = 0 \Omega$ ). Der Boden der Semi-Absorberkammer besteht, wie der einer Freifeldmessung, aus einer leitenden Platte. Dadurch kann die Semi-Absorberkammer direkt mit der Freifeldmessung verglichen werden und es können dieselben Grenzen und Werte herangezogen werden. Der Vorteil hierbei ist, dass man sowohl witterungsunabhängig als auch frei von störenden Umgebungsfeldern ist. Das Platzproblem bleibt jedoch vorhanden.<sup>40</sup>

Bei Vollabsorberräumen ist auch der Boden des Raumes mit absorbierendem Material bedeckt. Dadurch gibt es keine Reflexionen. Das bringt den großen Vorteil mit sich, dass die Antenne an einer fixen Höhe angebracht werden kann und der Höhengscan gänzlich wegfällt. Dadurch kann sich die Messzeit erheblich verkürzen. Als Montagehöhe wird dieselbe Höhe gewählt, an dem sich das EUT befindet. Für den Abstand der Antenne kann zwar die Normentfernung der Freifeldmessung von 3, 10 oder 30 m gewählt werden. Es ist auch möglich, mithilfe einer mathematischen Umrechnung kleinere beliebige Entfernungen zu wählen. Es sollte dennoch, wenn möglich, ein größerer Abstand bevorzugt werden, da hierbei der Rechenfehler geringer bleibt. Um die Messung einer Vollabsorberkammer mit einer Freifeldmessung vergleichbar zu machen, ist erneut eine mathematische Operation notwendig, um die Bodenreflexionen zu berücksichtigen. Mit dieser Methode kommt man sehr nah an die idealen Ergebnisse einer Freifeldmessung heran.<sup>41</sup>

---

<sup>40</sup> Vgl. Richter (2007), S. 36-37.

<sup>41</sup> Vgl. Clay (1998), S. 1122.

Vollabsorberräume sind durch ihren Aufbau sehr vielseitig einsetzbar und sind in der Praxis auch sehr verbreitet. Sie werden häufig eingesetzt für:<sup>42</sup>

- Emissionsmessungen
- Störfestigkeitsprüfungen
- Antennenvermessung
- Schirmdämpfungsmessung

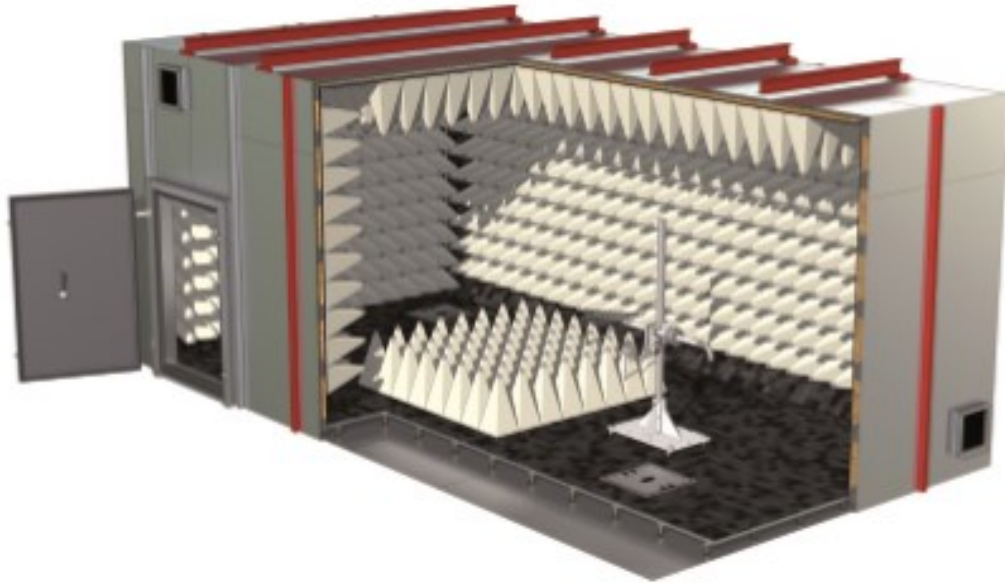


Abb. 19: Vollabsorberraum mit einlegbaren Absorberplatten, Quelle: Frankonia (2017), Online-Quelle [28.11.2017].

Die Vorteile der Semi-Absorberkammer sind nochmals zusammengefasst der einfache Vergleich mit einer Freifeldmessung, die Unabhängigkeit von äußeren Einflüssen und das einfache Arbeiten in der Kammer, da der Boden zugänglich ist.

Der größte Nachteil bei Messungen mit einer Semi-Absorberkammer ist, wie auch bei der OATS-Messung, der große Platzbedarf. Auch der Schirmraum selbst und die Unterkonstruktion der Absorber müssen statisch sehr massiv ausgeführt sein, da die Absorber ein sehr hohes Gewicht erreichen können. Das hohe Gewicht und die bei höheren Frequenzen sehr tiefen Absorber machen die Konstruktion der Türen zu den Räumen ebenfalls sehr aufwendig.

Vollabsorberräumen bieten ebenfalls Schutz vor äußeren Einflüssen. Sie sind sehr flexibel und für unterschiedlichste Anwendungen geeignet. Mit ihnen sind, je nach Absorbermaterial, beachtliche Frequenzen bis 40 GHz messbar.<sup>43</sup> Einer der größten Vorteile ist jedoch, dass der Höhenscan der Antenne wegfällt und der Abstand zum EUT variiert bzw. deutlich verringert werden kann.

---

<sup>42</sup> Vgl. Wolfsperger (2008), S. 312-313.

<sup>43</sup> Vgl. Wolfsperger (2008), S. 313.

Neben den zahlreichen Vorteilen weisen auch Vollabsorberkammern einige Defizite auf. So spielen auch hier die Statik und das Gewicht eine wichtige Rolle und müssen beachtet werden. Auch ein direkter Vergleich mit den vorigen Methoden ist nicht so einfach möglich, da vorher eine Umrechnung erfolgen muss. Ebenfalls ein Problem ist die Zugänglichkeit im Raum, da auf den Absorbern auf dem Boden keine Fortbewegung möglich ist und so zusätzliche Konstruktionen notwendig sind bzw. Gehbereiche geschaffen werden müssen. Schließlich sind auch die Kosten für eine Vollabsorberkammer beträchtlich und müssen daher ebenfalls mit in Betracht gezogen werden.

### 3.3 Modenverwirbelungskammer

Als ergänzende Messmöglichkeit soll auch die Modenverwirbelungskammer behandelt werden, da auch diese zu den Messungen in Schirmkammern zählt. Sie bietet eine kostengünstige Alternative zu Absorberkammern.

Bei Modenverwirbelungskammern werden die Wandreflexionen der Kammer nicht eliminiert, sondern gemeinsam mit der Eigenresonanz des Raumes bewusst für die Messung genutzt. In diesen Kammern befinden sich große, sich drehende Metallrührer, die es ermöglichen, die Ausbreitungsbedingungen für Moden – das sind Wellen mit Frequenzen, bei denen Eigenresonanzen auftreten – kontinuierlich zu verändern. Die Anzahl und Dichte dieser Moden muss ausreichend hoch sein, damit aussagekräftige Messungen möglich sind. Die unterschiedlichen Rührerwinkel sorgen dabei auch für Mehrfachreflexionen der elektromagnetischen Wellen an den Wänden und erzeugen in der Kammer näherungsweise unendlich viele Resonanzfrequenzen, über deren Gesamtheit sich ein elektromagnetisches Feld einstellt. Außerdem erhält man über die statistisch verteilten Rührerstellungen ein Wellenfeld, dessen Richtung und Polarisation gleich verteilt ist. Dadurch wird der Prüfling immer in seiner Gesamtheit betrachtet und es entfällt ein Drehen des Prüflings.<sup>44</sup>

Um ein verwertbares Ergebnis zu erhalten, müssen bei der Modenverwirbelungskammer viele Einzelmessungen durchgeführt werden. Hierzu gibt es zwei Verfahren. Im Mode-Tuned-Betrieb wird der Rührer immer um einen definierten Bereich weitergedreht. Eine Umdrehung besteht meist aus 200 oder 400 Schritten. Im Mode-Stirred-Betrieb wird der Rührer kontinuierlich gedreht und dabei gemessen. Dies hat bei Störfestigkeitsprüfungen die Eigenschaft, dass träge Systeme schwierig zu untersuchen sind, da das Feld am Prüfling sich schnell ändert.<sup>45</sup>

---

<sup>44</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 225-227.

<sup>45</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 227-228.





Abb. 20: Innenraum einer Modenverwirbelungskammer, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 229.

Modenverwirbelungskammern sind bezüglich Störfestigkeitsprüfungen eine preiswerte Alternative zu Absorberkammern. Außerdem wird durch das gleichmäßige Feld in allen Polarisierungen, das auf den Prüfling wirkt, der Worst Case simuliert, ohne dabei den Prüfling bewegen zu müssen. Bei Emissionsmessungen wird hier die abgestrahlte Gesamtleistung gemessen und nicht die Feldstärke, wie beispielsweise bei Absorberkammern. Dies wird vielen Umgebungen besser gerecht und ist damit ebenfalls ein Vorteil. Bei Schirmdämpfungsmessungen bieten Modenverwirbelungskammern den Benefit, dass keine aufwendige Kalibrierung der Messumgebung stattfinden muss und dass Messungen in viel kürzerer Zeit möglich sind, da weder Antenne noch EUT positioniert werden müssen. Damit zeichnet sich die Modenverwirbelungskammer als einfache, schnelle und billige Alternative zu Absorberkammern aus.<sup>46</sup>

Als Nachteile der Modenverwirbelungskammer seien die notwendige komplexe Software und die sehr strittige Vergleichbarkeit zu den anderen erwähnten Verfahren genannt.

### 3.4 TEM-Zelle

TEM-Zellen, oder auch Crawford-Zellen genannt, können als rechteckförmig aufgeweitete Koaxialleitungen betrachtet werden, in denen TEM-Wellen erzeugt werden, um EMV-Untersuchungen durchzuführen. Den Außenleiter bildet das Gehäuse der Zelle und der Innenleiter ist als Streifen (Septum) ausgeführt. TEM-

---

<sup>46</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 228-230.

Zellen werden meist für Messungen der Emission, der Immission, der Suszeptibilität und zum Kalibrieren von Messsonden verwendet.<sup>47</sup>

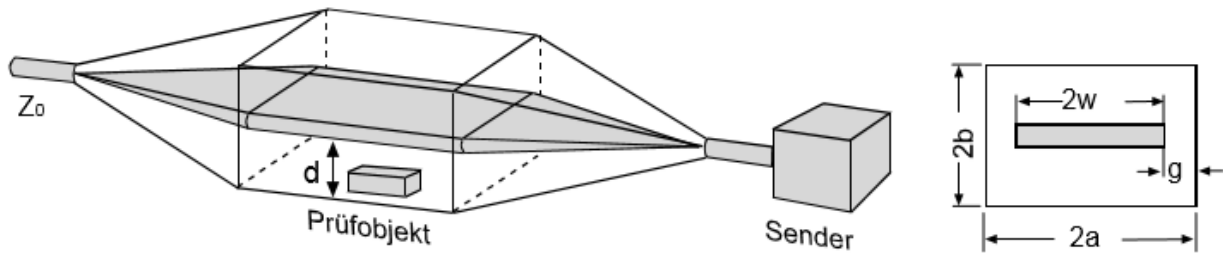


Abb. 21: Schematischer Aufbau einer klassischen Crawford-Zelle, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 231.

Die spitz zusammenlaufenden Enden dieser Zellen gehen in ein Kabelsystem mit gleichem Wellenwiderstand von  $50 \Omega$  über. Wie in Formel 2.5 bereits erwähnt, beträgt der Feldwellenwiderstand im Inneren der Struktur bei TEM-Wellen  $377 \Omega$ . Damit sind die Bedingungen gegeben, um Messungen aus der TEM-Zelle mit jenen vom Freifeld zu vergleichen. Dadurch können nicht nur Pre-Compliance-, sondern auch normenkonforme Tests mit diesem Zellentyp durchgeführt werden.<sup>48</sup>

Das EUT wird im mittleren quaderförmigen Teil der Zelle positioniert. Als Arbeitsbereich ist ein Drittel der Zelle festgelegt. Bei der TEM-Zelle kann das EUT entweder ober oder unter dem zentralen Septum angebracht werden.<sup>49</sup>

Bei höheren Frequenzen erzeugen die elektromagnetischen Wellen Diskontinuitäten am Übergang von der konischen Einspeisung zum quaderförmigen Mittelteil. Diese Elementarwellen überlagern sich mit dem ursprünglichen Wellenfeld und stören so dessen TEM-Charakter. Dadurch wird das Messergebnis verfälscht und ist somit unbrauchbar. Daher ist der Übergangswinkel der Zelle und folglich die Zellengröße ausschlaggebend dafür, bis zu welcher Frequenz gemessen werden kann.<sup>50</sup>

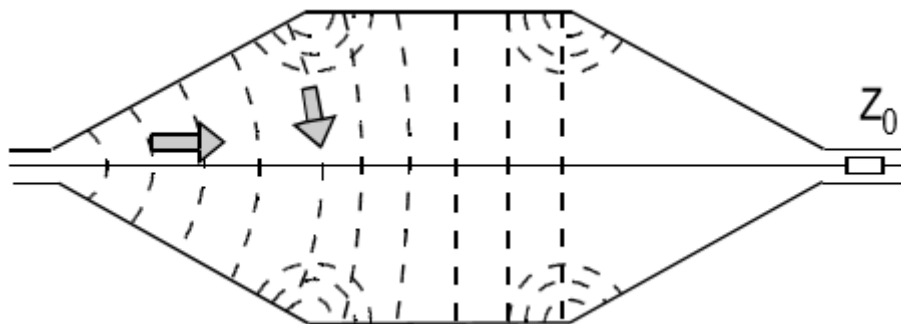


Abb. 22: Störung des TEM-Modus in TEM-Zellen bei hohen Frequenzen, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 232.

<sup>47</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 231-232.

<sup>48</sup> Richter (2007), S. 39.

<sup>49</sup> Vgl. Ngu (2009), S. 13.

<sup>50</sup> Vgl. Ngu (2009), S. 13-15.

Die obere Grenzfrequenz, bei der die ersten Störungen resultieren, kann wie folgt berechnet werden:

$$f_c = \frac{c}{2W} \quad (3.1)$$

$f_c/\text{Hz}$	Obere Grenzfrequenz
$c/\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Lichtgeschwindigkeit
$W/\text{m}$	Weite der TEM-Zelle

Da auch die Baugröße beschränkt und irgendwann nicht mehr wirtschaftlich realisierbar ist, können TEM-Zellen nur für niedrige Frequenzen bis einige hundert MHz verwendet werden. Aus diesem Grund werden TEM-Zellen heute meist durch GTEM-Zellen ersetzt, mit denen man diesen Nachteil umgehen kann.

Zusammengefasst sind die Vorteile von TEM-Zellen, dass sie eine geschützte Umgebung bieten und nicht von äußeren Einflüssen abhängig sind. Sie können in normalen Räumlichkeiten verwendet werden. In kleineren Bauformen sind die Zellen sogar transportabel. Zudem sind sie im Verhältnis zu anderen Methoden platzsparend und die energieintensive Antenne fällt gänzlich weg. Es kann mit niedrigen Frequenzen bis Gleichstrom geprüft werden, da es keine untere Grenzfrequenz gibt. Damit ist die TEM-Zelle eine kostengünstige Alternative zur Freifeldmessung und zur Schirmkammer.

Einer der größten Nachteile ist jedoch, dass sie nur für relativ niedrige Frequenzen geeignet ist. Durch ihre Bauform kommt es bereits bei einigen hundert MHz zu Problemen. Mit größeren Zellen kann man zwar auch bis zu einem geringfügig größeren Bereich messen, dadurch gehen jedoch viele Vorteile der Zelle verloren und der wirtschaftliche Aspekt leidet ab einem gewissen Punkt ebenfalls. Die Vergleichbarkeit zur OATS ist zwar gegeben, was durchaus als Vorteil zu werten ist, es müssen trotzdem einige Bedingungen diesbezüglich betrachtet werden. Beispielsweise muss die Gesamtabstrahlung des EUTs ermittelt werden. Dies wird im Kapitel 3.5 näher erläutert.

Die TEM-Zelle weist zwar deutlich mehr Vor- als Nachteile auf, dennoch überwiegt die niedrig begrenzte Frequenz als entscheidender Nachteil. Daher finden TEM-Zellen in der Praxis immer weniger Einsatz.

## 3.5 GTEM-Zelle

Da der Schwerpunkt dieser wissenschaftlichen Arbeit im Arbeiten mit einer GTEM-Zelle liegt, soll sie mit besonderer Sorgfalt betrachtet werden.

### 3.5.1 Aufbau und Funktionsweise

Eine GTEM-Zelle ist von der Funktion ähnlich einer TEM-Zelle und besteht vom Aufbau her nur aus dem sich konisch aufweitenden Teil der TEM-Zelle. Das Septum ist bei dieser Zelle im oberen Bereich, um mehr Platz für den Prüfling zu schaffen. Am Ende der Zelle befindet sich zum einen ein Widerstandsabschlussnetzwerk mit  $50 \Omega$  und zum anderen sind an der Rückwand der Zelle Hochfrequenzabsorber, ähnlich jenen in Absorberkammern, angebracht. Diese nehmen Reflexionen bei höheren Frequenzen auf. Das Gehäuse der Zelle ist geschirmt aufgebaut, was, wie bei der TEM-Zelle, ein bedenkenfreies Arbeiten in normalen Laborumgebungen ermöglicht. Auch bei diesem Zellentypus darf das

EUT nur ca. ein Drittel der Zellenhöhe in Anspruch nehmen. Dies wird in folgender Abbildung verdeutlicht. Nur in einem definierten Bereich sind die elektrischen und magnetischen Felder normal aufeinander. Dadurch kann auch nur in diesem Bereich eine genaue Messung vollzogen werden.

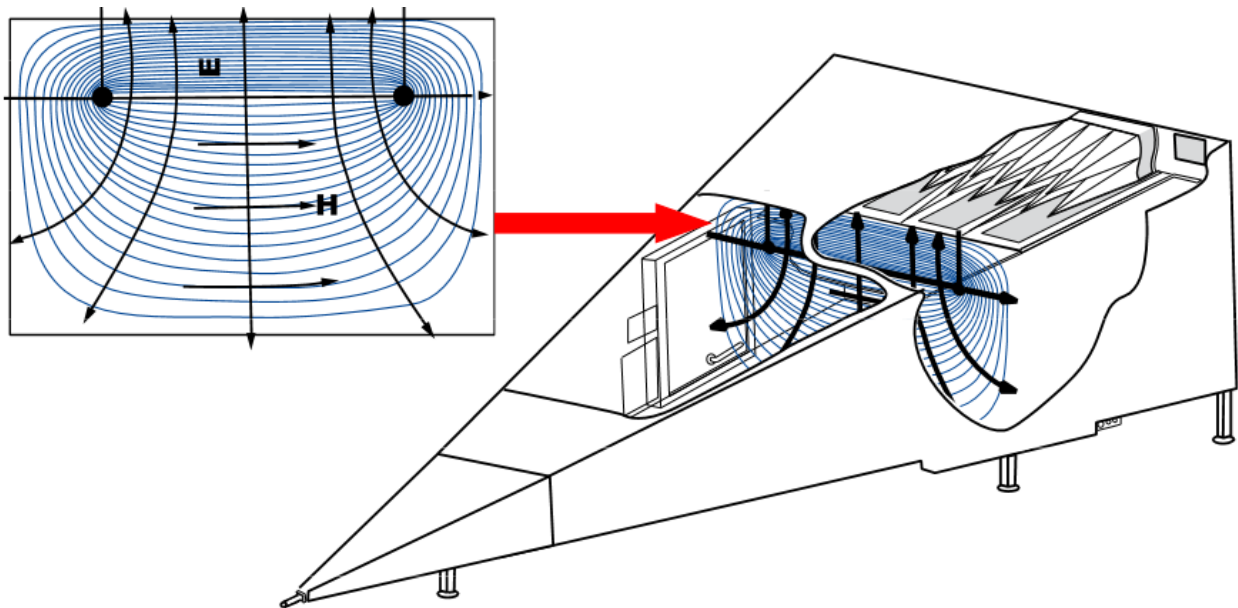


Abb. 23: Feldausbreitung in einer GTEM-Zelle, Quelle: Klink (2011), Online-Quelle [28.11.2017], S. 14.

Bei der GTEM-Zelle tritt nur eine hinlaufende Welle auf. Die rücklaufende Welle wird nahezu gänzlich ausgelöscht bzw. absorbiert. Mit diesem Messgerät können Immissionen und Emissionen gemessen werden. Die Größe der Prüflinge ist jedoch beschränkt. Momentan sind Prüfvolumina von ca. 2 m<sup>3</sup> erreichbar. Durch die klaren Feldverhältnisse wird die GTEM-Zelle bei Störfestigkeitsprüfungen häufig angewendet und stellt eine bewährte Technik zur Verfügung. Bei Emissionsmessungen gibt es das Problem, dass die in einem Raumwinkel von 360° abgestrahlten Emissionen an den Wänden reflektiert bzw. an der Hinterwand absorbiert werden. Das führt zu zahlreichen vagabundierenden Wellenfronten. Dadurch kann auch kein eindeutiger Antennenfaktor angegeben werden. Dies macht die Ergebnisse der durchgeführten Messung fragwürdig. Daher muss der Prüfling in mehreren Achsen vermessen und folglich das Messobjekt mehrfach gedreht werden, um dieses Defizit auszugleichen. Daraus kann dann, wie in einer Modenverwirbelungskammer, die abgestrahlte Gesamtleistung ermittelt werden, welche eine klare Aussage zur Störabstrahlung zulässt.<sup>51</sup>

### 3.5.2 Korrelation zur Freifeldmessung

Um aus den einzelnen Messungen die abgestrahlte Gesamtleistung zu ermitteln, gibt es unterschiedliche Wege. Bei manchen dieser Methoden wird auch ein Vergleich zur OATS dargestellt. Die meisten der Berechnungen basieren auf der Methode der Berechnung der elektrischen und magnetischen Dipolmomente. Diese Berechnung wurde erstmals bei TEM-Zellen verwendet. Aufgrund des ähnlichen Aufbaus der GTEM-Zelle wurde sie dann entsprechend angepasst und findet nun auch hier Gebrauch.

<sup>51</sup> Vgl. Schwab/Kürner (2011), S. 233-234.

Es gibt sehr unterschiedliche Berechnungsansätze, um die abgestrahlte Gesamtleistung zu ermitteln, welche die Basis für einen möglichen Vergleich zur OATS bildet und deshalb möglichst genau sein sollte. Diese unterscheiden sich auch in der Anzahl der benötigten Positionen des EUTs. Hierbei variiert man von den 3 orthogonalen Achsen bis hin zu 15 verschiedenen Positionen mit diversen Achsen und Winkeln. Auf die unterschiedlichen Methoden soll hier jedoch nicht im Detail eingegangen werden. Im Zuge der Arbeit soll ausschließlich die in der IEC 61000-4-20 angewendete Methode von Wilson, die aus einer Drehung um die 3 orthogonalen Achsen besteht und mit der Freifeldmessung vergleichbar ist, betrachtet werden.<sup>52</sup>

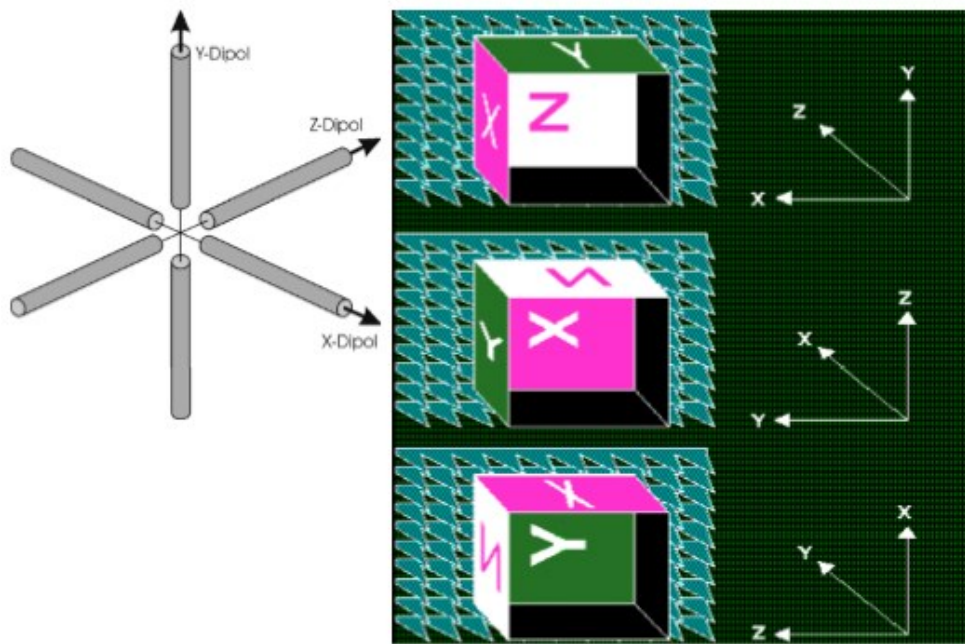


Abb. 24: Seiten, an denen in der normgerechten Methode gemessen werden muss, Quelle: Klink (2011), Online-Quelle [28.11.2017], S. 37.

Bei dieser Methode wird das EUT in den XYZ-Richtungen positioniert und mithilfe eines Spektrumanalysators vermessen. Aus diesen 3 Messungen kann die abgestrahlte Gesamtleistung ermittelt werden. Diese ist die Basis für einen Vergleich mit der Freifeldmessung. Um mit dem Verfahren arbeiten zu können, müssen jedoch gewisse Annahmen getroffen werden, von denen die Messgenauigkeit deutlich beeinflusst wird. Die erste Annahme ist, dass das Messobjekt elektrisch betrachtet sehr klein ist. Es muss kleiner sein als 0,1-mal die Wellenlänge. Die zweite Annahme ist, dass die Dipolmomente alle in Phase sind. Nur wenn die Punkte erfüllt sind, erhält man ein sehr genaues Ergebnis. Leider ist dies bei den stark variierenden Messobjekten oft schwierig.<sup>53</sup>

Im Folgenden ist noch einmal grafisch dargestellt, wie genau die Vergleichsrechnung in der Software der GTEM-Zelle der FH Campus 02 erfolgt. Links in der Abbildung sind die notwendigen Eingangsparameter dargestellt und rechts die einzelnen Berechnungsschritte, welche notwendig sind. Ebenfalls dargestellt sind die Ergebnisse, die während der Berechnung bzw. am Ende dieser resultieren.

<sup>52</sup> Vgl. Ngu (2009), S. 16-17.

<sup>53</sup> Vgl. Ngu (2009). S. 18-19.

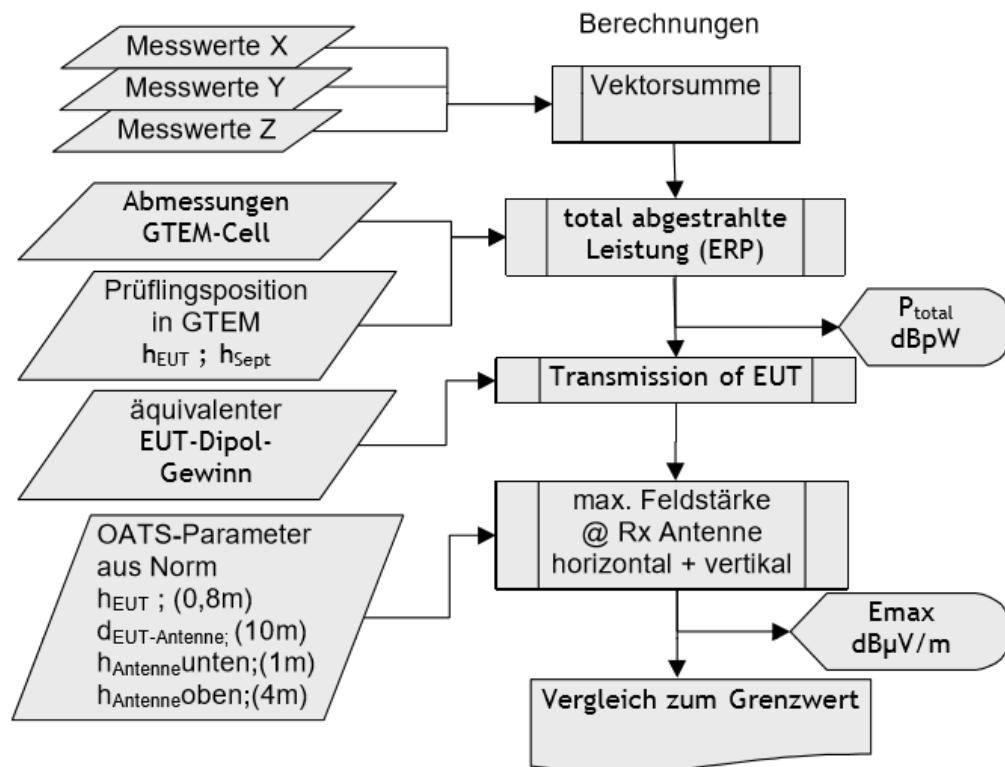


Abb. 25: Berechnung zum Vergleich mit der Freifeldmessung, Quelle: Klink (2011), Online-Quelle [28.11.2017], S. 38.

### 3.5.3 Einflüsse auf die Messung und Messunsicherheiten

Damit gezeigt werden kann, welche Einflüsse Unsicherheiten auf Messungen in der GTEM-Zelle haben, sollen Tests zu diesem Thema aus der Literatur betrachtet werden. In einer der verwendeten Literaturquellen werden Tests und die dazugehörigen Ergebnisse dazu beschrieben. Diese Quelle ist bereits aus einer anderen Quelle zitiert und somit nur ein Sekundärzitat. Das Original kann trotz Bestreben danach nicht beschaffen werden.

Um darzustellen, welchen Einfluss die genaue Position des EUTs auf die Wiederholbarkeit der Messung hat, vermisst man bei Emissionsmessungen einen batteriebetriebenen Prüfling mit definierter Störausstrahlung in der Zelle. Die Position des Prüflings wird hierbei immer um ein bestimmtes Maß und in eine definierte Richtung verändert und die Ergebnisse werden verglichen. Für den Test wird ein repräsentativer batteriebetriebener Prüfling mit einem Maß von  $48 \times 48 \times 12 \text{ cm}^3$  verwendet. Dieses EUT ist mit zwei CNEs (Comparison Noise Emitter) ausgestattet und kann somit für den Test Störungen im Bereich von 30 MHz bis 2 GHz sowie Störungen von 1 GHz bis 6 GHz erzeugen. Des Weiteren werden für den Test der Spektrumanalysator Marconi MI2383 und die GTEM-Zelle MEB GTEM 1750 verwendet. Diese hat eine Septumhöhe von 1,75 m, wobei die Messungen etwas weiter vorn bei einer Septumhöhe von 1,60 m mit dem EUT in der Mitte der Zelle stattfinden. Das stellt den Ausgangspunkt der Messung dar.<sup>54</sup>

Die X- und die Z-Achse werden bei dem Versuch insgesamt um 10 cm von der Ausgangsposition verschoben. Dies erfolgt in 1 cm Schritten. Bei der Y-Achse wird die Position des EUT in 12,5 cm Schritten und in Summe um 100 cm verändert. Das Messergebnis dieses Versuchs ist in Tab. 1 zusammengefasst.

<sup>54</sup> Vgl. Nothofer/Alexander/Bozek/Marvin/McCormack (2003), S. 18-20.

Darin ist ersichtlich, dass die Abweichungen bei höheren Frequenzen etwas höher sind als bei Frequenzen von 30 MHz bis 2 GHz. Im Schnitt sind die Abweichungen jedoch unter 5 dB, außer bei der Y-Achse. Hierbei sind die Schritte mit 12,5 cm auch wesentlich größer.<sup>55</sup>

Frequency	30 MHz to 2 GHz		1 GHz to 6 GHz	
	Average/dB	Max./dB	Average/dB	Max./dB
Axis X over 10 cm	2,78	4,72	3,20	5,90
Axis Y over 100 cm	4,56	8,76	5,46	11,00
Axis Z over 10 cm	3,12	4,46	3,19	3,63

Tab. 1: Zusammenfassung der Messergebnisse bei linearem Versatz des EUTs, Quelle: Nothofer/Alexander/Bozek/Marvin/McCormack (2003), S. 29.

Ein linearer Versatz ist natürlich nicht der einzige Faktor, der das Messergebnis beeinflussen bzw. beeinträchtigen kann. In der folgenden Tabelle sind mögliche Unsicherheitsfaktoren bezüglich der abgestrahlten Feldstärke und ihre Beeinflussungen auf das Messergebnis dargestellt. Diese Unsicherheitsfaktoren können teilweise mit einem geeigneten Manipulator beeinflusst bzw. gemindert werden und müssen teilweise als gegeben hingenommen werden. In der Tabelle werden standardisierte Unsicherheitsfaktoren, welche aus Versuchen ermittelt wurden, mit Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen multipliziert. Daraus ergibt sich dann ein Unsicherheitswert in dB.<sup>56</sup>

Source of Uncertainty	Symbol/ y	Value/ +/- dB	Distribution/ 1	Standard Uncertainty $u_i(y)$ / +/- dB
Receiver Calibration Uncertainty	R <sub>Cal</sub>	1,00	2	0,50
Receiver Linearity	R <sub>lin</sub>	0,10	$\sqrt{3}$	0,06
Receiver Indication Resolution	R <sub>i</sub>	0,05	$\sqrt{3}$	0,03
Receiver Frequency Error	R <sub>Freq</sub>	0,10	$\sqrt{3}$	0,06
Receiver Drift	R <sub>Drift</sub>	0,20	1	0,20
Mismatch (GTEM to Receiver)	M	0,25	$\sqrt{2}$	0,18
Cable loss uncertainty	C <sub>L</sub>	0,02	$\sqrt{3}$	0,01
Field Uniformity in Test Area	G <sub>Uni</sub>	3,00	2	1,50

<sup>55</sup> Vgl. Nothofer/Alexander/Bozek/Marvin/McCormack (2003), S. 28-29.

<sup>56</sup> Vgl. Nothofer/Alexander/Bozek/Marvin/McCormack (2003), S. 30.

GTEM Deviation from Flat Frequency Response	$G_{\text{Response}}$	2,00	2	1,00
Cross-Polar Coupling, Higher Order Modes	$G_{\text{Cross}}$	1,00	$\sqrt{3}$	0,58
Septum Height Variation Over EUT Location	$G_{\text{Height}}$	0,50	$\sqrt{3}$	0,29
GTEM Characteristic Impedance	$G_{Z0}$	0,18	$\sqrt{3}$	0,10
GTEM - OATS Correlation	$G_{\text{Corr}}$	1,00	1	1,00
EUT Repeatability	$R_{\text{EUT}}$	2,00	1	2,00

Tab. 2: Messunsicherheiten der abgestrahlten Feldstärke in GTEM-Zellen, Quelle: Nothofer/Alexander/Bozek/Marvin/McCormack (2003), S. 30 (leicht modifiziert).

Eine weitere wichtige Quelle, die zu Messfehlern führen kann, ist das Material des Manipulators in der GTEM-Zelle. Dass metallische Stoffe zu Messfehlern führen können, liegt auf der Hand. Es können allerdings auch andere Materialien, bei denen es weniger offensichtlich ist, verfälschte Messungen zur Folge haben. So kann beispielsweise Holz als Manipulatorwerkstoff bei Frequenzen um 700 MHz zu Störungen von einigen Dezibel führen. Auch unterschiedliche Kunststoffe können solche Messfehler verursachen. Der sicherste Werkstoff hinsichtlich Störungsarmut wäre Polystyrol in Form von Styropor, XPS oder Ähnlichem. Ein kompletter Prototyp aus einem derartigen Material ist jedoch nicht umsetzbar.<sup>57</sup>

### 3.5.4 Vor- und Nachteile der GTEM-Zelle

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die GTEM-Zelle alle Vorteile der TEM-Zelle in sich vereint und auch weitere Vorteile bietet. Heute können diese Zellen bis zu einem Bereich von einigen GHz eingesetzt werden.

Die Nachteile sind, dass GTEM-Zellen meist etwas ungenauere Ergebnisse liefern als Vollabsorberkammern bzw. Freifeldmessungen. Dies befindet sich jedoch im geringen Dezibelbereich und ist somit meist tragbar. Außerdem muss der Prüfling bei Messungen der Störaussendung gebrauchslageunabhängig sein, da er drehbar sein muss. Damit können beispielsweise keine Flüssigkeiten gemessen werden. Zum Drehen des EUTs wird zusätzlich ein Manipulator benötigt. Je nach Ausführung von diesem ist das Ergebnis dann mehr oder weniger einfach zu reproduzieren. Ebenfalls ist eine Korrelationssoftware notwendig, welche obige Berechnung ausführt.

Trotz einiger Nachteile, auf welche Rücksicht genommen werden muss, bietet die GTEM-Zelle eine hervorragende Alternative zu anderen Messmethoden. Gerade im Bereich von kleineren Labors mit begrenzten Möglichkeiten eignet sie sich hervorragend. Auch für Pre-Compliance-Tests ist sie bestens geeignet. Daher wird die GTEM-Zelle in den nächsten Jahren jedenfalls ein sicher bedeutender Teil der EMV-Messmethoden bleiben.

<sup>57</sup> Vgl. Nothofer/Alexander/Bozek/Marvin/McCormack (2003), S. 34.



## 4 EXISTIERENDE VARIANTEN VON MANIPULATOREN

Nun, da die notwendigen theoretischen Aspekte erläutert sind, werden in diesem Kapitel mögliche Varianten von Manipulatoren aufgezeigt und mithilfe eines Bewertungssystems evaluiert. Um dies zu ermöglichen, werden wichtige Eigenschaften für die Entwicklung festgelegt und nach den bisherigen Erkenntnissen bzw. nach Priorität seitens Auftraggeber gewichtet. Dadurch soll die bestmögliche Variante gefunden werden, welche anschließend mit in die Ideenfindung für eine spätere Entwicklung fließen soll.

### 4.1 Marktrecherche bereits existierender Systeme

Während der Literaturrecherche für dieses Werk wurden bereits immer wieder mögliche Ideen für Ausführungen von unterschiedlichen Manipulatoren gesammelt. Diese werden nun aufgezeigt und verglichen. Da es in diesem Bereich nur sehr wenige Eigenbauten gibt, werden unter anderem die Manipulator-Modelle von unterschiedlichen GTEM-Hersteller verglichen. Bei den meisten Herstellern stehen nur Bilder bzw. Schemen zur Verfügung, jedoch keine kompletten Pläne. Da diese Varianten aber ohnehin nur zur Ideenfindung und Orientierung für eine spätere Konstruktion dienen, stellt das kein Problem dar. Trotz ähnlicher Funktion sind die Aufbauten der Manipulatoren je nach Größe, Funktion und Hersteller durchaus unterschiedlich. Die folgenden Varianten bilden eine kurze Übersicht dieser Aufbauten.

#### 4.1.1 Modell MPH von Teseq

Die erste Ausführung eines Manipulators, die untersucht wird, wird von dem Unternehmen Teseq vertrieben und ist zur rein manuellen Bedienung gedacht. Mit diesem Modell kann das EUT in die drei orthogonalen Richtungen gedreht werden, die notwendig sind, um den Anforderungen aus der IEC/EN 61000-4-20 zu entsprechen. Wie in unterer Abbildung ersichtlich, ist das Hauptmaterial Holz. Dadurch wird gewährleistet, dass es nahezu keine hochfrequenten Reflexionen gibt. Die Montageplatte für den Prüfling ist quadratisch und weist Löcher auf, mithilfe welcher man diesen fixieren kann.

Trotz ihres sehr einfachen Aufbaus erfüllt die Variante grundsätzlich bereits die gegebenen Anforderungen. Welche Probleme sich im Detail mit einer möglichen Ansteuerung des Systems oder anderen ebenfalls wichtigen Punkten ergeben, wird anschließend im Unterkapitel 4.2 betrachtet. Der große Vorteil ist aber offensichtlich. Durch den einfachen, und dennoch durchdachten Aufbau, ist es möglich, mit einer Drehung alle 3 Positionen zu erreichen.

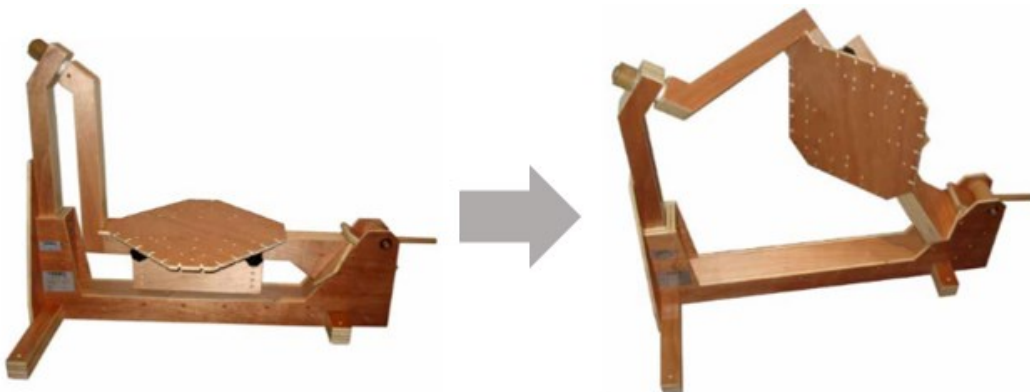


Abb. 26: Manueller MPH-Manipulator der Firma Teseq, Quelle: Teseq AG (2014), Online-Quelle [28.11.2017], S. 1 (leicht modifiziert).

### 4.1.2 Modell MPC von Teseq

Diese Ausführung, welche ebenfalls bei dem Unternehmen Teseq erworben werden kann, bietet, wie schon das vorherige Modell, die Möglichkeit der Drehung in die drei orthogonalen Richtungen. Damit ist auch diese Variante normkonform. Auch der grundsätzliche Aufbau, das Material und die Montageplatte sind bei dieser Variante ähnlich dem vorigen Modell. Der Hauptunterschied ist jedoch, dass dieses Modell die Möglichkeit bietet, unter der Zelle einen Motor anzubringen und diesen direkt mit dem Manipulator zu verbinden. Zu sehen ist die Verbindungsmöglichkeit in unterer Abbildung. Dadurch kann der Manipulator gesteuert werden und muss nicht mehr händisch gedreht werden. Dieses Prinzip bietet ebenfalls wieder den großen Vorteil, dass mit der Drehung alle normkonformen Achspositionen erreicht werden können.

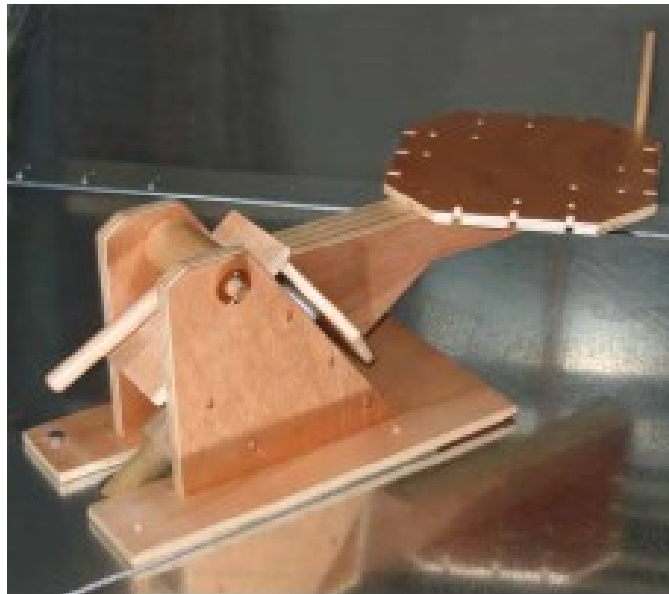


Abb. 27: Gesteuerter MPC-Manipulator der Firma Teseq, Quelle: Teseq AG (2014), Online-Quelle [28.11.2017], S. 2.

### 4.1.3 Manipulatorvariante von ETS-Lindgren

Die nächste Variante stammt vom Unternehmen ETS-Lindgren und ist seitens des Aufbaus sehr unterschiedlich zu den bisherigen Modellen. Dieses Modell ist grundsätzlich für den manuellen Betrieb ausgelegt, könnte aber durchaus modifiziert und automatisiert werden. Es besteht aus zwei drehbaren Plattformen und einem schwenkbaren Arm. Diese drei Vorrichtungen können mit Lock Pins fixiert werden. Dadurch ist die Position hier sehr genau gegeben. Es ist somit nicht nur möglich, die 3 orthogonalen Positionen anzufahren, sondern sehr viele mehr. Dadurch könnte man auch andere Messmethoden verwenden, bei denen man beispielsweise 9 oder 12 Positionen benötigt. Mit den anfahrbaren Positionen ist dieses Modell jedenfalls konform mit der IEC/EN 61000-4-20, was im konkreten Fall völlig ausreichend wäre. Die Montageplatte, die gleichzeitig einen der Drehteller bildet, ist bei diesem Modell rund und weist ebenfalls wieder Bohrungen zum Fixieren des Prüflings auf. Das Grundmaterial besteht hier, wie schon bei dem Modell davor, aus Holz. Die Lock Pins sind aus nichtmetallischem Material, um Reflexionen vorzubeugen.

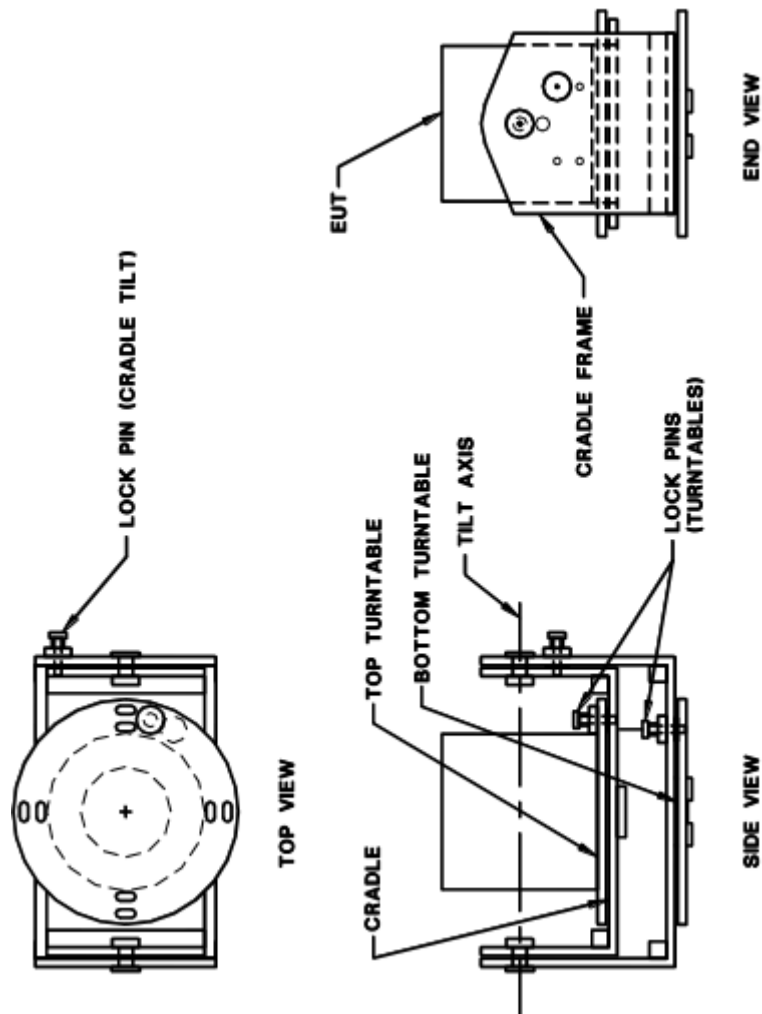


Abb. 28: Manueller Manipulator der Firma ETS-Lindgren, Quelle: ETS-Lindgren (2013), Online-Quelle [28.11.2017], S. 60.

#### 4.1.4 Variante Brainstorm

Diese Variante ist in einem Gespräch zwischen zwei Studierenden der FH Campus 02 in einem sehr frühen Stadium der Arbeit entstanden. Somit entwickelte sich die Idee aus einem ersten Brainstorming noch bevor die eigentliche Recherche zur Thesis begann.

Dieser Manipulator würde aus 2 Ringen bestehen, welche drehbar gelagert sind. Die Ringe wären vom Prinzip ähnlich den drehbaren Plattformen der vorherigen Variante. Nur ist bei diesem Modell das EUT im Zentrum der Ringe angebracht. Das bringt Vorteile, wie beispielsweise eine niedrige Bau- bzw. Arbeitshöhe und einen zentrierten Prüfling. Die Variante wäre für den händischen Betrieb angedacht und mit Sperr-Pins versehen. Dennoch wäre eine Erweiterung mit Servomotoren direkt am Manipulator möglich. Wenn man diese während der Messung gänzlich stromfrei schalten würde, wären auch die Beeinflussungen überschaubar. Das Material wäre hierbei noch fraglich, jedoch würden die meisten Komponenten wahrscheinlich aus Kunststoff bestehen. Das EUT würde ebenfalls, wie bei den bisherigen Varianten, mit einer Lochplatte fixiert werden.

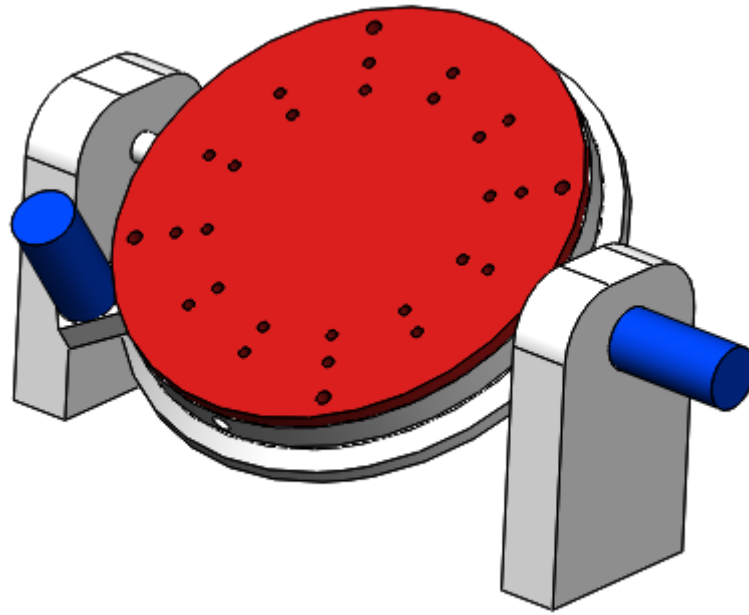


Abb. 29: Erster eigener Entwurf aus einem Brainstorming, Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Variante befindet sich noch in einer sehr rohen Phase und ist teils noch nicht fertig durchdacht. Sie sollte dennoch mit in die Betrachtung möglicher Lösungen einbezogen werden, da sie ein beträchtliches Potential aufweist.

Ein Nachteil dieser Variante wäre jedoch, dass trotz einer möglichen Dreh- und Schwenkbewegung die genauen Positionen laut Norm nicht angefahren werden könnten.

#### **4.1.5 Alternative Varianten**

Ergänzend gibt es natürlich noch sehr viele weitere Varianten von Manipulatoren, die an dieser Stelle jedoch nicht alle erwähnt werden können.

Weitere Alternativen, die nur kurz ergänzend angesprochen werden sollen, sind beispielsweise pneumatisch angetriebene Manipulatoren. Diese bieten zwar die Vorteile, dass sie sehr viel Gewicht tragen und somit größere Prüflinge vermessen können und dass sie häufig bereits mit einer Steuerung ausgestattet sind, dennoch überwiegen für die benötigte Anwendung ganz klar die Nachteile. So sind die Systeme durch die pneumatische Ansteuerung räumlich größer auszulegen. Außerdem ist es sehr schwierig, solche Anwendungen nahezu metallfrei umzusetzen und es wird zur Funktion natürlich ein Druckluftnetz benötigt. Aus diesen Gründen kommt eine derartige Anordnung grundsätzlich nicht für die Entwicklung in Frage. Daher werden solche Systeme nicht näher betrachtet.

Eine weitere interessante Variante, welche bei der Recherche für den Theorieteil aufgefallen ist, geht aus einer Dissertation hervor. In dieser hat der Autor versucht, die Benefits unterschiedlicher Systeme in sich zu vereinen und so einen Manipulator mit vielen Vorteilen und sehr vielen anfahrbaren Positionen zu schaffen. Das Modell würde sich grundsätzlich auch für die Anwendung in dieser Arbeit anbieten, jedoch schießt das vorgeschlagene System mit seinen vielen Möglichkeiten und dessen Komplexität definitiv über das Ziel hinaus. Da in dieser Masterarbeit der Platzbedarf aufgrund der GTEM-Größe eher gering ist und

die Funktionen dieses Modells die benötigten weit übersteigen würden, wird das besagte Modell nicht weiter behandelt.

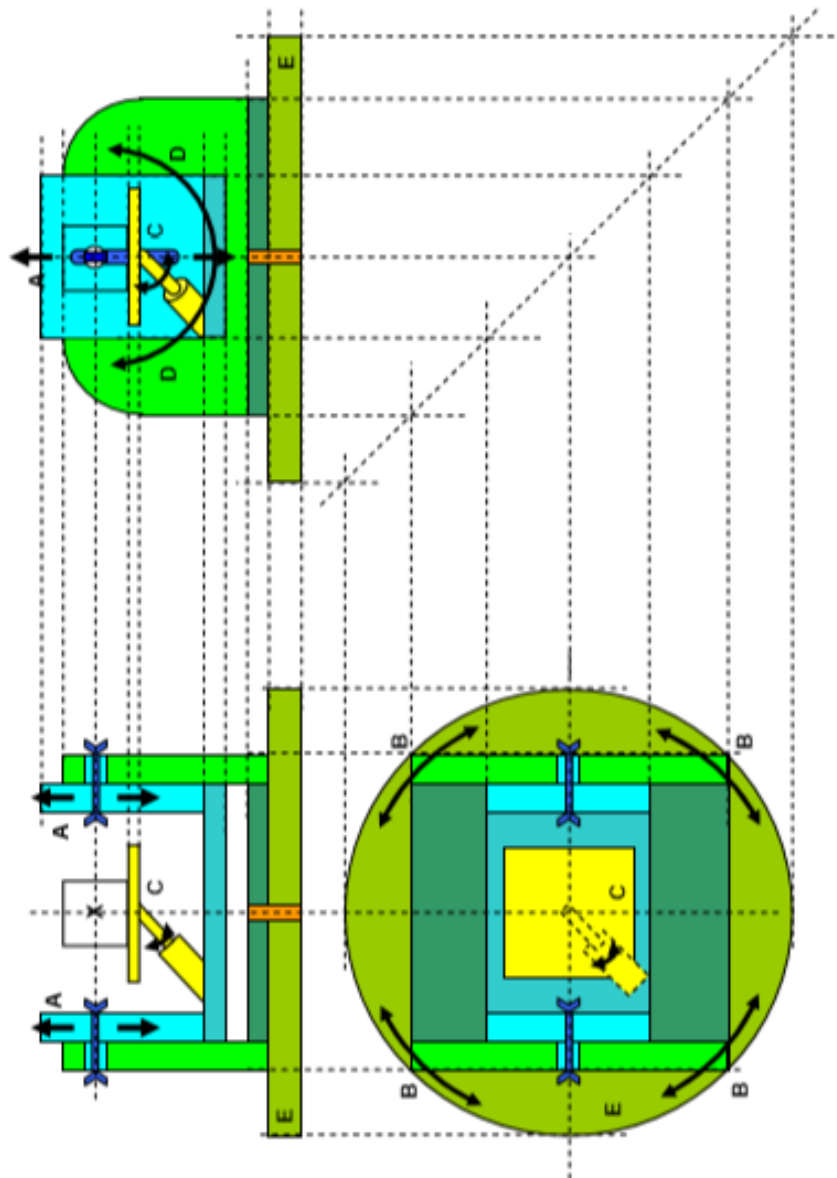


Abb. 30: XYZ-Manipulator-Modell von Xavier Toh Ik Ngu, Beng, Quelle: Ngu (2009), S. 252.

## 4.2 Entwicklungsrelevante Aspekte

Da gegenwärtig vier mögliche Ideen vorgestellt sind, auf die aufgebaut werden kann, soll dargestellt werden, welche Aspekte für die Umsetzung relevant sind. Diese sollen dann in eine Bewertung einfließen, um so die optimale Variante aufzuzeigen. Da nicht alle Aspekte die gleiche Priorität haben, werden sie mit einem Punktesystem gewichtet. Auf dieses Gewichtungssystem wird im Unterkapitel „Evaluierung der Manipulatorvarianten“ noch im Detail eingegangen. Im Folgenden ist bei den jeweiligen Beschreibungen der Aspekte die vergebene Gewichtungszahl in Klammer angegeben (z.B. „20“).

Der erste Punkt, welcher zuvor bereits einige Male erwähnt wurde, ist das Material, aus dem das Manipulator-System besteht. Das Material kann einen wesentlichen negativen Einfluss auf spätere Messungen haben, da es vor allem im hochfrequenten Bereich zu Reflexionen führen kann. Durch die

Berechnung der abgestrahlten Gesamtleistung können Reflexionen hier schwerwiegende Folgen auf das Ergebnis haben. Dieses kann sowohl zu hoch ausfallen, wenn die Reflexionen mitgemessen werden, oder auch zu tief, wenn es durch sie zu Frequenzauslöschungen kommt. Wie intensiv die Auswirkungen des Manipulators tatsächlich sind, kann erst bei Kontrollmessungen mit einem Prototyp festgestellt werden. Dennoch ist es von Vorteil, proaktiv darauf zu achten, keine bzw. nur wenig reflektierende und absorbierende Materialien zu verbauen. Das verwendete Material wird im späteren Bewertungssystem eine höhere Gewichtung (40) besitzen. Dieser Wert wird gewählt, da die Manipulatoren ohnehin schon sehr hochwertig in Bezug auf das Material sind. Dennoch ist jede Vermeidung von schadbringenden Materialien wichtig.

Der nächste Punkt, welcher bewertet werden soll, ist die Bedienung des Manipulators. Hier sind im Konkreten zwei Fälle zu unterscheiden: Zum einen die Bedienbarkeit bei einem manuellen System und zum anderen die Bedienung bei einem automatisierten System. In beiden Fällen muss die Bedienung möglichst einfach sein und darf in keiner Weise zu massiven Mehraufwänden bei Messungen führen. Das Ziel der Entwicklung ist im Wesentlichen auch eine Arbeitserleichterung. Damit ist die Bedienung ein sehr wichtiger Punkt und erhält damit auch eine sehr hohe Priorität (50). Unter Bedienung versteht sich sowohl das Montieren des Prüflings als auch das Schwenken in die gewünschten Richtungen und das Entfernen des EUTs. Die Montage/Demontage des Manipulators selbst in der GTEM-Zelle fällt nicht in diesen Bewertungspunkt. Diese ist im Bewertungspunkt der Komplexität des Systems inbegriffen.

Die Komplexität soll so niedrig als möglich gehalten werden. Der Gedanke dahinter ist, dass ein unnötig kompliziertes System im Falle eines Problems die Fehlersuche erschwert. Die Montage/Demontage würde dadurch ebenfalls schwieriger werden. Es kann durchaus vorkommen, dass auch größere Prüflinge vermessen werden sollen, weshalb mit einem häufigeren Aus- und Einbau zu rechnen ist. Das Vermessen größerer Prüflinge ist per se zwar keine Anforderung an den Manipulator, sollte jedoch über die Montage/Demontage durchaus mitbetrachtet werden. Da bei dieser Entwicklung, ebenso wie bei anderen, die Regel eingehalten werden sollte, nur so komplex zu arbeiten, wie es notwendig ist, erhält dieser Bewertungspunkt mittlere bis niedrige Priorität (20).

Ein weiterer Aspekt, der explizit bewertet wird, ist die Erweiterbarkeit. Grundsätzlich soll das System manuell bedienbar sein, aber eine Erweiterung auf Automatikbetrieb soll bestmöglich vorbereitet werden. Daher muss von Beginn an darauf geachtet werden, dass im Falle einer Erweiterung der Aufwand dafür nicht zu groß ist. Dies ist von hoher Wichtigkeit und erhält somit auch eine höhere Gewichtungszahl (40) in der Bewertung.

Auch betrachtet wird die Höhe, auf der sich das EUT dann befindet. Grundsätzlich wäre es natürlich wünschenswert, dass das möglichst nah am Zellenboden ist, da hier die Messung am genauesten erfolgt. Da dies jedoch aufgrund der Drehung des Prüflings schwierig ist, sollte zumindest darauf geachtet werden, dass der Aufbau bzw. das sich drehende EUT zumindest im ersten Drittel der Zelle bleibt. Der Grund dafür ist die Feldausbreitung in der Zelle, wie in Abb. 23 ersichtlich. Diese ist im ersten Drittel optimal für eine Messung verwertbar. Der Gesichtspunkt erhält höhere Priorität (40), da er mitunter Einfluss auf die Genauigkeit des Messergebnisses hat.

Der generelle Platzbedarf des Manipulators in der Zelle wird ebenfalls mitbewertet. Wenn der Manipulator zu groß ist, wird es schwierig, in der Zelle zu hantieren. Was ebenfalls bedacht werden muss, ist natürlich,

dass der Manipulator in die Zelle gebracht werden muss. Das erfolgt über eine der Türen. Vorzuziehen ist hierbei die Seitentür. Somit gibt es Grenzen bezüglich der Gesamtgröße des Manipulators. Dieser Faktor ist jedoch, abgesehen von der Obergrenze an die Gesamtgröße, nicht von hoher Bedeutung (10) für die Konstruktion bzw. die Umsetzung.

Sehr wichtig für die Genauigkeit der Messung ist ebenfalls die Position. Damit ist gemeint, wie sich das EUT dreht. Optimal wäre hierbei, wenn es sich um die eigene Achse dreht, da dadurch die gesamte Messung im gleichen Feldbereich erfolgt. Außerdem wäre es ebenfalls von Vorteil, wenn diese gemeinsame Achse relativ weit unten und hinten in der Zelle wäre, um alle Eigenschaften, die diese bietet, optimal nutzen zu können. Bei einer Drehung um die eigene Achse wäre der ohnehin nur begrenzte Platz in einer GTEM-Messzelle auch bestmöglich genutzt und es kann ebenfalls viel schwieriger zu Kollisionen mit den Zellenwänden kommen. Das wäre zwar sehr wünschenswert, ist jedoch nicht zwingend notwendig. Daher erhält dieser Punkt eine mittlere Bedeutung (30).

Der letzte Punkt, der in die Evaluierung mit einfließt, ist die Genauigkeit bzw. die Wiederholgenauigkeit. Diese ist von großem Belang und somit hoch beurteilt (50). Unter Genauigkeit fällt beispielsweise das Thema des Befestigens des Prüflings. Dies sollte wiederholbar sein. Das heißt, bei mehreren Messungen sollte es möglich sein, das EUT erneut in derselben Position zu fixieren. Außerdem darf es keine Möglichkeit eines Verrutschens des EUTs geben. Das Anbringen des Manipulators in der GTEM-Zelle sollte ebenfalls wiederholbar sein.

### **4.3 Evaluierung der Manipulatorvarianten**

Die vier Varianten, welche oben erläutert sind, sollen nun mithilfe einer Bewertungsmatrix evaluiert werden, um festzustellen, welche die vielversprechendste Variante ist und als Basis für die eigene Konstruktion dienen soll.

Das Bewertungssystem selbst funktioniert über eine Aufschlüsselung, welche aus einer Kombination aus Gewichtung und Bewertung besteht. In der linken Spalte der Bewertungstabelle steht das jeweilige Kriterium, das bewertet wird. In der darauf folgenden Spalte wird dann die zuvor festgelegte und zugehörige Gewichtungszahl eingetragen. Diese zeigt den Wert, den das Kriterium in der späteren Umsetzung aufweist. In den anschließenden Spalten werden die unterschiedlichen Varianten eingetragen und bewertet. Das erfolgt über ein Notensystem von 1 bis 5. Dieses Notensystem ist angelehnt an das österreichische Schulsystem, wodurch eine 1 den besten Wert darstellt. Die jeweiligen Noten werden dann mit der Gewichtungszahl multipliziert und aufsummiert. Am Ende wird die Gesamtzahl durch die Summe der Gewichtungszahlen dividiert. Dadurch ergibt sich dann eine Gesamtnote für jede Variante.

	<b>Gewichtung</b>	<b>Modell MPH</b>	<b>Modell MPC</b>	<b>Modell ETS-Lindgren</b>	<b>Modell Brainstorm</b>
<b>Material</b>	40	1	1	3	4
<b>Bedienung</b>	50	2	3	2	2
<b>Komplexität</b>	20	2	2	3	3
<b>Erweiterbarkeit</b>	40	4	1	1	1
<b>Höhe</b>	40	4	2	2	2
<b>Gesamtplatzbedarf</b>	10	3	3	2	1
<b>Position des EUTs</b>	30	5	4	2	1
<b>Wiederholgenauigkeit</b>	50	3	2	1	1
	280	830	600	530	530
<b>Gesamtwertung</b>		3,0	2,1	1,9	1,9

Tab. 3: Auswertung der Manipulatormodelle, Quelle: Eigene Darstellung.

Aus der Evaluierung geht hervor, dass die Varianten 3 und 4 klar im Vorteil sind. Das Modell MPH ist mit deutlichen Nachteilen in wichtigen Bereichen wie Erweiterbarkeit, Höhe, Position und Wiederholgenauigkeit behaftet und damit eindeutig aus dem Rennen. Das Modell MPC schneidet in den meisten dieser Bereiche deutlich besser ab. Dennoch kommt es nur auf eine Gesamtnote von 2,1 und ist damit ebenfalls ausgeschieden.

Interessant bleiben die letzten beiden Varianten. Die Variante des Unternehmens ETS-Lindgren ist im Bereich des Materials der Variante Brainstorm voraus. Der Grund dafür lässt sich darauf zurückführen, dass im Falle einer Erweiterung hierbei der Motor des Drehtellers außerhalb der Zelle angebracht werden kann. Dies ist bei der Variante Brainstorm in ihrer jetzigen Form nicht der Fall. Ansonsten sind sich die Varianten in ihrer Bewertung sehr ähnlich. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass sich auch ihr Arbeitsprinzip stark ähnelt. Einzig bei den Punkten Gesamtplatzbedarf und Position ist das letzte Konzept etwas von Vorteil, da es in seiner Bauform geringfügig kleiner gehalten werden kann und das EUT sehr nah an der Drehachse positioniert sein kann. Dennoch können in Summe beide Varianten als gleichwertig betrachtet werden und beide könnten in einer möglichen Umsetzung zum Einsatz kommen.

Nach Rücksprache mit dem Betreuer wird beschlossen, zu versuchen, die Schwachstelle der beiden Varianten zu beseitigen und die Variante zu wählen, mit der das besser umsetzbar ist. Die Schwachstelle beider Modelle liegt klar im Bereich des Materials. Diese haben hier auch die schlechtesten Noten. Bei einer Erweiterung bzw. Elektrifizierung befinden sich bei beiden Modellen Motoren in der Zelle. Diese können das Messergebnis verfälschen. Darum soll nun ein Modell entwickelt werden, bei dem sich beide Motoren außerhalb der Zelle befinden. Dann würden die Modelle in diesem Bereich die Note 1 erhalten und somit deutlich bessere Werte erzielen. Wie das umgesetzt werden kann, soll im Folgekapitel aufgezeigt werden.



Die nicht normgerechte Drehung der Variante Brainstorm stellt laut Projektauftraggeber kein Problem dar. Die Abweichungen, die dadurch verursacht werden würden, sind wahrscheinlich nur sehr gering. Dies könnte dann in den Kontrollmessungen überprüft werden. Eine Umsetzung mit der Variante Brainstorm wäre grundsätzlich mit geringerem Aufwand umsetzbar, da diese Ausführung eine Achse weniger aufweist.

## 5 KONSTRUKTION EINES MANIPULATORS

In diesem Kapitel findet die Konstruktion des Manipulators statt. Sie bildet einen Hauptteil in der Entwicklung des Prototyps. Bisherige Erkenntnisse aus den Vorkapiteln sollen nun genutzt und in die Konstruktion miteinbezogen werden.

Für die Konstruktion eines Prototyps wird die Software SolidWorks verwendet. Dieses 3D-CAD-Programm stammt aus dem Haus Dassault Systèmes und ist im Gegensatz zu CATIA eher für kleinere und mittlere Unternehmen im Bereich Maschinenbau gedacht. Grund für die Auswahl dieses Tools ist, dass es am Markt etabliert ist und ein sehr mächtiges Werkzeug im Konstruktionsbereich darstellt. Zudem ist seitens des Autors ein Basiswissen aus diversen Vorlesungen des Studiums vorhanden. Dadurch kann beim Erlernen des Umganges mit der Software Zeit gespart werden und mehr Zeit in die Umsetzung der Konstruktion fließen. Ein weiterer Vorteil ist, dass es unzählige Bücher, Foren, Online-Kurse, Videos etc. gibt, bei denen man sich nützliche Tipps holen kann. Die Community ist in diesem Bereich sehr präsent, da auch sehr viele Bastler mit dem Tool arbeiten.

Nach Absprache mit dem Betreuer der Arbeit wird die Größe der Grundfläche des Manipulators vorerst auf die Größe der unteren Türe der GTEM-Zelle beschränkt. Dadurch kann der Manipulator auf dieser Grundplatte montiert werden und es kann, falls der erste Prototyp nicht funktioniert, der Deckel getauscht werden, ohne dass die Zelle Schaden davon trägt. Dadurch ergibt sich eine nutzbare Grundflächengröße von ca. 90 x 90 mm<sup>2</sup>. Die maximale Prüflings- bzw. Platinengröße könnte dadurch eingeschränkt werden. Auf diesen Kompromiss wird jedoch eingegangen, da die Anforderung, nur die Bodenplatte der Zelle zu modifizieren, eine höhere Priorität aufweist.

Die Konstruktion wird entsprechend umgesetzt, dass eine manuelle Bedienung vorgenommen werden kann, jedoch nahezu kein konstruktiver Zusatzaufwand notwendig ist, wenn man eine Automatisierung des Manipulators vornimmt. Aus diesem Grund werden auch gleich Antriebshalterungen etc. mitkonstruiert. Für den Fall, dass sie bei einer Erweiterung dann leicht modifiziert werden müssen (z.B. Bohrlöcher oder Ähnliches) hält sich der Aufwand diesbezüglich sehr in Grenzen.

Die im Vorkapitel besprochene Anforderung eines nach außen Führens von notwendigen Motoren wird ebenfalls berücksichtigt und konstruktiv umgesetzt.

Des Weiteren soll der Prototyp so konstruiert werden, dass er, abgesehen von im Handel erhältlichen Normteilen, fast gänzlich mit einem 3D-Drucker bzw. einem Lasercutter gefertigt werden kann. Bei der 3D-Druck-Technik stehen an der FH Campus 02 unterschiedliche Fertigungsverfahren zur Verfügung. So kann diese auf das FDM-Verfahren (Fused Deposition Modeling), das Binder Jetting sowie auf einen Stereolithografie-Drucker (STL-Drucker) zurückgreifen.

Ein FDM-Drucker baut das Modell durch schichtweises Aufschmelzen von Kunststoffen oder Formwachsen auf. Beim Binder Jetting wird pulverförmiges Material mithilfe eines Binders schichtweise gehärtet und bei der Stereolithografie wird ein lichtsensibilisierender Kunststoff mithilfe eines Lasers ausgehärtet. Dieser Prozess wird ebenfalls schichtweise wiederholt und so ein Modell aufgebaut.

Im Laufe der Konstruktion bzw. der Entwicklung wird sich zeigen, welche Technologie hierfür am besten geeignet ist. Erste Tendenzen neigen in Richtung der Stereolithografie, da mit diesem Verfahren sehr

genau gearbeitet werden kann. In diesem Bereich werden zusätzlich intensiv das Wissen und die Erfahrung der Mitarbeiter an der FH genutzt.

Bei der Konstruktion wird so vorgegangen, dass zuerst Konzepte für einzelne Funktionen des Manipulators konstruiert werden und erst dann eine detaillierte Konstruktion erfolgt. Diese Einzelkonzepte sind teilweise voneinander abhängig. Auch dies muss berücksichtigt werden. So wird zu Beginn ein mögliches elektrisch angetriebenes Konzept erstellt. Das muss als erster Schritt erfolgen, da das maßgebliche Einflüsse auf das manuelle Konzept und auf die Rahmenkonstruktion des Systems hat. Nachdem dieses Grobkonzept definiert ist, erfolgt eine Festlegung des Konzeptes für eine manuelle Bedienung des Manipulators. Danach wird dann die Funktionsweise der Montageplatte erarbeitet. Diese ist im Großen und Ganzen nur sehr bedingt von den anderen Konzepten abhängig.

Sind diese groben Aspekte festgelegt, folgt die originale Konstruktion des Systems. Hier werden die Konzepte zusammengeführt, Details betrachtet und angepasst und eine entsprechende Rahmenkonstruktion definiert.

### **5.1 Konstruktionskonzept der automatisierten Bewegungen**

Bei ersten Konstruktionsversuchen zeigt sich schnell, dass die Anforderung des nach außen Führens beider Motoren ein Detail ist, welches zum einen sehr komplex ist und zum anderen vorab stark unterschätzt wurde. Das Hauptproblem, welches hierbei auftritt, ist, dass die Kraft durch Riemen, Getriebe, Wellen, Ketten oder ähnlichem nach außen übertragen werden muss. Durch ein Drehen oder Schwenken in eine Richtung verliert man jedoch die physikalische Verbindung zur jeweils anderen Bewegungsrichtung. Somit ist immer nur eine der Bewegungen ausführbar. Das heißt beispielsweise, wenn für das Schwenken ein Riemen verwendet wird, kann sich dieser bei einer Drehung dann nicht mitdrehen. Daher muss ein Konzept gefunden werden, mit dem dies nicht geschieht bzw. eine Möglichkeit, dies zu kompensieren und die Verbindung möglichst genau wiederherzustellen. Des Weiteren muss auch die Kraftübertragung nach außen durch die Bodenplatte erfolgen. Diese Tatsache wirkt sich noch einmal erschwerend auf die Größenauslegung aus.

Da das Antriebskonzept einen wesentlichen Einfluss auf den weiteren Aufbau des Manipulators hat, muss hierfür als Erstes ein Konzept gefunden werden. Nach anfänglichen Konstruktionsversuchen wird endgültig entschieden, auf die Variante Brainstorm aufzubauen und nur einige kleinere Ansätze aus der Variante ETS zu übernehmen. Der Grund für diese Entscheidung ist, dass es bei der Variante Brainstorm deutlich mehr kreative Ideen zum Umsetzen der Drehbewegungen seitens des Autors gibt. Außerdem gibt es seitens des Autors und des Betreuers ein reges Interesse, ob ein nicht normkonformes Drehen einen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Es fällt auch bereits jetzt die Entscheidung, die Schwenkbewegung mit einem Riemtrieb umzusetzen. Die Details hierzu müssen zwar noch evaluiert werden, aber für diese Aufgabe eignet sich ein Riemtrieb hervorragend, da dieser eine niedrige Komplexität aufweist, einfach aus nichtmetallischen Materialien hergestellt werden kann und zudem in entsprechender Umsetzung sehr genau ist.

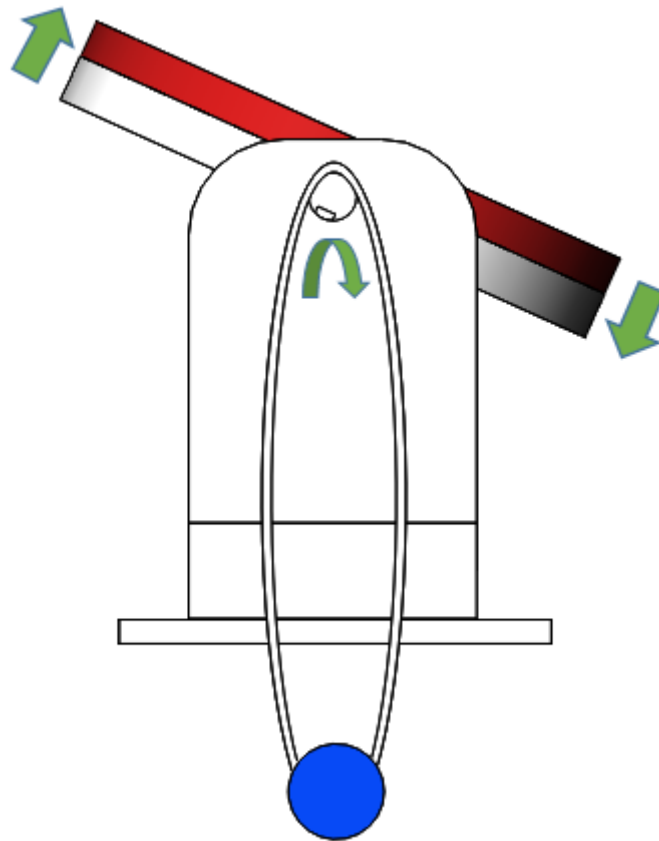


Abb. 31: Konzept für die Schwenkbewegung mit einem Riementrieb, Quelle: Eigene Darstellung.

Mit dieser Entscheidung kann nun ein dazu passendes Konzept für die Drehbewegung erstellt werden. Hierbei liegt die beste Umsetzungsmöglichkeit wohl darin, dass man diese mithilfe eines Zahnradgetriebes realisiert. Mit zwei ineinander greifenden Zahnradern könnte man deren Achsen sowohl parallel als auch in einem definierten Schnittwinkel ausführen und man hätte dadurch sehr viele Möglichkeiten. Mit 2 Zahnradern allein ist es jedoch noch nicht möglich, die Kraft nach außen – also aus der GTEM-Zelle – zu übertragen. Hier könnte ebenfalls wieder ein Riementrieb als Ergänzung verwendet werden. Dieses Konzept trägt grundsätzlich Potential in sich, jedoch gibt es hierbei noch das große Problem mit dem Übergang von Schwenken auf Drehen. Hierbei kann es, je nach Zahnstellung, zu Kollisionen kommen, was zu Verschiebungen oder gar Zerstörungen von Komponenten des Systems führen kann. Dies muss daher jedenfalls verhindert bzw. berücksichtigt werden.

Um diese Bedingungen zu gewährleisten, werden mehrere Varianten angedacht und simple Konzepte dazu erstellt:

Es wäre beispielsweise möglich, die Drehung mithilfe einer Zahnstange sicherzustellen. Diese müsste dann mittels eines Antriebes hin und her verschoben werden und könnte somit im Eingriff mit dem am Drehteller befindlichen Zahnrad eine Drehbewegung erzeugen. Der Motor, welcher die Zahnstange verschiebt, könnte „freigeschaltet“ werden. Damit ist gemeint, dass dieser während des Schwenkens sein Moment nicht halten soll, sondern nahezu widerstandslos bewegt werden kann. Damit könnten sich die Zähne der Zahnrad/Zahnstangen-Paarung einfach ineinander schieben, wenn sie nach dem Schwenken nicht mehr exakt passen sollten. Eine Zahnstange, welche eine Drehung um zumindest  $90^\circ$  ermöglichen soll, würde jedoch bereits eine beträchtliche Länge aufweisen. Soll die  $90^\circ$ -Drehung dann in beide Richtungen möglich

sein, verdoppelt sich diese Länge nochmals. Da das zu inakzeptablen Bedingungen führt, wird die Machbarkeit nicht weiter untersucht und das Konzept nicht weiter behandelt.

Da ein Zahnstangengetriebe nicht in Frage kommt, muss jedenfalls ein Zahnradpaar verwendet werden. Mit einem Zahnradpaar, bei dem das treibende Rad an einer fixen Position gelagert ist, hat man jedoch den Nachteil, dass beim Schwenken keine  $360^\circ$  mehr möglich sind. Dies ist aber keine Anforderung und somit definitiv tragbar. Hierbei gibt es jedoch ebenfalls unterschiedlichste Ansätze. Einer davon ist ein Hypoidgetriebe. Durch den Achsversatz, den dieses ermöglicht, könnte neben dem Riemen, der für die Schwenkbewegung verantwortlich ist, ein weiterer Riemen positioniert werden, der die Drehbewegung ermöglicht.

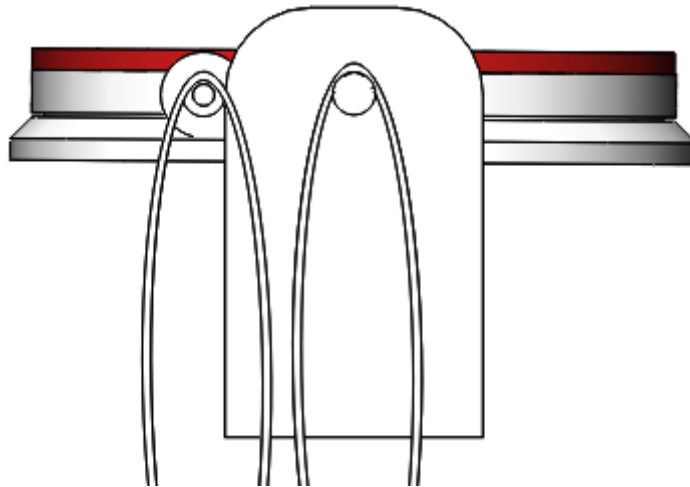


Abb. 32: Dreh-Schwenkkonzept mit einem Hypoidgetriebe, Quelle: Eigene Darstellung.

Dies bringt den Vorteil, dass man beide Motoren nebeneinander und außerhalb der Zelle positionieren könnte. Die Ausschnitte für die Riemen könnten ebenfalls sehr nahe aneinander liegen. Ein Hypoidgetriebe ist jedoch sehr komplex in seinem Zusammenspiel und es ist fraglich, ob beim häufigen Einschwenken ein fehlerfreies Ineinandergreifen der Zähne sichergestellt werden kann. Daher wird auch dieses Konzept ebenfalls nicht weiter verfolgt.

Ein weitaus simpleres, und dennoch genauso vielversprechendes Konzept ist eine Ausführung mit einem Kegelrad. Hierbei könnten sich die Achsen der Zahnräder in der Mitte des Manipulators schneiden und diese könnten in einem Schnittwinkel von  $90^\circ$  zueinander versetzt sein. Durch zuvor erwähntes „Freischalten“ des Antriebsmotors für die Drehung könnte beim Einschwenken eine Kollision vermieden werden. Auch den Vorteil der nahe zusammenliegenden Ausschnitte der Bodenplatte, den das Hypoidgetriebe bietet, ist hier gegeben, indem man den Riemen leicht schräg positioniert.

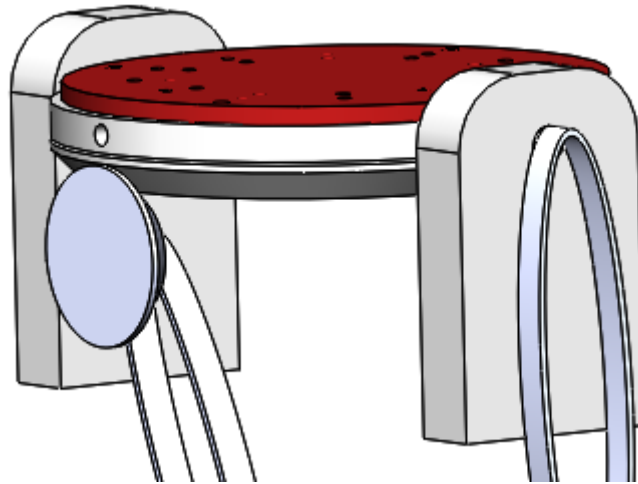


Abb. 33: Dreh-Schwenkkonzept mit einem Kegelradgetriebe, Quelle: Eigene Darstellung.

Dieses Konzept wirkt auf den ersten Blick sehr vielversprechend, daher soll es für den Prototyp herangezogen werden. Hierzu müssen für die finale Konstruktion noch einige Auslegungen und Berechnungen durchgeführt werden. Dieser Schritt erfolgt in Kapitel 5.4 bei einem Zusammenführen der Konzepte.

## 5.2 Konstruktionskonzept der manuellen Bewegungen

Nachdem das Konzept für einen automatisierten Betrieb gewählt wurde, kann nun nach einer dazu passenden Möglichkeit gesucht werden, wie man den Manipulator manuell bedienen kann. Hierzu soll eine Umsetzung erfolgen, die an die Manipulatorvariante von ETS angelehnt ist. In dieser erfolgt die Fixierung über ein Stecksystem, das genau an den richtigen Positionen ( $90^\circ$ ) eingeklickt werden kann. Dieses Konzept soll übernommen und noch weiter vereinfacht werden. Der Manipulator soll in den definierten Positionen automatisch einrasten und zudem einfach in die nächste Position gebracht werden können. Dazu eignen sich gefederte Rastelemente hervorragend. Das Problem bei diesen Normteilen ist nur, dass das Gehäuse und die Kugel zwar aus Kunststoff erworben werden können, die Feder im Inneren jedoch immer aus Stahl gefertigt ist. Da metallisches Material für den Manipulator aber tunlichst vermieden werden soll, muss hier eine Alternative gefunden werden.

Nach umfangreichen Internetrecherchen konnten bei der Firma Igus Tellerfedern aus Kunststoff gefunden werden. Diese Polysorb-Federn sind in axialer Richtung tellerförmig gestülpt und sind für geringe Federwege und -kräfte sehr gut geeignet.

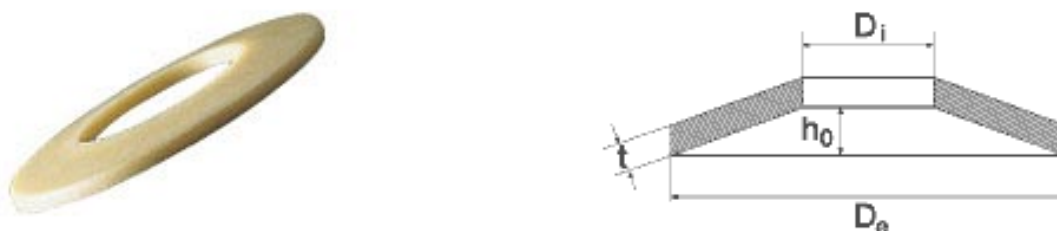


Abb. 34: Kunststofftellerfedern der Firma Igus, Quelle: Igus (2017), Online-Quelle [28.11.2017].

Daher gibt es nun die Überlegung, gekaufte genormte Rastelemente selbst so zu modifizieren, dass sie für die Konstruktion verwendbar sind. Hierzu müssen jedoch die Größe und weitere Faktoren zusammenpassen.

Für dieses Vorhaben sollen Rastelemente des Unternehmens Elesa+Ganter Austria GmbH verwendet werden. Hier gibt es geeignete Modelle mit Kunststoffgehäuse und -kugel. Die Kugel, die in einem Gehäuse verbaut ist, wird von der Feder im Inneren des Gehäuses auf Spannung gehalten. Somit rastet diese, wenn sie auf eine entsprechende Einkerbung trifft, ein. Das Gehäuse ist in verschiedenen Varianten erhältlich. So kann es beispielsweise verklebt, gepresst oder verschraubt werden. Eine Abbildung der Elemente ist im Folgenden ersichtlich.



Abb. 35: Geeignete Rastelemente des Unternehmens Elesa+Ganter Austria GmbH, Quelle: Elesa+Ganter Austria GmbH (2017), Online-Quelle [28.11.2017].

Solche Elemente sollen aufgeschnitten und ihre Stahlfeder durch eine Kunststofffeder ersetzt werden. Anschließend sollen sie in einer Aufnahmebohrung verklebt werden.

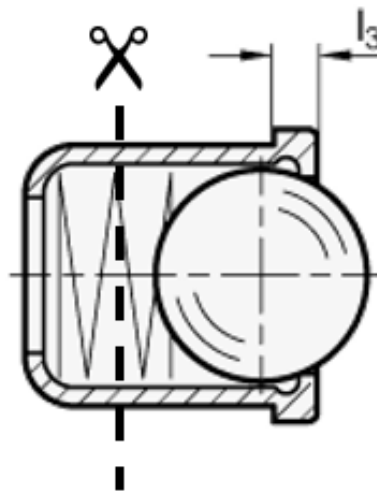


Abb. 36: Schnittbild des Rastelements, Quelle: Elesa+Ganter Austria GmbH (2017), Online-Quelle [28.11.2017] (leicht modifiziert).

Da das Teil nach einem Aufschneiden wahrscheinlich nicht mehr verschließbar ist, soll dies beim Konstruieren berücksichtigt werden. Daher soll die Aufnahmebohrung für das Rastelement nur so tief sein, dass das Ende der Bohrung als hinterer Anschlag für die Tellerfeder dienen kann. Somit sollte die Funktion wieder gewährleistet sein. Ob eine Feder ausreichend ist, oder mehrere dieser Federn aufgestapelt werden müssen, soll empirisch am Prototyp ermittelt werden.

Konstruktiv sollen diese Elemente dann so eingebunden werden, dass beim Drehen jedes Mal, wenn genau  $90^\circ$  erreicht sind, die Elemente einrasten. Dreht man den Teller dann weiter, werden die Kugeln einfach zurück gedrückt und springen bei genau  $90^\circ$  wieder in eine vorgesehene Einkerbung. Beim Schwenken können ebenfalls Rastelemente bei  $90^\circ$  einrasten. Hierbei könnte dieselbe Einkerbung sowohl für das Drehen als auch das Schwenken verwendet werden. So soll ein sehr genaues und reproduzierbares Messergebnis ermöglicht werden.

In Abb. 37 ist ein Konzept ersichtlich, wie dies möglicherweise aussehen könnte. In vorgegebenen Winkeln von  $90^\circ$  rund um den Teller gibt es Einkerbungen, in die das Rastelement einrasten kann. Durch eine entsprechende Anordnung der Rastelemente passen die Einkerbungen beim Schwenken ebenfalls und rasten bei  $90^\circ$  ein.

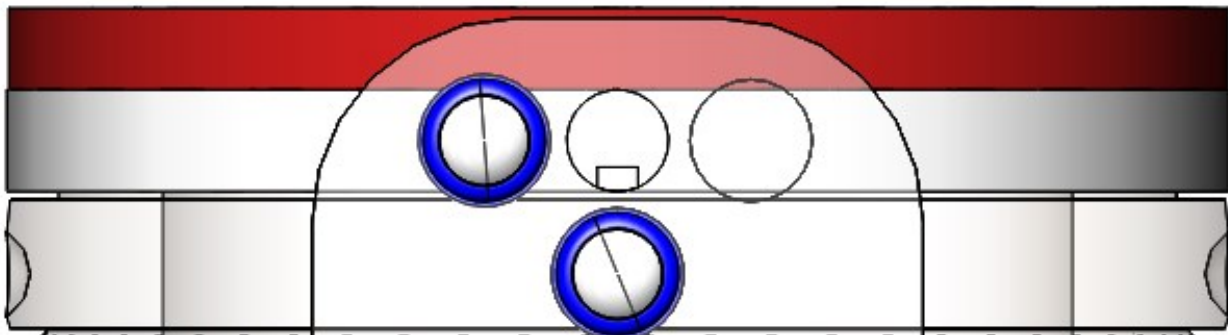


Abb. 37: Mögliche Umsetzung des manuellen Betriebes mit Rastelementen, Quelle: Eigene Darstellung.

### 5.3 Konstruktionskonzept der Montageplatte

Das Konstruktionskonzept der Montageplatte ist von den beiden vorigen Punkten unabhängig, muss natürlich dennoch betrachtet werden. Die meisten der konventionell erhältlichen Manipulatoren haben zum Montieren des Prüflings eine Plattform mit Bohrungen. Wie das EUT an diesen Bohrungen befestigt wird, ist nicht ersichtlich und wird in den Unterlagen und Informationen zu den Produkten nicht erläutert. Daher kann diesbezüglich kein Konzept von einem bestehenden System übernommen werden.

Um dennoch ein Befestigen des EUTs zu ermöglichen, soll eine Befestigung mit Haltepins erfolgen. Dies wird insofern etwas erleichtert, indem laut Anforderungen des Auftraggebers hauptsächlich Platinen mit dem Manipulator vermessen werden sollen und der Manipulator auch dafür ausgelegt werden soll. Diese sind im Normalfall recht flach und das Gewicht ist meist auch keine Problematik.

Um eine Haltemöglichkeit anzubringen, muss die Plattform Bohrungen aufweisen. Diese sollen rund um den Mittelpunkt der Plattform angebracht und möglichst gut verteilt sein, damit man immer passende Löcher zur Verfügung hat. In der nächsten Abbildung ist veranschaulicht, wie diese Plattform aussehen könnte. Zur Fixierung mit dem getriebenen Kegelrad wird sie Schraublöcher für Senkkopfschrauben aufweisen. Die Größe der Löcher ist vom Haltesystem abhängig. Mit dem unteren Lochbild sollte es auch möglich sein, die Durchmesser geringfügig zu variieren.



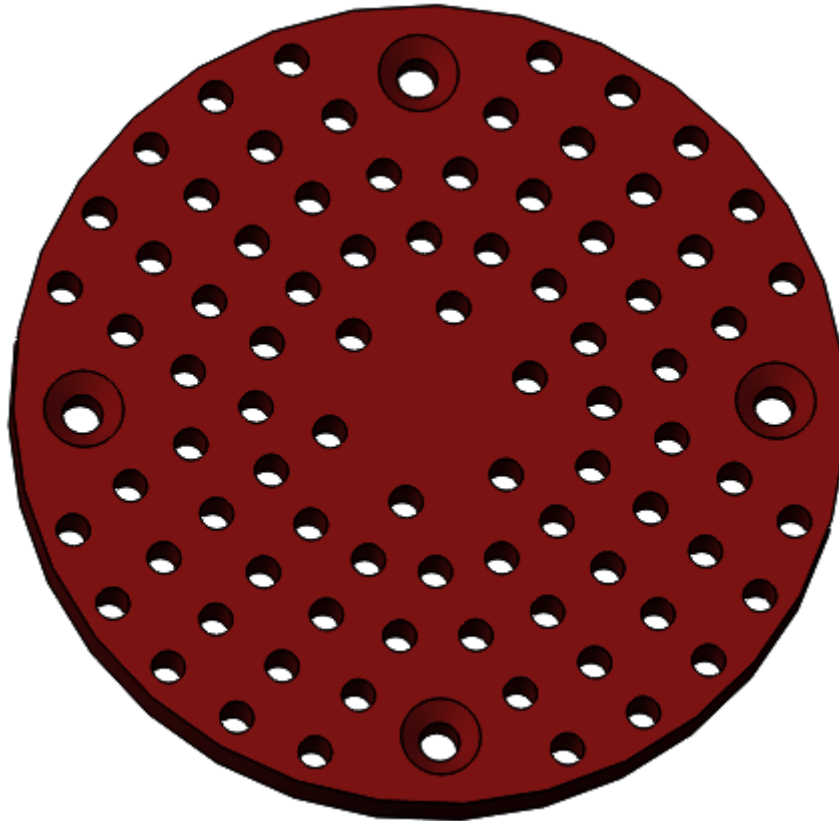


Abb. 38: Mögliches Design der Montageplatte, Quelle: Eigene Darstellung.

Als Haltepins können möglicherweise herkömmliche Kunststoffspreiznieten dienen. Es müsste zwar getestet werden, ob Niete dieser Art wirklich gut genug halten, aber sie würden eine recht einfache Befestigungsmöglichkeit bieten. Die Niete sind aus Kunststoff und in unterschiedlichsten standardisierten Größen erhältlich. Zwischen diesen Niete könnte dann ein Gummi gespannt werden, der den Prüfling in seiner Position hält.

Nach intensivem Recherchieren konnten zwei Modelle gefunden werden, mit denen dann Versuche stattfinden sollen. Diese sind bei dem Unternehmen Essentra Components zu erwerben. Das Unternehmen bietet auch an, Muster zu verschicken. So ein Service bietet sich zum Testen hervorragend an. Es wurden nach Durchsicht aller Modelle zwei ausgesucht, mit denen ein Befestigen versucht werden soll. Das erste Modell ist eine Standard-Spreizniete SR 1963, das zweite Modell eine lösbare Niete. Die beiden Modelle werden ausgewählt, weil sie augenscheinlich sowie von ihrem Arbeitsprinzip wirken, als ob sie für die vorliegende Aufgabenstellung gut geeignet wären und weil für diese Niete recht kleine Bohrungen notwendig sind.



Abb. 39: Spreizniete SR 1963 (links) und lösbare Niete (rechts), Quelle: Essentra Components (2017), Online-Quelle [28.11.2017].

Sollten die beiden Typen für die Aufgabenstellung nicht geeignet sein, gibt es noch sehr viele weitere ähnliche Systeme am Markt, die getestet werden können.

### 5.4 Zusammenführen der Konzepte

Die einzelnen Konzepte müssen nun ausdetailliert, konstruiert und zusammengeführt werden. Zusätzlich muss das Design auch noch den weiteren Anforderungen wie der niedrigen Bauform und dem geringen Bauraum entsprechend gestaltet werden.

Um alle weiteren Größenverhältnisse klären zu können, muss zuerst entschieden werden, wie groß die Grundplatte des Manipulators sein kann. Hier wirkt sich die nur 90 x 90 mm<sup>2</sup> große Türe am Boden der Zelle, die bearbeitet werden kann, stark eingrenzend aus. Wenn der Manipulator nur in diesem Bereich verschraubt wird und man die Riemen dementsprechend positioniert, würde sich die Soll-Montageplattformgröße von 150 mm Durchmesser möglicherweise ausgehen. Dennoch wurde nach Rücksprache beschlossen, den ersten Prototyp geringfügig kleiner zu realisieren, damit es zu keinen unvorhergesehenen Komplikationen bei Montage und Betrieb kommt. Mit einer Grundplattenlänge von 145 mm ist dies gewährleistet. Daraus ergibt sich dann eine Montageplattform mit 120 mm Durchmesser. In dieser Größenordnung gibt es auch keine Probleme beim Einlegen und Herausnehmen des Manipulators an der Haupttür der Zelle. In die Bodenplatte der Zelle werden dann 6 Öffnungen geschnitten. 4 davon sind Bohrungen für die Montage. Die restlichen 2 sind Langschlitze, durch die die Riemen geführt werden können.

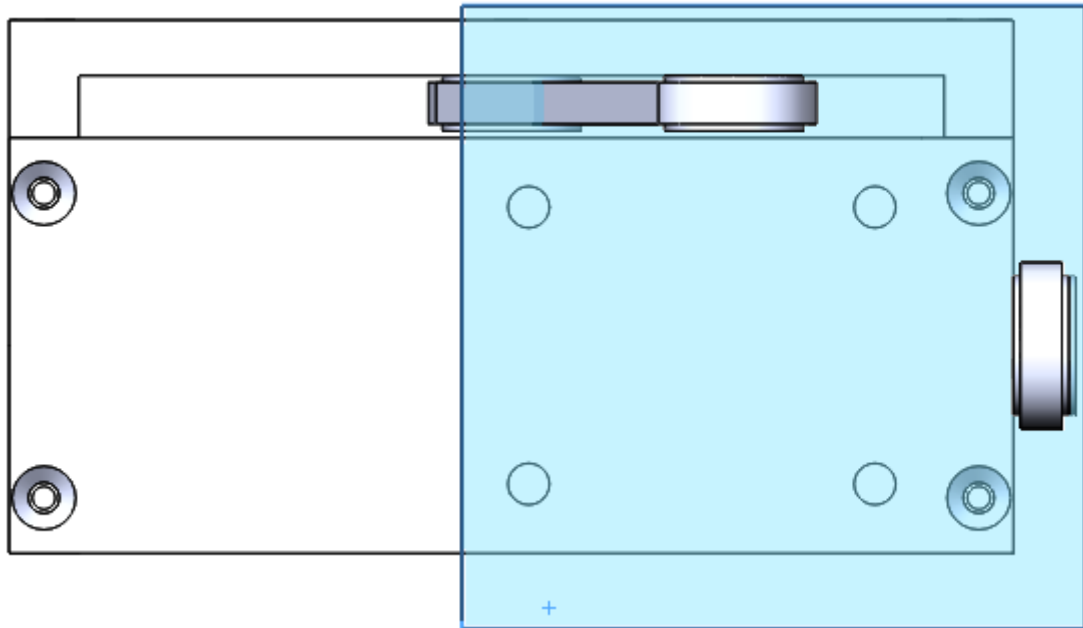


Abb. 40: Unterseite des Manipulators, Bodentüre der Zelle in Blau, Quelle: Eigene Darstellung.

Mit diesem Aufbau steht der Manipulator nicht gänzlich in der Mitte, da das aufgrund der vorherrschenden Bedingungen nicht möglich ist. Das sollte aus derzeitiger Sicht jedoch keine Probleme verursachen.

Da es nun eine ungefähre Größenordnung des Systems gibt, kann als Nächstes das genaue Design der Zahnräder festgelegt werden, da dies wieder Einfluss auf das restliche Design haben kann. Es gibt in der Toolbox von SolidWorks auch ein Kegelrad, welches zur Erstellung genutzt werden soll. Zuvor müssen dennoch einige Aspekte bedacht und betrachtet werden, um die Parameter passend eintragen zu können. Dazu müssen an dieser Stelle einige Werte berechnet werden.

Grundlegende Überlegungen wie die Einhaltung des Verzahnungsgesetzes und dergleichen können außen vor gelassen werden, da dies ohnehin das Tool übernimmt. Da das gesamte System keine überwiegend großen Kräfte übertragen muss, können Berechnungen diesbezüglich ebenfalls vernachlässigt werden. Eine weitere Vereinfachung ist dadurch gegeben, dass die Kegelräder in einem  $90^\circ$ -Winkel zueinander stehen.

Dennoch müssen die Zahnräder ausgelegt werden. Im Tool können Eingaben zu Modul, Zähneanzahl, Eingriffswinkel usw. angegeben werden. Die gegebene Bedingung, welche sich aufgrund des Aufbaus ergibt, ist, dass das getriebene Zahnrad einen Außendurchmesser von 120 mm aufweist. Damit deckt es sich mit der Montageplatte. Mit diesem Wert allein ist es jedoch noch nicht möglich, das Zahnrad auszulegen. Darum wird auch festgelegt, dass es bei den Zahnrädern eine Übersetzung von 1:2 geben soll. Dies wird definiert, da es sich größentechnisch sehr gut anbietet, wenn das treibende Kegelrad ca. halb so groß ist und somit halb so viele Zähne besitzt. Außerdem würde ein Servomotor, der das System später antreibt, mit einer  $180^\circ$ -Drehung die Plattform genau um  $90^\circ$  weiterdrehen, was ebenfalls vorteilhaft wäre. Abgesehen davon kann mithilfe des Riementriebes ohnehin noch eine andere Übersetzung realisiert werden und hierbei erleichtert es das Umrechnen ungemein. Die nachfolgende Formel zeigt zur Verdeutlichung den Zusammenhang zwischen der Drehzahl, dem Durchmesser, dem Drehmoment, der Anzahl der Zähne und der Winkelgeschwindigkeit.

$$i = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{M_2}{M_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\vec{\omega}_1}{\vec{\omega}_2} \quad (5.1)$$

$i/1$	Übersetzungsverhältnis
$d_2/m$	Durchmesser Abtrieb
$d_1/m$	Durchmesser Antrieb
$z_2/1$	Anzahl der Zähne Abtrieb
$z_1/1$	Anzahl der Zähne Antrieb
$M_2/Nm$	Drehmoment Abtrieb
$M_1/Nm$	Drehmoment Antrieb
$n_1/s^{-1}$	Drehzahl Antrieb
$n_2/s^{-1}$	Drehzahl Abtrieb
$\vec{\omega}_1 / \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Winkelgeschwindigkeit Antrieb
$\vec{\omega}_2 / \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Winkelgeschwindigkeit Abtrieb

Zur weiteren Auslegung wird auch die Formel für den Kopfkreisdurchmesser, welcher mit dem Außendurchmesser gleichzusetzen ist, benötigt:

$$d_a = d + 2m \quad (5.2)$$

$d_a/m$	Kopfkreisdurchmesser
$d/m$	Teilkreisdurchmesser
$m/m$	Modul

Es wird auch eine Formel zur Berechnung des Moduls benötigt:

$$m = \frac{d}{z} \quad (5.3)$$

$m/m$	Modul
$d/m$	Teilkreisdurchmesser
$z/1$	Anzahl der Zähne

Wenn man sich bei der Zahnanzahl nun herantastet und für den Durchmesser von 120 mm einen durchaus üblichen Wert von 60 Zähnen wählt, käme man auf einen Modul von 2. Ein Modul von 2 wäre auch ein Wert aus der Modul-Vorzugsreihe 1, welche in der DIN 780 nachgeschlagen werden kann. Nun gibt es jedoch das Problem, dass 120 mm der Wert des Kopfkreisdurchmessers sein soll und nicht der des Teilkreisdurchmessers. Wenn man nun in Formel 5.2 den Modul 2 einsetzt, ergibt sich:

$$120 \text{ mm} = d + 4 \text{ mm} \rightarrow d = 116 \text{ mm} \quad (5.4)$$

Dieses Ergebnis eingesetzt in Formel 5.3 ergibt dann eine Zahnanzahl von 58. Das bedeutet, die beiden Zahnräder haben einen Modul von 2 und 58 bzw. 29 Zähne.

$$2 \text{ mm} = \frac{116 \text{ mm}}{z} \rightarrow z = 58 \quad (5.5)$$

Ergänzend sei auch erwähnt, dass der Modul  $m$  eigentlich als der Quotient aus der Zahnradteilung  $p$ , also dem Abstand zweier benachbarter Zähne, und der Kreiszahl  $\pi$  definiert ist. Nach dem Umformen bzw. Einsetzen in die Formel ergibt sich dann obige Formel.

$$m = \frac{p}{\pi} \quad (5.6)$$

$m/m$	Modul
$p/m$	Teilkreisdurchmesser

Die Zahnräder können nun mithilfe des Tools von SolidWorks konstruiert und entsprechend den Anforderungen modifiziert werden. In das getriebene Zahnrad kommen auf der Außenseite 4 Einkerbungen, in denen dann die Rastelemente einrasten können. Die Rastelemente werden so positioniert, dass auch bei der Schwenkbewegung dieselben Einkerbungen verwendet werden können.

Zu den Zahnrädern wird auch noch ein provisorischer Riementrieb erstellt, der aber nur zur Veranschaulichung und zu Simulationszwecken in SolidWorks dient. Die Riemenscheiben sowie die Riemen selbst sind willkürlich gewählt, da zu diesem Zeitpunkt keine genauen Werte der Motoren usw. bekannt sind. Die Riemen werden aufgrund der Einfachheit und der Baugruppenperformance auch nur als Flachriemen dargestellt. Später müssen aber definitiv Zahnriemen verwendet werden, da diese für die Aufgabenstellung essentielle Vorteile bieten. Als Beispiele können an dieser Stelle das konstante Übersetzungsverhältnis, die hohe Positioniergenauigkeit und die geringe Lagerbelastung aufgrund der kleinen Vorspannkraft erwähnt werden.

Durch die zuvor erwähnten Einkerbungen im getriebenen Zahnrad sind bereits wichtige Vorbereitungen für den manuellen Betrieb erfolgt. Die Tiefe der Bohrungen für die Rastelemente kann zum Zeitpunkt der Konstruktion noch nicht exakt festgelegt werden, da die Normteile noch nicht vorhanden sind und noch nicht bekannt ist, ob ein oder mehrere Tellerfedern notwendig sind. Darum werden die Bohrungen für die Mindesttiefe konstruiert und dann bei Bedarf nachbearbeitet.

Die Rahmenkonstruktion muss, damit ein späterer Zusammenbau möglich ist, aus Einzelteilen bestehen. Diese müssen miteinander verbunden werden. Das erfolgt mit einfachen Schraubverbindungen. Aufgrund der geringen Wandstärken der Einzelteile können nur kleine Schraubendurchmesser verwendet werden. Die Rahmenteile sollen mit M4-Kunststoffsensschrauben verbunden werden. Die Montageplatte wird mit M5-Sensschrauben befestigt und die Montage am Zellenboden soll mit M6-Sensschrauben erfolgen. Als Schraubentyp werden überall Kunststoffsenkschrauben mit der DIN 963 zum Einsatz kommen. Diese haben einen Schlitz im Kopf und haben somit gerade bei kleinen Größen den Vorteil, dass eine wesentlich einfachere Montage als bei Inbusschrauben möglich ist. Da es an das Material keine besonderen

Anforderungen bezüglich Temperatur oder ähnlichen Faktoren gibt, kann hier auf billige Standards zurückgegriffen werden. In diesem Fall wird das Nylon sein.

Um eine minimale Bauhöhe sicherzustellen, soll das treibende Kegelrad so positioniert werden, dass es nur sehr knapp über dem Zellenboden gelagert ist. Auch der Aufbau samt Drehteller soll sich nur knapp über der Grundplatte des Manipulators befinden. Eine Kollision beim Drehen mit montiertem Prüfling muss jedoch ausgeschlossen werden.

Die Realisierung der Dreh- und Schwenkbewegungen soll so erfolgen, dass die Komponente für die Schwenkbewegung mit den beiden Seitenteilen gelagert aufgebaut ist. Diese Komponente lässt sich dann jedoch nicht mitdrehen. Darum wird an der Unterseite das getriebene Kegelrad angebracht und mit der oberen Montageplatte verschraubt. Zwischen diesen beiden Teilen und dem Ring zum Schwenken ist ein Spiel vorhanden. Dadurch ist die Funktion beider Bewegungen gewährleistet.

Zum Schluss müssen nur noch alle Einzelteile der Baugruppe zusammengefügt und entsprechend verknüpft werden. Aus den bisherigen Erkenntnissen und Entscheidungen entsteht das folgende Modell, das gedruckt werden soll. Dieses Modell ist so aufgebaut, dass es möglichst viele der in Tab. 3 geforderten Maßnahmen erfüllt und somit besser bewertet werden würde als die dort erwähnten Konkurrenzprodukte.

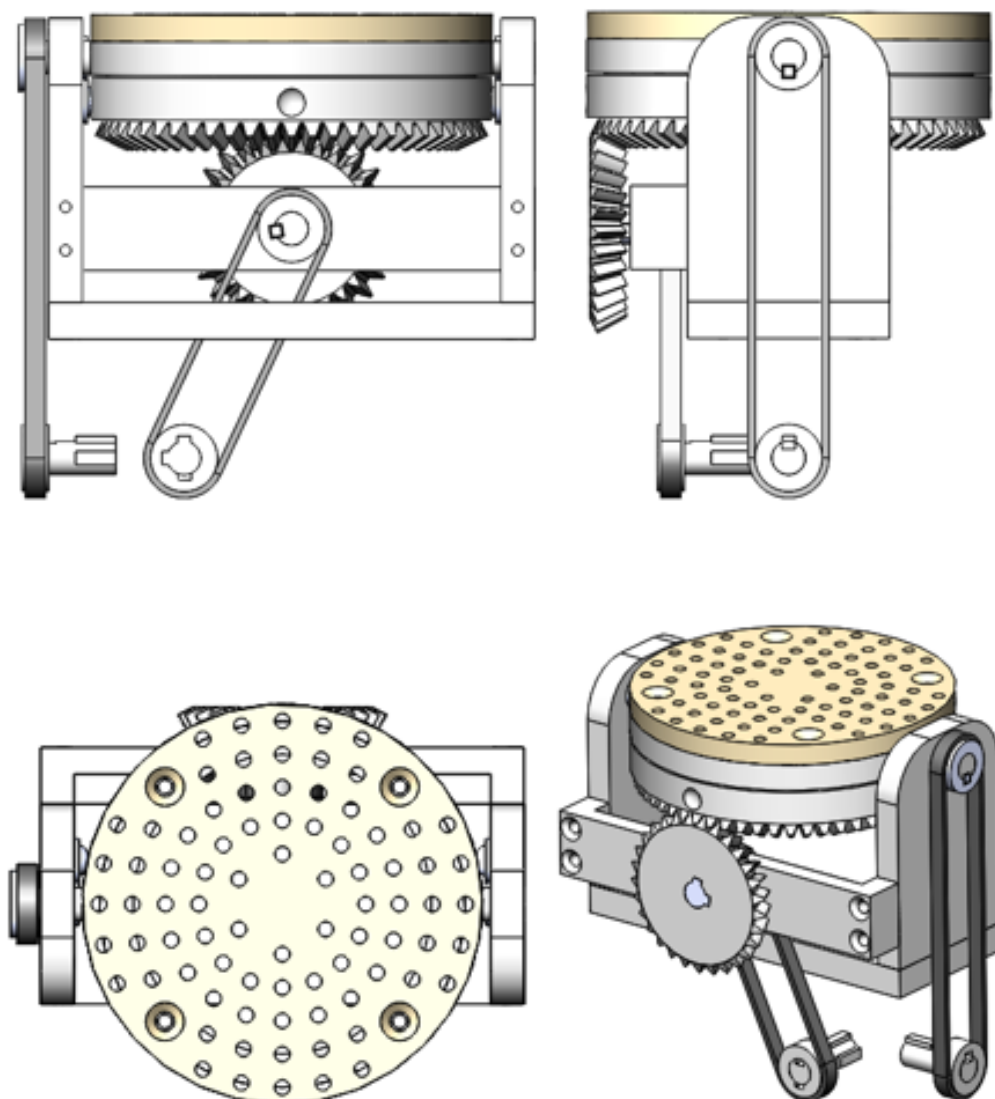


Abb. 41: Risse sowie Abbildung des konstruierten Manipulators, Quelle: Eigene Darstellung.

In der nachfolgenden Tabelle ist eine Stückliste mit allen Bauteilen, die zur Herstellung benötigt werden, ersichtlich. Hier wird auch aufgezeigt, wo diese bezogen werden bzw. wie lange die Wartezeit schätzungsweise dauern wird. Die Stückliste dient sowohl als Übersicht der Komponenten als auch als Zeitplan, damit der Autor ein Gefühl bekommt wie lange es dauert, bis der Prototyp gebaut werden kann.

Komponente	Stück	Quelle	Wartezeit/Tage
Bodenplatte	1	Campus 02	3 - 5
Seitenteil	2	Campus 02	3 - 5
Schwenkring	1	Campus 02	3 - 5
Montageplatte	1	Campus 02	3 - 5
Kegelrad getrieben	1	Campus 02	3 - 5
Kegelrad treibend	1	Campus 02	3 - 5
Welle Kegelrad	1	Campus 02	3 - 5
Seitenbügel	1	Campus 02	3 - 5
Kunststofftellerfedern Polysorb	ca. 8	Igus	5 - 7
Rastelement GN 614	4	Ganter	5 - 7
Kunststoffspreiznieten SR 1963	ca. 2	Essentra	10 - 14
Kunststoffsensschraube (PA) M4x20 DIN 963	4	Kunststoffschraube.de	5 - 7
Kunststoffsensschraube (PA) M4x25 DIN 963	4	Kunststoffschraube.de	5 - 7
Kunststoffsensschraube (PA) M5x20 DIN 963	4	Kunststoffschraube.de	5 - 7
Kunststoffsensschraube (PA) M6x25 DIN 963	4	Kunststoffschraube.de	5 - 7
Unterlegscheibe M6 DIN 125	4	Campus 02	-
Mutter M6 DIN 934	4	Campus 02	-

Tab. 4: Stückliste des Manipulators sowie Wartezeiten, Quelle: Eigene Darstellung.

## 6 FERTIGUNG UND BAU EINES PROTOTYPS

In diesem Kapitel soll aus der virtuellen Konstruktion ein realer und funktionstüchtiger Prototyp gebaut werden. Die benötigten Bauteile sollen hergestellt und zusammengefügt werden. Die Bauteile, welche nicht individuell hergestellt werden, sind teilweise bereits geordert oder müssen in der jetzigen Phase bestellt werden. Während dieser Projektphase sollen bereits erste Verbesserungen durchgeführt bzw. Verbesserungspotentiale aufgezeigt werden.

### 6.1 3D-Drucken der Komponenten

Um die Teile mithilfe von 3D-Druckern aufzubauen, müssen diese als STL-File abgespeichert werden. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass in den Optionen auch die Maßeinheit mm eingestellt ist und die Genauigkeit des STLs entsprechend hoch ist. Diese Schritte sind notwendig, damit dann ein sehr präzises Schichtenmodell aufgebaut werden kann. Bei einer Besprechung mit den Experten der FH Campus 02 im Bereich des 3D-Druckens werden noch einige Optimierungen vor dem Drucken vorgenommen. Als bevorzugte Variante hinsichtlich der Genauigkeit wird das STL-Druckverfahren festgelegt. Zusätzlich sollen auch Teile mit dem FDM-Verfahren hergestellt werden. Es wäre zwar möglich, alle Teile mittels Stereolithografie zu erzeugen, dies bringt aber erhebliche Nachteile mit sich. Das Arbeiten mit ausschließlich diesem Verfahren ist nicht wirtschaftlich, da es beispielweise äußerst zeitintensiv und mit deutlich höheren Kosten verbunden wäre. Außerdem sind die Drucker an der Fachhochschule stets sehr ausgelastet und dadurch kurzfristig nicht so lange verfügbar.

Aus diesem Grund sollen nur die beiden Kegelräder, bei denen Genauigkeit eine große Rolle spielt, der Schwenkring und die Welle des Kegelrades mit der STL-Methode gedruckt werden. Beim Druck solcher Teile ist es notwendig, eine Stützkonstruktion mitzudrucken. Hierbei wird darauf geachtet, dass an keinen Flächen gestützt wird, die sehr genau passen sollen. Deshalb werden die Welle und der Schwenkring aufgestellt. Die Kegelräder müssen entsprechend schräg aufgebaut werden, damit möglichst nicht an den Zähnen gestützt werden muss.

Die beiden Seitenteile, der Seitenbügel und die Bodenplatte sollen mit dem FDM-Verfahren aufgebaut werden. Hier gibt es leider das Problem, dass Bohrungen, welche nicht vertikal mit der Bauteillage verlaufen, aufgrund des Fertigungsverfahrens immer etwas oval werden. Dies kann im Fertigungsprozess nicht vermieden werden. Darum werden die Seitenteile flach hingelegt. Dadurch werden die kritischen Bohrungen im Bereich der Wellenaufnahme und die Bohrungen für die Rastelemente genau. Die restlichen Bohrungen werden im Modell entfernt und nach dem Drucken händisch hergestellt.

Beim Simulieren des Druckes zeigt sich, dass die Bodenplatte mehr als ein Drittel der Druckzeit in Anspruch nimmt. Der gesamte benötigte Zeitaufwand liegt bei ca. 23 Stunden. Da dieser Aufwand wiederum nicht wirtschaftlich wäre für ein so einfaches und verhältnismäßig anspruchsloses Bauteil, soll die Bodenplatte händisch ausgeschnitten werden. Da Holz nicht auf elektromagnetische Felder reagieren sollte und sehr einfach zu bearbeiten ist, bietet sich dieses als Material an.

Mit diesen Erkenntnissen wird der Druck der Einzelteile beauftragt.



## 6.2 Herstellen der Montageplatte

Die Montageplatte soll 8 mm dick sein. Diese Stärke wird gewählt, damit es beim Drehen größerer Prüflinge keine Kollision mit den Seitenteilen gibt. Mit dieser Stärke ist sichergestellt, dass der Prüfling höher positioniert ist als die Oberkanten des Seitenteils. Außerdem bringt die Stärke den weiteren Vorteil der erhöhten Stabilität. Die Kunststoffnieten sind zudem ebenfalls sehr gut für diese Stärke geeignet.

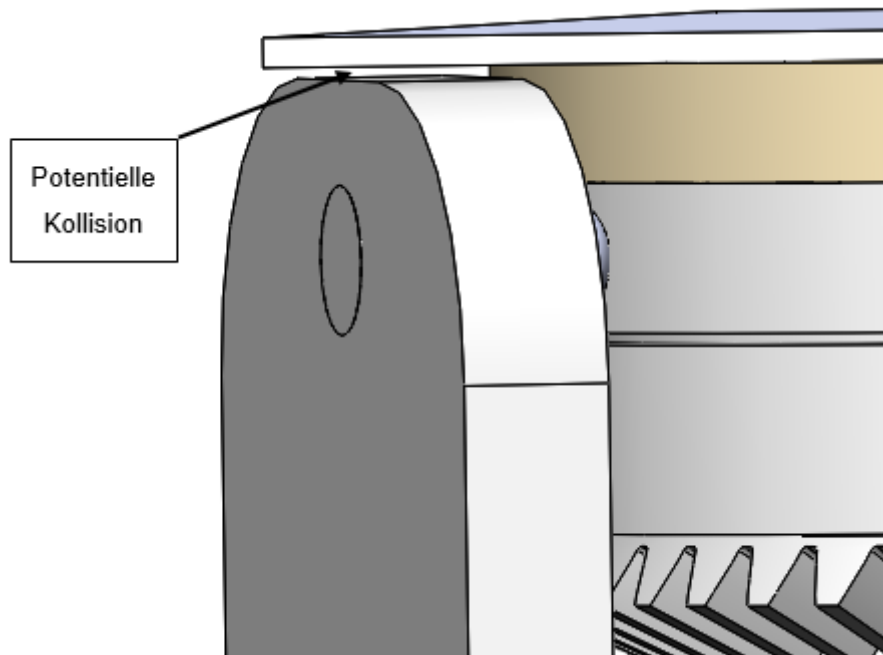


Abb. 42: Potentielle Kollision bei zu niedriger Montageplatte, Quelle: Eigene Darstellung.

Bezüglich der Herstellung der Montageplatte gibt es nun jedoch das Problem, dass der Lasercutter am Campus solche Materialstärken nur bedingt schneiden kann. Wenn es überhaupt möglich wäre, so dickes Material zu schneiden, was bisher nicht versucht wurde, hat man dennoch das Problem, dass jedes Loch nicht zylindrisch, sondern leicht konisch wäre. Dies ist auf den Laser zurückzuführen. Daher müssen zwei schmalere Platten geschnitten und anschließend miteinander verklebt werden. Hier stellt sich jedoch die Frage nach dem Material. In Frage kommen Kunststoff und Holz. Bei Kunststoff ist ein Verkleben der beiden Platten jedoch aufwändiger, da ein geeigneter Klebstoff gesucht werden muss. Bei Teilen aus Holz ist dies sehr viel einfacher. Daher fällt die Entscheidung bei diesem Bauteil ebenfalls auf Holz.

Ein weiterer Punkt, der hierbei beachtet werden muss, ist, dass der Laser eine bestimmte Schnittbreite aufweist. Daraus folgt, dass ein Innendurchmesser entsprechend größer als ursprünglich konstruiert geschnitten wird und ein Außendurchmesser entsprechend kleiner. Wird dies berücksichtigt, ist der Lasercutter ein sehr genaues Werkzeug. Aus Erfahrung weiß man seitens der FH, dass durch den Schnitt das Ergebnis um ca. 0,1 mm verfälscht wird. Damit die Löcher fast genau 4,5 mm Durchmesser haben, wird die Bohrung laut Zeichnung auf 4,4 mm geändert. Beim Durchmesser der Montageplatten stellt es kein Problem dar, wenn die Maße geringfügig kleiner sind.

Ein letzter Punkt, der zum Ausschneiden der Montageplatten beachtet werden muss, ist eine Konvertierung des SolidWorks-Teils in ein DXF-File. Hierbei muss beim Speichern eine Fläche ausgewählt werden, die dann vom Lasercutter als Schnittfläche angenommen wird.

### 6.3 Zusammenbau des Prototyps

Beim Drucken der Komponenten zeigt sich beim Zahnrad, dass der untere Bereich der Zähne nicht ganz sauber gedruckt wird. Die Ursache dafür ist wahrscheinlich die fehlende Stützkonstruktion in diesem Bereich. Bei der Berechnung des Teils schlägt die Software hier immer eine Stütze vor, egal wie man das Teil dreht. Die Stützen in diesem Bereich wurden dann händisch entfernt, da man aufgrund von Erfahrungswerten entschieden hat, dass ein Druck trotzdem möglich ist.

Nun zeigt sich jedoch, da das verwendete Material klar und durchsichtig ist, dass es einen sichtbaren Übergang in diesem Bereich gibt. Dies könnte eine potentielle Schwachstelle sein. Daher sollte das später bei den Versuchen mit einem automatisierten System ausgeschlossen werden. Wenn die Komponenten wirklich an dieser Stelle ausbrechen, müssten die beiden Kegelräder nochmals mit einem alternativen Material gedruckt werden.

Die Bodenplatte wird für den Zusammenbau aus einer gewöhnlichen Sperrholzplatte ausgeschnitten und laut Maßen gebohrt. Die Verbindungslöcher zur Zelle werden erst direkt bei der Montage in der Zelle hergestellt, damit es bei Bedarf noch möglich ist, den Manipulator leicht zu versetzen.

Um sicher zu gehen, dass alle Teile passen, wurden die genauen Passungen und Bohrungen genau gleich groß wie der Counterpart konstruiert. Daher ist es nun notwendig, die meisten Komponenten etwas nachzuschleifen, um einen Zusammenbau zu ermöglichen. Dies wäre bei einem erneuten Druck nicht mehr notwendig. Die Genauigkeiten können definitiv eingehalten werden. Daher könnte bei einem erneuten Druck jedenfalls die gewünschte Passung gedruckt werden.

Ein weiterer möglicher Optimierungspunkt ist, dass die mit der FDM-Technik gedruckten Teile bereits konstruktiv mit einem sehr kleinen Radius an den Außenkanten versehen werden sollten. Dadurch könnte das Wegschleifen des Grates, das nun notwendig ist, eingespart werden.

Die nicht gedruckten Bohrungen in den Seitenteilen müssen natürlich auch noch händisch nachgearbeitet werden. Hierbei muss die Bohrtiefe beachtet werden. Leider ist es konstruktiv nicht anders möglich und somit schneiden sich die Achsen der Bohrungen für den Seitenbügel und die für die Fixierung der Seitenteile. Diese Bohrungen sind mit M4-Gewinden geplant und werden daher, wie in der Tabelle mit Kernlochdurchmessern beschrieben, mit einem Bohrerdurchmesser von 3,3 mm gebohrt.

Bei der Montageplatte müssen die Bohrungen noch mit einem Senker bearbeitet werden, damit die geplanten Senkkopfschrauben auch passen. Diese Formsenkung kann natürlich nicht mit dem Lasercutter mitgefertigt werden. Außerdem wird aus gleittechnischen Gründen die Unterseite der Montageplatte, welche bei einer Drehung im Bereich des Schwenkrings reibt, lackiert. Hierzu wird ein handelsüblicher klarer Holzlack verwendet.

Für die Spannelemente werden die gedruckten Bohrungen mithilfe einer Handreibahle genau auf die gewünschte Passung ausgeweitet. Die Spannelemente selbst werden sehr vorsichtig mit einer Säge aufgeschnitten. Beim Implementierungsversuch der Federn muss leider festgestellt werden, dass ein

Einsatz der in Abb. 34 erwähnten Tellerfedern nicht möglich ist. Da die Federn einen sehr kleinen Federweg aufweisen, müssten so viele Federn aufgestapelt werden, dass dies eine viel zu hohe Betätigungskraft erfordert. Daher muss eine geeignete Alternative mit einer sehr geringen Federkraft zum Einsatz kommen. Nach einigen Versuchen mit diversen Materialien, wie unterschiedlichen Gummiarten, federnden Kunststoffen und Schaumstoffen, wird nun ein Schaumstoff verwendet, der seine Ursprungsform immer wieder und sehr schnell annimmt.

Sind all diese zuvor erwähnten Schritte erfolgt und auch die Gewinde im getriebenen Kegelrad geschnitten, kann ein Zusammenbau des Prototyps erfolgen. Das Ergebnis des zusammengebauten Prototyps kann in Abb. 43 betrachtet werden.

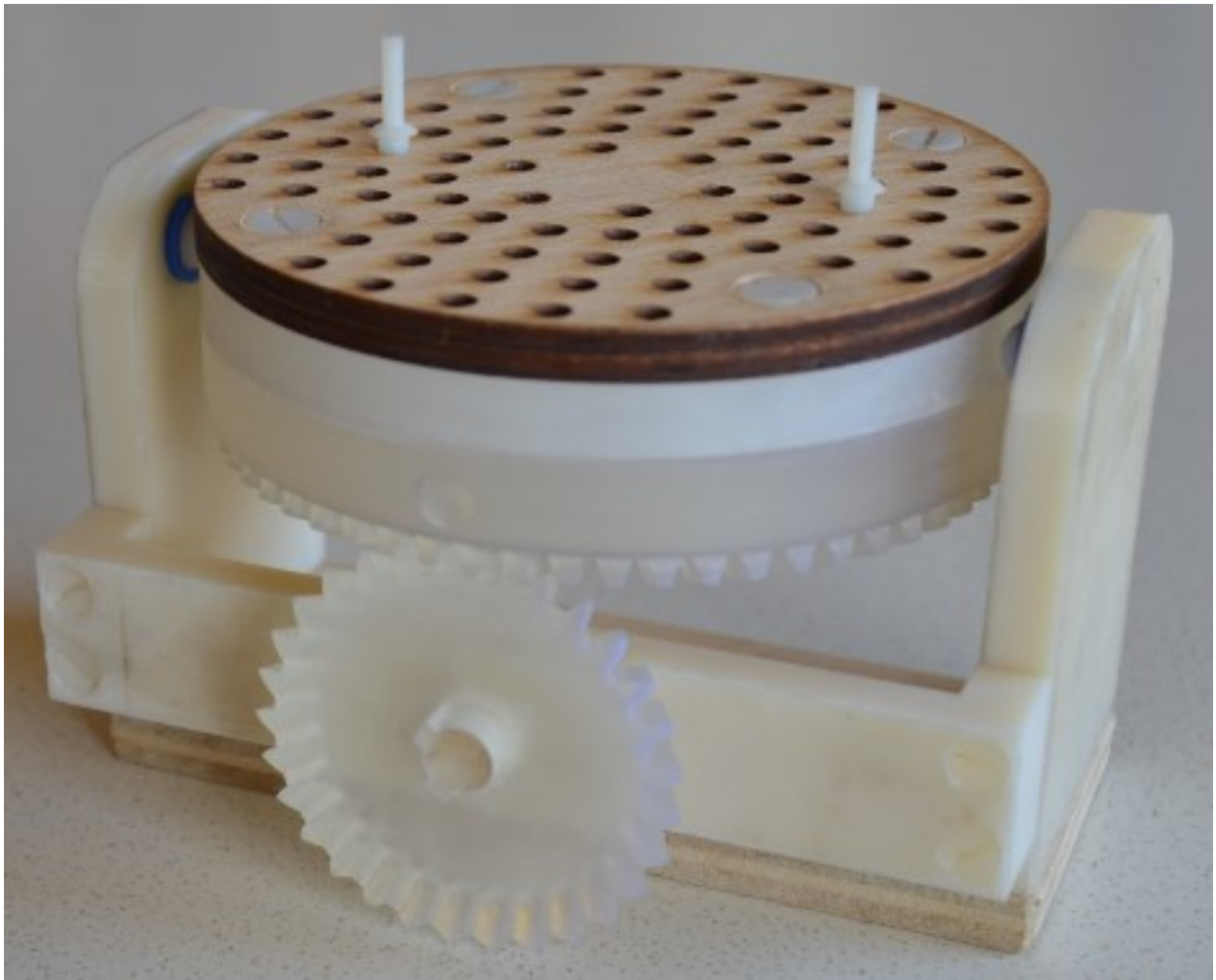


Abb. 43: Zusammengebauter Manipulator, Quelle: Eigene Darstellung.

## 7 VERGLEICHSMESSUNGEN

In diesem Kapitel soll der Prototyp des Manipulators in der Realität erprobt werden, um festzustellen, ob und wie gut dieser funktioniert. Außerdem sollen bisher getroffene Annahmen und Entscheidungen nun mithilfe von Tests untermauert werden. Zuerst wird der Prüfaufbau festgelegt, um sicherzustellen, dass alle Messergebnisse nachvollziehbar und bei Bedarf reproduzierbar sind. Danach soll festgestellt werden, ob der Manipulator selbst negative Einflüsse auf mögliche Messergebnisse verursacht. Ist dies erfolgt, werden die bisherigen Messmethoden und die Messungen mit dem Manipulator verglichen. Hieraus soll eine klare Aussage über den Gesamtnutzen bzw. die Performance des Manipulators ableitbar sein. Außerdem sollen aus den Messungen auch mögliche Verbesserungen für eine nächste Generation des Manipulators hervorgehen.

### 7.1 Prüfaufbau

Das Messsetup, welches verwendet wird, besteht aus der GTEM-Zelle von ETS-Lindgren (Modell 5402) und einem Spektrumanalysator N9010A EXA Signal Analyzer, 10 Hz to 7 GHz des Unternehmens Keysight. Dieser Analysator besitzt auch die erforderliche Electromagnetic Analysis Function (EMA-Funktion), die für EMV-Messungen notwendig ist.

Diese beiden Komponenten werden mit einer SMA-Leitung, also einem koaxialen Steckverbinder für Hochfrequenzanwendungen, miteinander verbunden. Der Spektrumanalysator ist des Weiteren über eine Netzwerkleitung mit dem Rechner verbunden. Diese Verbindung ist notwendig, da auf dem Rechner die Software zur Auswertung der einzelnen Messungen sowie zur Berechnung der vektoriiellen Summe läuft. Im Folgenden ist der verwendete Messaufbau dargestellt.



Abb. 44: Verwendetes Messsetup, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Grundsoftware wurde von dem Unternehmen ETS-Lindgren bereitgestellt. Diese wurde dann für die erleichterte Bedienung von der FH mit einer entsprechenden Visualisierung erweitert. Auf der Benutzeroberfläche können einige allgemeine Voreinstellungen wie IP-Adresse, Port usw. und einige messspezifische Einstellungen getroffen werden. Hier können die Entfernung des EUTs vom Zellenboden

sowie Eigenschaften zum Vergleich mit der Freifeldmessung angepasst werden. Darunter fallen die Distanz (3, 10, 30 m) der Antennenmessung und die Höhe der Antenne. Was hier jedoch nicht berücksichtigt ist, ist die Entfernung des EUTs zum Septum. Wie in späteren Abbildungen ersichtlich, ist der Manipulator etwas weiter vorne positioniert als das bisher verwendete Messhilfsmittel. Dies müsste bei einem dauerhaften Einsatz des Manipulators seitens der FH noch einmal kritisch hinterfragt werden. Jedoch sollte der Einfluss dieser Einstellung nicht von so großem Ausmaß sein, dass eine erste Überprüfung zur Vergleichbarkeit der Messungen stark verfälscht werden würde.

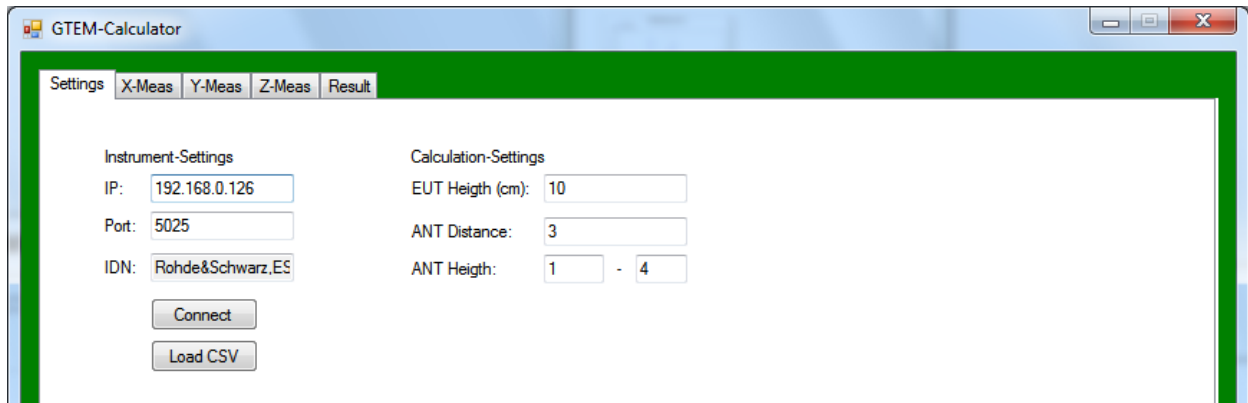


Abb. 45: Visualisierung zum Einstellen von Parametern und zur Arbeitserleichterung, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Versorgung des EUTs in der Messzelle wird mit einer Batterieeinheit der FH gewährleistet. Diese besteht aus einer 6-V-Motorradbatterie und einer Platine mit den benötigten Bauteilen, um daraus eine stabile und schaltbare 5-V-Versorgung zu generieren. Die notwendige Verbindungsleitung zwischen EUT und Batterieeinheit wird mit einem Ferrit versehen, da sie eine Schwachstelle ist und somit Störungen verursachen könnte.

## 7.2 Messungen mit und ohne Manipulator

Damit eine klare Aussage über den Einfluss des Manipulators selbst getroffen werden kann, werden die ersten beiden Tests mit einer leeren Zelle bzw. nur mit dem Manipulator in der Zelle durchgeführt. Die Resultate dieser beiden Tests sind in den nächsten Abbildungen ersichtlich. Die Ergebnisse des Tests mit der leeren Zelle zeigen, dass es in den Frequenzbereichen von ca. 95 MHz und ca. 950 MHz sogar bei der leeren Zelle Ausschläge gibt. Diese Frequenzen stimmen zum einen mit den Frequenzbändern von Radiosignalen und zum anderen mit denen des Mobilfunknetzes überein. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Ausschläge darauf zurückzuführen sind. Daraus folgt die Erkenntnis, dass auch die GTEM-Zelle nicht gänzlich vor äußeren Einflüssen geschützt ist.

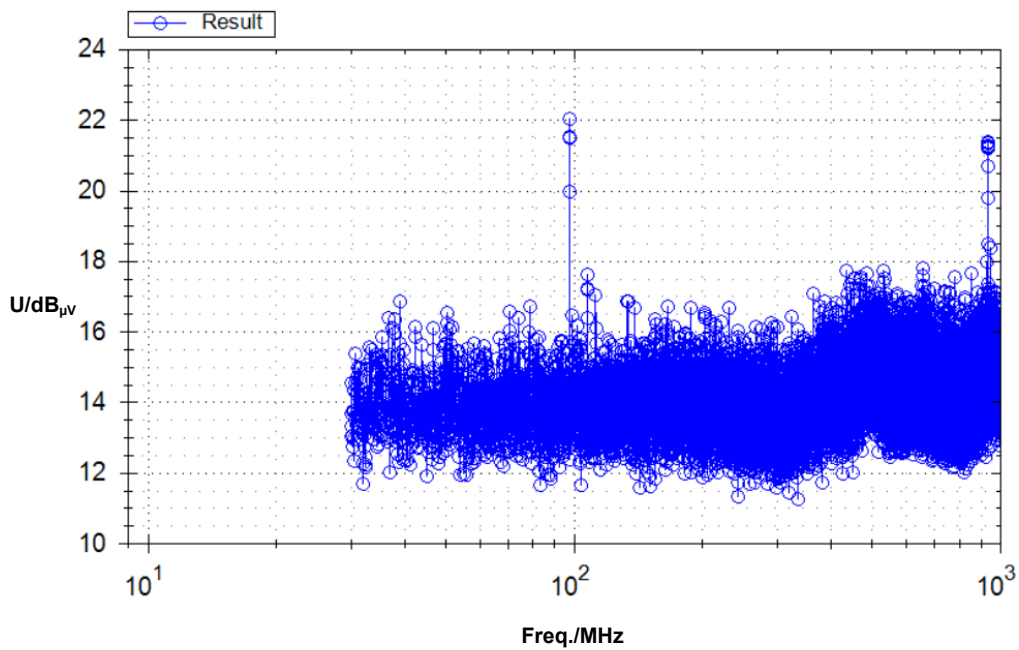


Abb. 46: Messung ohne Manipulator und leerer Zelle, Quelle: Eigene Darstellung.

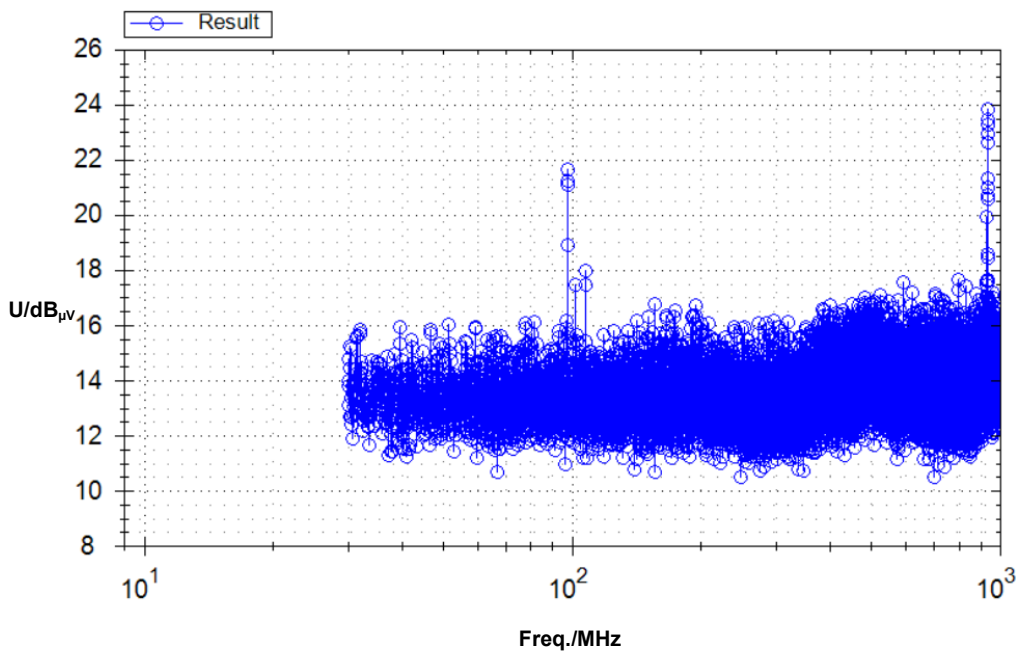


Abb. 47: Messung mit Manipulator und leerer Zelle, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Ausschläge bei den Messungen sind jedoch nahezu ident und dies ist ein klarer Beweis, dass der Manipulator selbst keinen Einfluss auf das Ergebnis hat. Auch im kritischen Bereich um 700 MHz, in dem Holz Probleme verursachen kann, sind die Ergebnisse nahezu ident. Mit diesem Wissen kann ruhigen Gewissens zu weiteren Tests vorangeschritten werden.

### 7.3 Vergleich der Messmethoden und -hilfsmittel

Als Nächstes sollen die beiden Messmethoden und Hilfsmittel miteinander verglichen werden. Die FH Campus 02 hat schon einige Messhilfsmittel im Laufe der Zeit getestet. Darunter Styroporkugeln, die aus zwei Hälften bestehen und im Inneren einen Hohlraum haben, in dem man das EUT platzieren kann, oder

einen kleinen Tisch aus Holz. In jüngster Zeit wird mit einem entsprechend geformten Styroporaufbau gemessen, bei dem man das EUT in die unterschiedlichen Positionen legt.

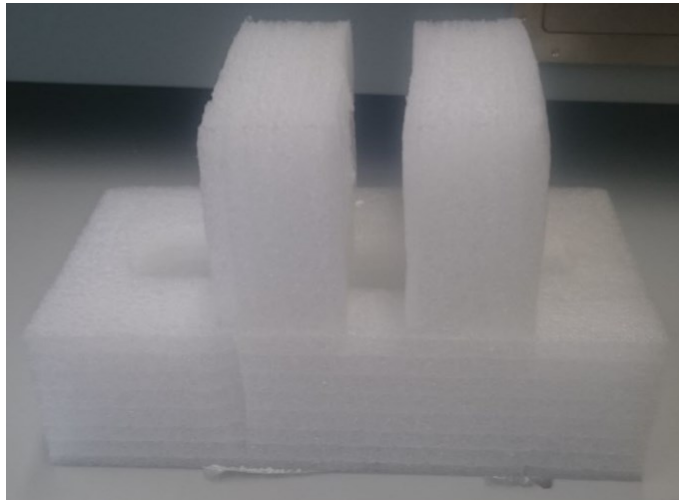


Abb. 48: Styropormesshilfsmittel, Quelle: Eigene Darstellung.

Mit diesem Messhilfsmittel hat man aber definitiv Probleme, wenn es um die Wiederholbarkeit beim Testen geht. Der Vorteil dieses Aufbaus ist jedoch, dass hier das EUT genau der Norm entsprechend gedreht werden kann. Nun soll der direkte Vergleich der beiden Methoden zeigen, ob das Arbeiten mit dem entwickelten Manipulator komfortabler ist und in weiterer Folge soll im Folgekapitel überprüft werden, ob die Messungen trotz nicht normgerechter Drehung des EUTs vergleichbar sind.

Im bisher verwendeten Aufbau wird der Prüfling erst auf die rechte Seite der Form gelegt, dann in dem Schlitz in der Mitte platziert und dann noch einmal auf der rechten Plattform aufgestellt positioniert. Dies ist zur Veranschaulichung in den folgenden Fotos dargestellt. Hier ist eindeutig ersichtlich, dass eine sehr genaue Positionierung des EUTs nicht möglich ist. Außerdem verändert das EUT seine Position während der Messung um einige Zentimeter, was wie in Kapitel 3.5.3 erwähnt, ebenfalls bereits Auswirkungen auf das Ergebnis haben kann. Bezüglich des Materials, der Bedienung und der Komplexität ist dieses Messhilfsmittel definitiv sehr gut. Erweiterbarkeit ist hier jedoch nicht gegeben. Der Gesamtplatzbedarf ist ebenfalls höher als bei dem entwickelten Manipulator. Das macht beim Arbeiten in der kleinen Zelle bereits große Unterschiede. Alles in allem hätte dieses Hilfsmittel laut Bewertung aus Kapitel 4.3 eher mäßig abgeschnitten. Es sei aber auch erwähnt, dass ein direkter Vergleich eigentlich nicht korrekt wäre, da dieser Körper gar kein Manipulator ist.



Abb. 49: Messpositionen eines Prüflings mit dem bisherigen Messhilfsmittel, Quelle: Eigene Darstellung.

Betrachtet man nun den entwickelten Manipulator, sieht man schon sehr deutlich, dass hier bereits optisch eine übersichtlichere und geordnetere Messung möglich ist. Das theoretische Funktionskonzept fruchtet und somit sollten wiederholbare Messungen möglich sein. Der einzige Kritikpunkt, bei dem dann erst Messungen Klarheit verschaffen können, ist die Tatsache des nicht normkonformen Messens. Dieser Punkt wird im nachfolgenden Unterkapitel untersucht.

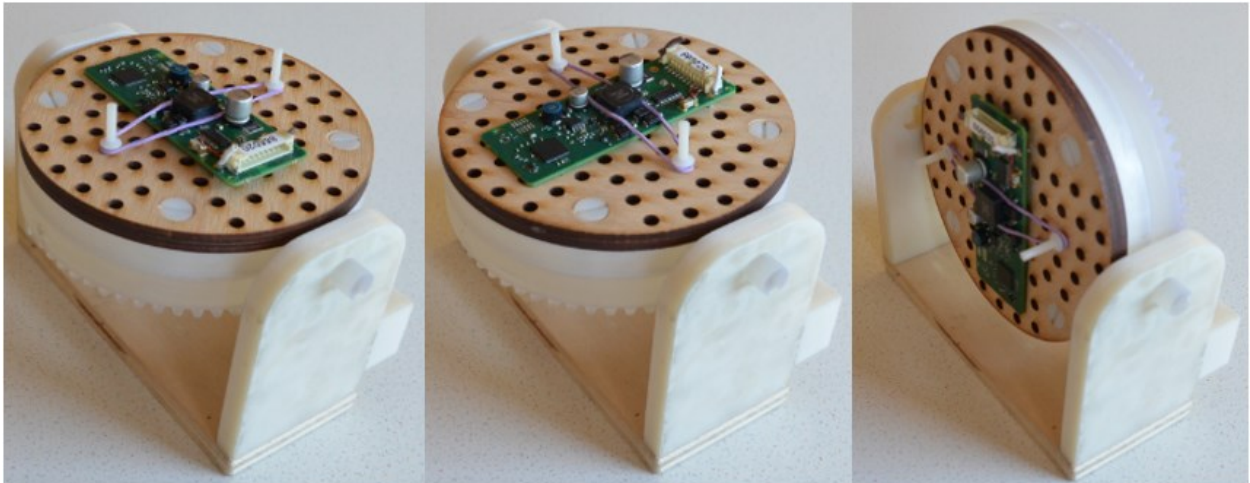


Abb. 50: Messpositionen eines Prüflings mit Manipulator, Quelle: Eigene Darstellung.

## 7.4 Performance des Manipulators

Nun sollen Messungen mit unterschiedlichen Prüflingen und den zuvor erwähnten Hilfsmitteln durchgeführt werden, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen. Dazu werden zwei unterschiedliche Prüflinge vermessen, um die Resultate abzusichern. Ein EUT hat die Optimierungsschleifen bereits absolviert und wurde auch in einer Akkreditierungsstelle geprüft. Somit können die Messergebnisse auch direkt mit den Ergebnissen der Messung dieser offiziellen Prüfstelle verglichen werden. Dadurch kann nicht nur eine Aussage getroffen werden, ob die Messungen vergleichbar sind, sondern auch, welche von ihnen näher an das Ergebnis der Prüfstelle kommt.

Als erster Prüfling wird ein  $\mu$ C-Board getestet. Hier weisen die Ergebnisse sehr geringe Abweichungen auf. Lediglich bei rund 40 kHz ist ein Peak bei der Messung mit dem Styroporaufbau höher als bei der Messung mit dem Manipulator. Die Ursache hierfür kann auch nach erneutem Vermessen des EUTs sowie Starten in einer alternativen Position des EUTs nicht festgestellt werden. Diese Spitze soll anschließend mit den Messungen der Prüfstelle abgeglichen werden.

Ein wichtiger Verbesserungswunsch seitens der FH, der sich während der Messungen zeigt, ist, dass eine Zugentlastung der Versorgungsleitung für das EUT sehr hilfreich wäre. Dies sollte ebenfalls bei einer neuen Version des Manipulators berücksichtigt werden.

Bei den Messungen sind in Rot die Grenzwerte, die die Norm erlaubt, miteingeblendet. Das heißt, wenn der Prüfling Werte unter dieser Schwelle erreicht, hätte er die EMV-Prüfung bestanden. Hier kann in der Software zwischen der amerikanischen und der europäischen Norm sowie zwischen unterschiedlichen Klassen gewählt werden. Klasse A besagt, dass das EUT eine vollständige Einheit bildet. Bei Klasse B bildet das EUT nur einen Teil einer Baugruppe und muss damit etwas strenger bewertet werden. Generell



kann festgehalten werden, dass die Grenzwerte bei der amerikanischen Norm etwas niedriger festgelegt sind als bei der Europa-Norm. In den Abbildungen ist die europäische Norm EN55022 mit der Klasse B eingeblendet, da das  $\mu$ C-Board diesen Bedingungen entspricht.

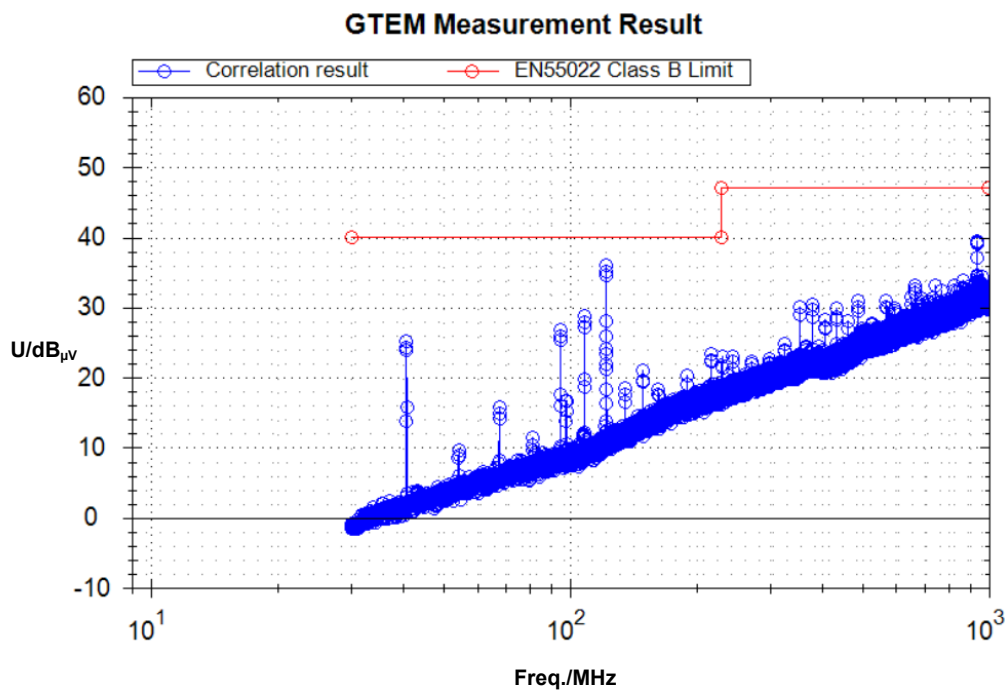


Abb. 51: Gesamtmessergebnis mit bisher verwendetem Messhilfsmittel, Quelle: Eigene Darstellung.

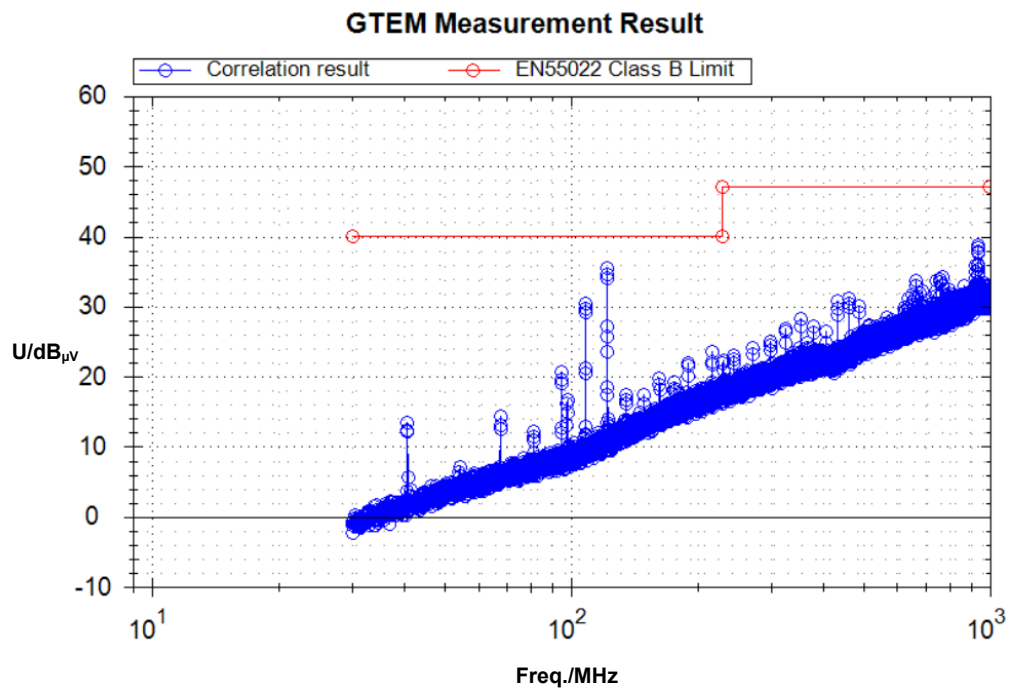


Abb. 52: Gesamtmessergebnis mit Manipulator, Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Ergebnisse sind sehr optimistisch zu betrachten, da sie sich sehr ähnlich sind. Aber um zu prüfen, ob sie nicht beide von der Realität abweichen, sollen diese nun mit den Störausstrahlungsmessungen von der Prüfstelle verglichen werden.

Bei den Messungen, welche beim Unternehmen EMV Testhaus GmbH durchgeführt wurden, wurde mit einigen unterschiedlichen Antennen gemessen. Hier soll nun das Ergebnis aus Messungen mit der Antenne 2010 als Vergleichsbasis für die Messungen mit der GTEM-Zelle herangezogen werden. Dieses Messergebnis ist in

Abb. 53 aufgezeigt. Was hierbei auffällt, ist, dass sich die Spitze der Messung bei 40 MHz mit dem ursprünglichen Messhilfsmittel besser mit der unteren Messung deckt. Der Frequenzbereich an sich muss jedoch nicht genauer hinterfragt werden, da dieser seitens der Akkreditierungsstelle bei der Messung als unkritisch bewertet wird.

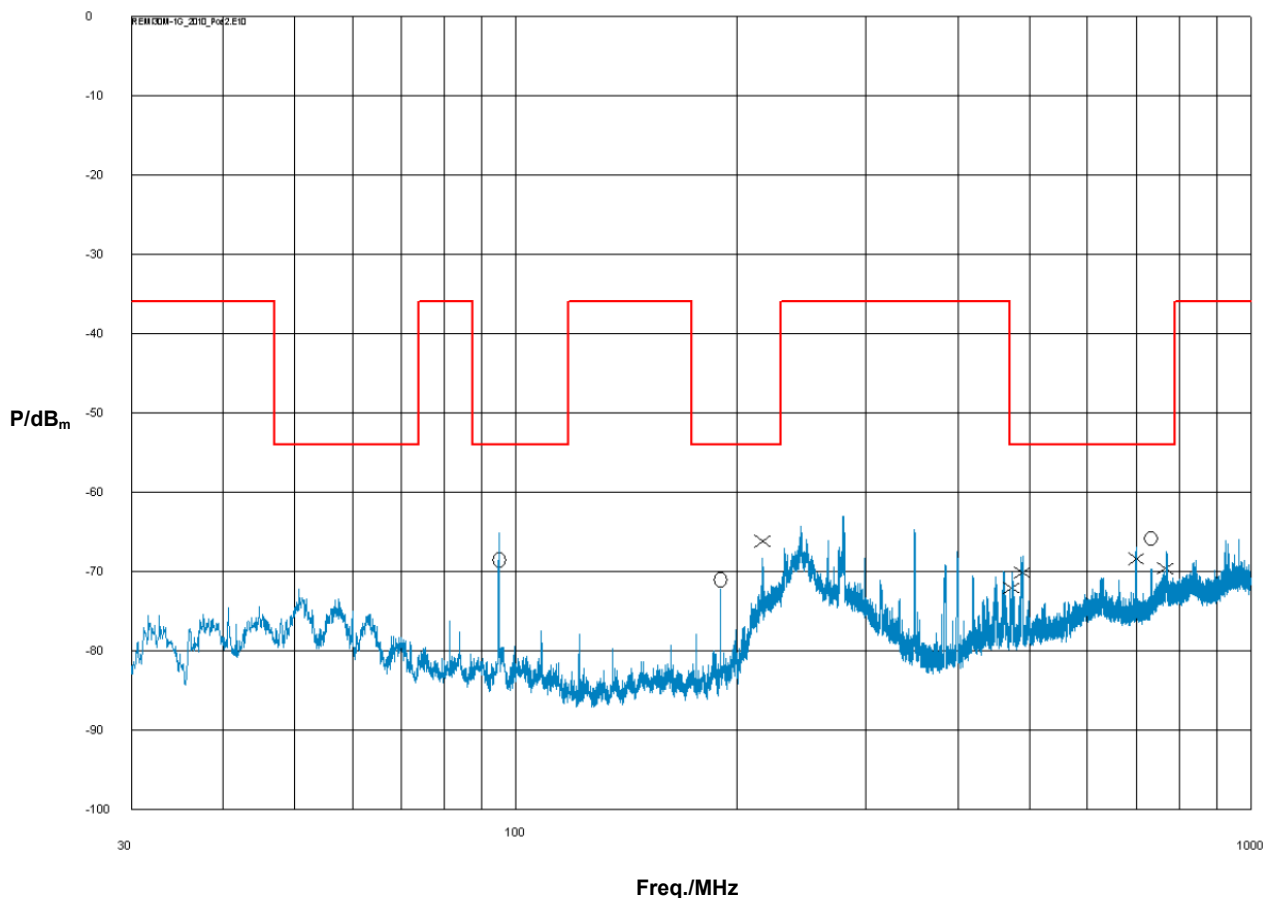


Abb. 53: Abgestrahlte Leistung des  $\mu$ C-Boards bei der Antenne 2010, Quelle: Testreport Multiantenna (2017), S. 48.

Die Werte sollten mit den Ergebnissen aus den GTEM-Messungen übereinstimmen. Dazu müssen sie umgerechnet werden, da die Antennenmessung mit 10 m durchgeführt wurde, die Korrelation bei der GTEM-Zelle jedoch mit 3 m erfolgt. Außerdem ist die Messung der GTEM-Zelle in  $\text{dB}_{\mu\text{V}}$  dargestellt und die Antennenmessung in  $\text{dB}_m$ . Die Schritte der Umrechnungen sollen nachfolgend erläutert werden.

Voraussetzung für die Umrechnung der Antennenmessung von 10 m auf 3 m ist die Annahme, dass bei 3 m noch die Bedingungen des Fernfeldes herrschen. Dadurch nimmt die Feldstärke linear zum Kehrwert des Messabstandes ab.

$$E(10 \text{ m}) = E(3 \text{ m}) - k \quad (7.1)$$

$E / \frac{\text{dB}_{\mu\text{V}}}{\text{m}}$	Feldstärke
$k / \text{dB}$	Korrekturwert

$$k = 20 \log(10 \text{ m} / 3 \text{ m}) = 10,45 \text{ dB} \quad (7.2)$$

Nun können zwar die Werte von der 10 m Antennenmessung auf die 3 m Messung umgerechnet werden, aber es gibt immer noch das Problem, dass die Antennenmessung in dB<sub>m</sub> gemessen wurde und die GTEM-Messung in dB<sub>μV</sub> gemessen wird. Hier gibt es bei 50 Ω einen Umrechnungsfaktor von ca. 107 dB. Das heißt, wenn man von dB<sub>m</sub> in dB<sub>μV</sub> umrechnen möchte, muss man +107 dB rechnen. Wie dieser Faktor zustande kommt, soll in der folgenden Umrechnung aufgezeigt werden:

Umrechnung in das dB-Verhältnis bei Leistungen:

$$P = 10 \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (7.3)$$

$P / \text{dB}_m$	Leistungsverhältnis
$p / \text{mW}$	Leistungswert
$p_0 / \text{mW}$	Referenzwert 1 mW

Umrechnung in das dB-Verhältnis bei Spannungen:

$$U = 20 \log_{10} \left( \frac{u}{u_0} \right) \quad (7.4)$$

$U / \text{dB}_{\mu\text{V}}$	Spannungsverhältnis
$u / \mu\text{V}$	Spannungswert
$u_0 / \mu\text{V}$	Referenzwert 1 μV

$$p = \frac{u^2}{Z_c} \rightarrow u = \sqrt{p Z_c} \quad (7.5)$$

$p / \text{W}$	Leistungswert
$u / \text{V}$	Spannungswert
$Z_c / \Omega$	Impedanz

Wie in Formel 7.3 ersichtlich, ist laut Definition 0 dB<sub>m</sub> als 1 mW festgelegt, da dies hier den Referenzwert darstellt. Setzt man nun diesen Wert von 1 mW in die Formel 7.5 ein, erhält man eine Referenzspannung von 0,2236 V bei 50 Ω.

$$u = \sqrt{0,001 \text{ W} * 50 \Omega} = 0,2236 \text{ V} \quad (7.6)$$

Setzt man diesen Wert nun wiederum in die Formel 7.4 als Spannungswert ein, ergibt sich daraus ein bei 50 Ω gültiger Umrechnungsfaktor von ca. 107 dB.

$$U = 20 \log_{10} \left( \frac{0,2236 \text{ V}}{0,000001 \text{ V}} \right) = 106,989 \text{ dB}_{\mu\text{V}} \quad (7.7)$$

Diese nachfolgende Tabelle zeigt den Vergleich der Antennenmessung zu den beiden GTEM-Messungen mit den bei der Antennenmessung auffälligen Frequenzen. Die Antennenmessung wird jedoch gleich in dB<sub>μV</sub> umgerechnet, damit eine direkte Vergleichbarkeit gegeben ist. Als Vergleichsbasis wird die Antennenmessung mit der Antenne 2010 herangezogen.

<b>f<sub>meas</sub>/ MHz</b>	<b>Antenne V<sub>meas</sub>/ dB<sub>μV</sub></b>	<b>GTEM Setup Old V<sub>meas</sub>/ dB<sub>μV</sub></b>	<b>Differenz/ dB<sub>μV</sub></b>	<b>GTEM Setup New V<sub>meas</sub>/ dB<sub>μV</sub></b>	<b>Differenz/ dB<sub>μV</sub></b>
94,92	27,98	26,85	1,13	20,71	7,27
189,84	25,52	20,29	5,23	21,84	3,68
216,96	30,38	23,37	7,01	23,53	6,85
473,28	24,48	25,01	-0,53	24,08	0,40
489,84	26,41	25,27	1,14	23,27	3,14
699,72	28,13	27,56	0,57	28,29	-0,16
731,82	30,73	28,70	2,03	28,16	2,57
766,62	26,92	28,49	-1,57	29,18	-2,26

Tab. 5: Vergleich der unterschiedlichen Messungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Tabelle zeigt, dass beide Messungen mit der GTEM-Zelle sowohl untereinander als auch mit der Antennenmessung vergleichbar sind. Somit ist der Manipulator als Hilfswerkzeug für zukünftige Messungen an der Fachhochschule hervorragend geeignet.

Dieses Ergebnis kann auch mit der Messung mit dem zweiten Prüfling bestätigt werden. Auch hier sind die Messergebnisse absolut vergleichbar. Damit werden die ersten Messungen noch einmal bestätigt und es kann davon ausgegangen werden, dass sich zukünftige Messungen ähnlich positiv verhalten werden.

## 8 ZUSAMMENFASSUNG

Die Motivation dieser Masterthesis ist die Lösung einer vorhandenen Problemstellung. Auf der Suche nach einem geeigneten Thema für die Abschlussarbeit ist die FH mit einer möglichen Aufgabenstellung an den Studierenden herantreten. Sie hat die Problemstellung, dass es derzeit für die Mitarbeiter der FH eher schwierig ist, eine genaue und reproduzierbare Messung mit ihrer GTEM-Zelle durchzuführen. Das kommt daher, dass die Zelle der FH ein verhältnismäßig kleines Modell ist und es für diese keine geeigneten Manipulatoren zu kaufen gibt. Daraus ergibt sich die Möglichkeit für den Studierenden, dieses Problem zu betrachten und eine Abhilfemaßnahme zu finden.

In einem ersten Startgespräch mit Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Pauritsch werden die Randbedingungen diesbezüglich geklärt. Es gibt nur wenige Vorgaben und somit kann eine kreative Lösung gefunden werden. Randbedingungen sind, dass der Manipulator sowohl manuell als auch automatisiert funktionieren soll, wobei die Automation nicht sofort erfolgen muss. Dennoch soll sie in der Entwicklungsphase bereits berücksichtigt werden. Das Problem soll von der elektrotechnischen Seite aus untersucht werden, da der Manipulator die Ergebnisse von späteren Messungen nicht bzw. möglichst geringfügig beeinflussen soll. Der Manipulator soll den Prüfling um 90° drehen und schwenken können. Dies deckt sich nicht mit den in der Norm angeforderten orthogonalen Drehungen. Darum soll auch gezeigt werden, dass die vereinfachte Drehung das Ergebnis nicht negativ beeinflusst. Bei der Zelle selbst soll bei einer notwendigen Modifikation, wie z.B. die Montage des Manipulators, nur die Türe am Zellenboden bearbeitet werden. Der Rest der Zelle darf nicht verändert werden. Die Prüflinge, die geprüft werden sollen, sind max. 15 x 15 cm<sup>2</sup> groß. Der Manipulator soll ähnlich große oder geringfügig kleinere EUTs vermessen können. Alle weiteren Anforderungen ergeben sich aus den Zellenmaßen oder müssen erst im Laufe der Thesis erarbeitet werden. Die Klärung dieser Aspekte sowie die generelle Einleitung erfolgen in Kapitel 1.

In Kapitel 2 startet dann der Theorieteil der Arbeit. Hierbei wird, um ein grundlegendes Verständnis für die Anforderungen und die Vorgehensweise zu schaffen, die elektromagnetische Verträglichkeit im Allgemeinen untersucht. Es werden Grundlagen wie das Begriffspaar Störquelle und Störsenke oder auch der Unterschied zwischen Emission und Immission geklärt. Es wird ebenfalls aufgezeigt, ab wann EMV in einer Entwicklung beleuchtet werden sollte. Weitere wichtige Punkte wie die vier grundlegenden Kopplungsarten, Gleichtakt- und Gegentaktstörungen und das Nahfeld bzw. Fernfeld werden behandelt. Die elektromagnetische Schirmung wird am Rande betrachtet, da auch diese für das Verständnis eine übergeordnete Rolle spielt. Zum Schluss des Kapitels widmet man sich auch den gesetzlichen Aspekten des Themas EMV. Hierbei wird versucht, Licht ins Dunkel der Vielzahl an Gremien und Instituten zu bringen.

Im Kapitel „Messmöglichkeiten“ stehen die unterschiedlichen Messgeräte, mit denen man die elektromagnetische Verträglichkeit evaluieren kann, im Fokus. Das ist wichtig, um den Bezug von einer GTEM-Zelle zu anderen Messmethoden herstellen zu können, da diese in der Praxis häufig verglichen werden. Diesbezüglich ist natürlich die Freifeldmessung von besonderer Bedeutung, da beim Messen mit der GTEM-Zelle direkt mit der Freifeldmessung korreliert wird. Die verschiedenen Möglichkeiten der Freifeldmessung werden dargelegt und ihre Vor- und Nachteile aufgezeigt. Danach werden die Voll- und Semiabsorberkammer behandelt. Diese sind in der Praxis ein starker Konkurrent zu GTEM-Zellen. Auch hier werden die Funktionsweise, Einsatzgebiete sowie Vor- und Nachteile aufgezeigt. Nach der

Absorberkammer wird zur Ergänzung auch die Modenverwirbelungskammer betrachtet. Danach geht der Fokus zur GTEM-Zelle über. Da die GTEM-Zelle eine Weiterentwicklung der TEM-Zelle ist, wird zuerst auch diese Messzelle untersucht. Die GTEM-Zelle wird dann detaillierter untersucht als die anderen Messmöglichkeiten. Hier werden der Aufbau, die Funktionsweise, die Korrelation zur Freifeldmessung, die Messfehler und Messunsicherheiten und die Vor-/Nachteile umfangreich behandelt.

Nachdem die theoretischen Aspekte geklärt sind, wird eine Marktrecherche bereits existierender, größerer Systeme durchgeführt. Hierbei werden 6 unterschiedliche Manipulatormodelle vorgestellt und ihre Eigenschaften und Funktionsweisen untersucht. 4 dieser Modelle werden anschließend evaluiert. Dies erfolgt über eine Bewertungsmatrix, in der unterschiedlich wichtige Entwicklungseigenschaften unterschiedlich stark gewichtet und bewertet werden. Das hat den Zweck, herauszufinden, auf welche Ideen aufgebaut werden kann und welche Arbeitsprinzipien auch für eine kleine Version anwendbar wären.

Mit dem zuvor erwähnten Wissen ist es möglich, mit der Konstruktion des Manipulators zu starten. Die Erkenntnisse aus den Vorkapiteln werden nun in eine Konstruktion umgesetzt. Die Vorgehensweise beim Konstruieren ist so aufgebaut, dass für unterschiedliche Features des Manipulators eigene Konzepte entwickelt werden, die am Schluss miteinander fusioniert werden sollen. So wird für die automatisierte Bewegung, die manuelle Bewegung und die Montageplatte ein eigenes Konzept entwickelt. Die Einzelfunktionen werden dann noch zu einem großen Ganzen zusammengefügt. Die Teiloperationen werden Schritt für Schritt erläutert, damit sie später auch genau nachvollzogen werden können.

In Kapitel 6 werden die Einzelteile gefertigt bzw. der Prototyp zusammengebaut. Das Kapitel ist in die Bereiche des 3D-Druckes, des Ausschneidens der Montageplatte mit einem Lasercutter und des eigentlichen Zusammenbaus eingeteilt. Im Laufe dieses Kapitels werden einige Verbesserungspotentiale aufgedeckt und niedergeschrieben. Diese können dann bei einer möglichen zweiten Generation des Manipulators berücksichtigt werden.

Ist der Prototyp zusammengebaut, funktionsfähig und einsatzbereit, soll mit diesem gezeigt werden, dass Messungen nun leichter und genauer durchgeführt werden können. Dazu werden, nachdem der Prüfaufbau festgelegt und dokumentiert ist, unterschiedliche Messungen durchgeführt. Zuerst werden Messungen mit einer leeren Zelle und nur mit dem Manipulator in der Zelle durchgeführt. Hier soll gezeigt werden, dass das Material des Manipulators selbst keine Einflüsse auf eine Messung hat. Ein Detail, welches hier ebenfalls aufgezeigt wird, ist, dass die Zelle nicht zu 100 Prozent dicht ist und es kleine Einflüsse von außen gibt. Nach diesen beiden Messungen werden die Messhilfsmittel verglichen. Es werden das bisherige Messhilfsmittel und der neue Manipulator betrachtet. Das bis jetzt verwendete Hilfsmittel, das ein Styroporaufbau ist, ermöglicht eine ungenaue, jedoch normgerechte Positionierung des EUTs. Mit dem neuen Manipulator kann man zwar nicht alle in der Norm abverlangten Positionen genau erreichen, dafür ist die Prüflingsposition sehr genau. Nun soll bewiesen werden, dass der neue Manipulator absolut vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse, im Vergleich zum bisherigen Messhilfsmittel, liefert. Dazu werden unterschiedliche EUTs einmal mit dem alten Setup und einmal mit dem neuen Setup vermessen und die Ergebnisse miteinander verglichen. Ein EUT, das vermessen wird, hat auch schon einen Test einer akkreditierten Prüfstelle absolviert. Somit können die Ergebnisse daraus ebenfalls mitbetrachtet und in den Vergleich der Varianten miteinbezogen werden. Mit diesen Messungen wird endgültig aufgezeigt, dass die Entwicklung ein Erfolg ist.

Im letzten Kapitel der Arbeit werden die wichtigsten Erkenntnisse und Verbesserungsmöglichkeiten, die im Laufe der Thesis entdeckt wurden, noch einmal zusammengefasst. Außerdem werden alle Aspekte, die für die Automatisierung notwendig sind, aufgezeigt. Dies erleichtert Personen, die sich mit der Weiterentwicklung eines solchen Manipulators beschäftigen möchten, die Arbeit ungemein.

## 9 ERKENNTNISSE UND AUSBLICK

Zum Abschluss der Thesis sollen alle wichtigen Erkenntnisse und Optimierungsaspekte, die im Verlauf der Arbeit gewonnen wurden, zusammengefasst werden. Dieses Kapitel stellt eine Hilfestellung für diejenigen dar, die auf die Arbeit aufsetzen oder den vorhandenen Prototyp weiter verbessern möchten.

### 9.1 Erkenntnisse aus der Arbeit

Aus den Theoriekapiteln zu Beginn der Arbeit kann bereits wichtiges Grundlagenwissen gewonnen werden. Für Personen, die in diesem Themenbereich bereits ein Basiswissen vorweisen können, ist das erste wichtige Ergebnis in Tabelle 3 zusammengefasst. Hier ist ersichtlich, wie wichtig einzelne Aspekte für die Entwicklung sind. Die Gewichtung ist zwar immer subjektiv, es wurde aber seitens des Autors versucht, das Wissen aus den Theoriekapiteln mit in diese Bewertung einfließen zu lassen. Als wichtige Punkte sollen hier noch einmal das Material des Manipulators, die Höhe und die Positioniergenauigkeit bezüglich der Wiederholbarkeit erwähnt werden.

Die meisten Verbesserungsvorschläge können im Bereich der Konstruktion und des Zusammenbaus gewonnen werden. Bei einem erneuten Druck kann beispielsweise genauer konstruiert werden. Bei dem ersten Prototyp wurden die Passungen nicht genau gedruckt, sondern etwas größer, um auf Nummer sicher zu gehen. Das wäre grundsätzlich kein Problem, da sich das Material relativ einfach nachbearbeiten lässt, aber bei einigen Bewegungen, wie zum Beispiel der Drehbewegung, bringt dies Nachteile mit sich. Da es nicht möglich ist händisch so genau zu schleifen, passt das Kegelrad nicht ganz exakt durch den Schwenkring und dadurch ruckelt es leicht beim Drehen. Dieses Verhalten könnte durch eine exakte Konstruktion sicher verbessert werden.

Es sollten auch bereits bei der Konstruktion leichte Radien an allen Kanten, welche mit dem FDM-Drucker gefertigt werden, angebracht werden. Dies bringt optische Vorteile und man erspart sich ein späteres Entgraten der Teile.

Ebenfalls ist es wichtig, bei einer erneuten Fertigung der Montageplatte die Unterseite dieser wieder zu lackieren. Dies verbessert die Gleiteigenschaften um ein Vielfaches.

Die Bohrungen an den Seitenteilen, die aufgrund des FDM-Verfahrens nicht gut mitgedruckt werden können, sollten dennoch mit einer mitkonstruierten Einkerbung versehen werden. Somit hat man dann beim Bohren die genaue Position der Bohrung bereits vorgegeben.

Beim Druck des getriebenen Kegelrades sind, wie in Kapitel 6.3 beschrieben, qualitative Mängel vorhanden. Diese leichten Ausbrüche sollten definitiv in einem späteren Dauertest abgesichert werden. Alternativ könnte man versuchen, das Tellerrad beim Drucken etwas anders zu positionieren bzw. auch ein anderes Material zu verwenden, das etwas weicher und dehnbarer ist.

Bei ersten Bewegungsversuchen mit dem Manipulator ging hervor, dass die Einkerbungen, in die das Rastelement sitzt, eventuell etwas zu tief sind. Hier ist der Kraftaufwand für das Herausdrehen zu groß. Dies sollte ebenfalls konstruktiv berücksichtigt werden.



Bei den Tests in der Zelle kam das Thema einer Zugentlastung für die Versorgungsleitung des EUTs auf. Dies ist ein Punkt, welcher das Arbeiten mit dem Manipulator enorm vereinfachen würde und somit definitiv nicht vernachlässigt werden sollte.

### **9.2 Ausblick**

Die nächsten Schritte nach dieser Arbeit sind, die zuvor erwähnten Verbesserungspunkte in die Konstruktion einfließen zu lassen. Dann könnte ein neuer, verbesserter Prototyp gefertigt und zusammengebaut werden. Mit diesem sollte zukünftig ein sehr komfortables Arbeiten möglich sein.

Ein weiterer Folgeschritt, welcher definitiv vorgenommen werden sollte, ist die Automatisierung des Systems. Da der Manipulator bereits für die Automatisierung vorbereitet ist, ist der Aufwand für das Vorhaben überschaubar. Zunächst müsste man geeignete Motoren finden und überlegen, wie man diese auf der Außenseite der Zelle befestigt. Hat man passende Motoren ausgewählt, kann man, je nach Parameter dieser, eine Übersetzung für die einzelnen Bewegungen definieren. Ist dies geschehen, könnten die entsprechenden Antriebsräder konstruiert und gedruckt werden. Dann bräuchte man noch passende Zahnriemen. Diese Elemente müssten dann zusammengebaut werden. Zum Schluss gibt es noch die Aufgabe, die Motoren noch anzusteuern. Hierbei könnte man eventuell auf eine fertige Servoansteuerung oder etwas Ähnliches zurückgreifen. Eventuell ist es auch notwendig, die Rastelemente, die für den manuellen Betrieb notwendig sind, zu entfernen, um die Bewegungen zu erleichtern. Mit diesen Schritten sollte eine Automatisierung gänzlich abgedeckt sein.

Die FH Campus 02 GmbH ist sehr mit dem Ergebnis der Masterarbeit zufrieden und hat das Potential des Manipulators erkannt. Daher soll dieses Projekt weitergeführt werden. Die obigen Schritte sollen bereits in nächster Zeit erfolgen. Nach Absprache wurde beschlossen, dass das Optimieren des Manipulators bezüglich Funktionalität vom Autor der Arbeit durchgeführt wird. Die weiteren Schritte werden dann Mitarbeiter der Fachhochschule durchführen.

## LITERATURVERZEICHNIS

### Gedruckte Werke (13)

Technische Universität Hamburg-Harburg Gonschorek, Karl; Singer, Hermann (Hrsg.) (1992):

*Elektromagnetische Verträglichkeit : Grundlagen, Analysen, Maßnahmen*, B. G. Teubner, Stuttgart

Christopoulos, Christos (2007): *Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility*, Second Edition Auflage, Taylor & Francis Group, Boca Raton

Clay, Stephen (1998): *Improving the Correlation between OATS, RF Anechoic Room and GTEM Radiated Emissions Measurements for Directional Radiators at Frequencies between approximately 150 MHz and 10 GHz*, 2. Auflage, veröffentlicht in: *Electromagnetic Compatibility*, IEEE International Symposium, Denver, Colorado USA

Franz, Joachim (2013): *EMV - Störungssicherer Aufbau elektronischer Schaltungen*, 5. erweiterte und überarbeitete Auflage, Springer Vieweg, Springe

Gonschorek, Karl-Heinz (2005): *EMV für Geräteentwickler und Systemintegratoren*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Dresden

Montrose, Mark.; Nakauchi, Edward (2004): *Testing for EMC compliance - Approaches and Techniques*, IEEE Press, Piscataway

Morgan, David (2007): *A Handbook for EMC Testing and Measurement*, The Institution of Engineering and Technology, London, UK

Ngu, Xavier (2009): *Dissertation: An assessment of a GTEM cell as a test environment using measurements and simulations*, University of Nottingham, Nottingham

Nothofer, Angela; Alexander, Martin; Bozek, Didier; Marvin, Andy; McCormack, Les (2003): *The Use of GTEM Cells for EMC Measurements - Measurement Good Practice Guide No. 65*, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK

Richter, Henning (2007): *Diplomarbeit: "Vergleich des 10 m- Referenzfreifeldmessplatzes mit alternativen Methoden zur Ermittlung feldgebundener elektromagnetischer Störgrößen"*, Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin

Rodewald, Arnold (2000): *Elektromagnetische Verträglichkeit: Grundlagen - Praxis*, 2. verbesserte und erweiterte Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, Reinach

Schwab, Adolf; Kürner, Wolfgang (2011): *Elektromagnetische Verträglichkeit*, 6., bearbeitete und aktualisierte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Karlsruhe

Wolfsperger, Hans (2008): *Elektromagnetische Schirmung - Theorie und Praxisbeispiele*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Bad Aibling

### Online-Quellen (9)

Frankonia (2017): [www.frankoniagroup.com](http://www.frankoniagroup.com)

<http://frankonia-solutions.com/portfolio/fac-3-for-iec-en-testing/> [Stand: 28.11.2017]

ETS-Lindgren (2017): [www.ets-lindgren.com](http://www.ets-lindgren.com)

<https://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0ahUKEwihuen62eHXAhXCwKQKHZTJCplQFgg1MAI&url=http%3A%2F%2Fwww.mdltechnologies.co.uk%2Ftechnical-docs%2F5402-GTEM-Test-Cell.pdf&usg=AOvVaw2UcjpVO56qFhs8EWZmc4U5> [Stand: 28.11.2017]

ETS-Lindgren (2013): <http://www.ets-lindgren.com>

[https://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwi-tpjK2uHXAhWMmbQKHwD3oQFggnMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.altoo.dk%2Fcosmoshop%2Fdefault%2Fartikelpdf%2FETS-5411\\_en.pdf&usg=AOvVaw23eEPXZuDFPaYvQPXvdD-W](https://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwi-tpjK2uHXAhWMmbQKHwD3oQFggnMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.altoo.dk%2Fcosmoshop%2Fdefault%2Fartikelpdf%2FETS-5411_en.pdf&usg=AOvVaw23eEPXZuDFPaYvQPXvdD-W) [Stand: 28.11.2017]

Elesa+Ganter Austria GmbH (2017): [www.elsa-ganter.at](http://www.elsa-ganter.at)

<https://www.elsa-ganter.at/produkte/rastelemente/serien/gn-614> [Stand: 28.11.2017]

Essentra Components (2017): [www.essentracomponents.at](http://www.essentracomponents.at)

<http://www.essentracomponents.at/losbare-nieten-373905> [Stand: 28.11.2017]

Teseq AG (2014): [www.teseq.com](http://www.teseq.com)

[www.teseq.com/products/downloads/datasheet/MPH\\_MPC.pdf](http://www.teseq.com/products/downloads/datasheet/MPH_MPC.pdf) [Stand: 28.11.2017]

Igus (2017): [www.igus.at](http://www.igus.at)

[http://www.igus.at/wpck/1958/iglidur\\_polysorb](http://www.igus.at/wpck/1958/iglidur_polysorb) [Stand: 28.11.2017]

Amtsblatt, Europäische (2014): [www.eur-lex.europa.eu](http://www.eur-lex.europa.eu)

[eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0030&from=DE](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0030&from=DE) [Stand: 28.11.2017]

Klink, Andreas (2011): [www.datatec.de](http://www.datatec.de)

[www.datatec.de/webshop/M-Days/GTEM-Zellen-Teseq-Seminar-Okt-2011.pdf](http://www.datatec.de/webshop/M-Days/GTEM-Zellen-Teseq-Seminar-Okt-2011.pdf) [Stand: 28.11.2017]

## **Normen (1)**

EMV Testhaus, GmbH (Hrsg.) (2017): *Testreport Multiantenna: EMV Testhaus - RF test report 170186-AU01+W01*

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abb. 1: GTEM-Zelle der FH Campus 02 GmbH, Quelle: ETS-Lindgren (2013), Online-Quelle [28.11.2017], S. 1. ....	3
Abb. 2: Beeinflussungsmodell der elektromagnetischen Verträglichkeit, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 3. ....	5
Abb. 3: Kostenvergleich zwischen vorbeugender und normaler Entwicklung bezüglich EMV, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 6. ....	6
Abb. 4: Einordnung der Störsenke in ihrer Umwelt, Quelle: Rodewald (2000), S. 21. ....	7
Abb. 5: Beeinflussungswege der Kopplungsarten, Quelle: Rodewald (2000), S. 16. ....	8
Abb. 6: Prinzip der galvanischen Kopplung, Quelle: Gonschorek (2005), S. 82. ....	9
Abb. 7: Prinzip der kapazitiven Kopplung, Quelle: Rodewald (2000), S. 88. ....	10
Abb. 8: Induktive Kopplung zwischen zwei Stromkreisen, Quelle: Gonschorek (2005), S. 90. ....	10
Abb. 9: Ersatzschaltbild der induktiven Kopplung, Quelle: Gonschorek (2005), S. 91. ....	11
Abb. 10: Prinzip der Strahlungskopplung, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 29. ....	11
Abb. 11: Definition von Gegentaktstörungen, a) in nicht geerdeten Stromkreisen, b) in symmetrisch betriebenen Stromkreisen, c) in unsymmetrisch betriebenen Stromkreisen, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 33. ....	12
Abb. 12: Schema der Bildung von Gleichtaktströmen, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 35. ....	13
Abb. 13: TEM-Welle mit resultierendem Poynting Vektor, Quelle: Klink (2011), Online-Quelle [28.11.2017], S. 9. ....	16
Abb. 14: Übergang von Nah- auf Fernfeld, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 204. ....	17
Abb. 15: Die wichtigsten Normungsorganisationen bezüglich EMV im Überblick, Quelle: Rodewald (2000), S. 29. ....	19
Abb. 16: Auswahlverfahren der Normklassen, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 469. ....	20
Abb. 17: CE-Kennzeichen und Designhilfe, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 475. ....	21
Abb. 18: Aufbau eines Freifeldmessplatzes, Quelle: Montrose/Nakauchi (2004), S. 79. ....	23
Abb. 19: Vollabsorberraum mit einlegbaren Absorberplatten, Quelle: Frankonia (2017), Online-Quelle [28.11.2017]. ....	25
Abb. 20: Innenraum einer Modenverwirbelungskammer, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 229. ....	27
Abb. 21: Schematischer Aufbau einer klassischen Crawford-Zelle, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 231. ....	28
Abb. 22: Störung des TEM-Modus in TEM-Zellen bei hohen Frequenzen, Quelle: Schwab/Kürner (2011), S. 232. ....	28

Abb. 23: Feldausbreitung in einer GTEM-Zelle, Quelle: Klink (2011), Online-Quelle [28.11.2017], S. 14.	30
Abb. 24: Seiten, an denen in der normgerechten Methode gemessen werden muss, Quelle: Klink (2011), Online-Quelle [28.11.2017], S. 37.	31
Abb. 25: Berechnung zum Vergleich mit der Freifeldmessung, Quelle: Klink (2011), Online-Quelle [28.11.2017], S. 38.	32
Abb. 26: Manueller MPH-Manipulator der Firma Teseq, Quelle: Teseq AG (2014), Online-Quelle [28.11.2017], S. 1 (leicht modifiziert).	35
Abb. 27: Gesteuerter MPC-Manipulator der Firma Teseq, Quelle: Teseq AG (2014), Online-Quelle [28.11.2017], S. 2.	36
Abb. 28: Manueller Manipulator der Firma ETS-Lindgren, Quelle: ETS-Lindgren (2013), Online-Quelle [28.11.2017], S. 60.	37
Abb. 29: Erster eigener Entwurf aus einem Brainstorming, Quelle: Eigene Darstellung.	38
Abb. 30: XYZ-Manipulator-Modell von Xavier Toh Ik Ngu, Beng, Quelle: Ngu (2009), S. 252.	39
Abb. 31: Konzept für die Schwenkbewegung mit einem Riementrieb, Quelle: Eigene Darstellung.	46
Abb. 32: Dreh-Schwenkkonzept mit einem Hypoidgetriebe, Quelle: Eigene Darstellung.	47
Abb. 33: Dreh-Schwenkkonzept mit einem Kegelradgetriebe, Quelle: Eigene Darstellung.	48
Abb. 34: Kunststoffellerfedern der Firma Igus, Quelle: Igus (2017), Online-Quelle [28.11.2017].	48
Abb. 35: Geeignete Rastelemente des Unternehmens Elesa+Ganter Austria GmbH, Quelle: Elesa+Ganter Austria GmbH (2017), Online-Quelle [28.11.2017].	49
Abb. 36: Schnittbild des Rastelements, Quelle: Elesa+Ganter Austria GmbH (2017), Online-Quelle [28.11.2017] (leicht modifiziert).	49
Abb. 37: Mögliche Umsetzung des manuellen Betriebes mit Rastelementen, Quelle: Eigene Darstellung.	50
Abb. 38: Mögliches Design der Montageplatte, Quelle: Eigene Darstellung.	51
Abb. 39: Spreizniete SR 1963 (links) und lösbare Niete (rechts), Quelle: Essentra Components (2017), Online-Quelle [28.11.2017].	52
Abb. 40: Unterseite des Manipulators, Bodentüre der Zelle in Blau, Quelle: Eigene Darstellung.	53
Abb. 41: Risse sowie Abbildung des konstruierten Manipulators, Quelle: Eigene Darstellung.	56
Abb. 42: Potentielle Kollision bei zu niedriger Montageplatte, Quelle: Eigene Darstellung.	59
Abb. 43: Zusammengebauter Manipulator, Quelle: Eigene Darstellung.	61
Abb. 44: Verwendetes Messsetup, Quelle: Eigene Darstellung.	62
Abb. 45: Visualisierung zum Einstellen von Parametern und zur Arbeitserleichterung, Quelle: Eigene Darstellung.	63

Abb. 46: Messung ohne Manipulator und leerer Zelle, Quelle: Eigene Darstellung. ....	64
Abb. 47: Messung mit Manipulator und leerer Zelle, Quelle: Eigene Darstellung.....	64
Abb. 48: Styropormesshilfsmittel, Quelle: Eigene Darstellung .....	65
Abb. 49: Messpositionen eines Prüflings mit dem bisherigen Messhilfsmittel, Quelle: Eigene Darstellung. .....	65
Abb. 50: Messpositionen eines Prüflings mit Manipulator, Quelle: Eigene Darstellung. ....	66
Abb. 51: Gesamtmessergebnis mit bisher verwendetem Messhilfsmittel, Quelle: Eigene Darstellung. ....	67
Abb. 52: Gesamtmessergebnis mit Manipulator, Quelle: Eigene Darstellung. ....	67
Abb. 53: Abgestrahlte Leistung des $\mu$ C-Boards bei der Antenne 2010, Quelle: Testreport Multiantenna (2017), S. 48. ....	68

## TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Zusammenfassung der Messergebnisse bei linearem Versatz des EUTs, Quelle: Nothofer/Alexander/Bozek/Marvin/McCormack (2003), S. 29. ....	33
Tab. 2: Messunsicherheiten der abgestrahlten Feldstärke in GTEM-Zellen, Quelle: Nothofer/Alexander/Bozek/Marvin/McCormack (2003), S. 30 (leicht modifiziert).....	34
Tab. 3: Auswertung der Manipulatormodelle, Quelle: Eigene Darstellung. ....	42
Tab. 4: Stückliste des Manipulators sowie Wartezeiten, Quelle: Eigene Darstellung.....	57
Tab. 5: Vergleich der unterschiedlichen Messungen, Quelle: Eigene Darstellung. ....	70