\newpage

**\chapter{Messungen}**

**\label{sec:Messung}**

**\section{Messsystem}**

Um das produzierte Funktionsmuster zu analysieren und auszumessen werden verschiedene Messsysteme benötigt. Unteranderem StarLab für die elektromagnetische Feldmessungen von strahlenden Körpern zum Einsatz, damit ist es möglich die elektromagnetische Feldstärke eines strahlenden Körpers zu messen und daraus kann auf das Fernfeld geschlossen werden. Weiter wird ein Netzwerkanalysator zur Bestimmung der Impedanz von Antennen und die Aufnahme der Streuparameter der Antennen eingesetzt. Die beiden Messgeräte und deren Verwendung werden im Kommenden Kapitel genauer augezeigt.\\

**\subsection{StarLab}**

Das Messsystem StarLab der \textit{mvG microwave vision Gruppe} ermöglicht das Messen von Antennen und strahlenden Körpern. Es ist ein Messsystem für Hochfrequenzsysteme, die im Mikrowellenbereich strahlen. Das System misst Antennen im Zylinder- und Kugelkoordinatensystem. Misst das System das elektromagnetische Feld eines Körpers im Zylinderkoordinatensystem, so wird ein Testobjekt auf einem motorisierten Schlitten durch die Mitte des StarLab gezogen. Dabei zeichnen die 12 im Kreis angeordneten Kreuzantennen das abgestrahlte elektromagnetische Feld auf.

Wird das von einem Testobjekt abgestrahlte elektromagnetische Feld im Kugelkoordinatensystem aufgenommen, wird das Testobjekt im Zentrum der Messapparatur platziert. Der Drehteller, auf dem sich das Testobjekt befindet, kann sich während eines Messzyklus um 360 Grad drehen.

Das StarLab Messsystem besteht aus zwei Einheiten. Die erste Einheit ist die Messapparatur. Diese beinhaltet zwölf kreuzförmige, im Kreis angeordnete Antennen, welche im orangen Kreis um das Messobjekt angebracht sind. Die Antennen sind alle ins Zentrum gerichtet und zwischen ihnen liegen je 22.5 Grad. Das gibt eine Abdeckung von 270 Grad. In Zentrum des Messsystems ist eine Testplattform. Diese wird von einem Schrittmotor angetrieben. Dies ermöglicht, dass das elektromagnetische Feld eines Testobjekts aus allen Richtungen aufgezeichnet werden kann. Der Frequenzgenerator des StarLab weisst einen Frequenzbereich von 650 MHz bis 6 GHz. Ein Testobjekt darf maximal einen Durchmesser von 45 cm aufweisen.

Die Absorberkegel sind neben dem orangen Messring befestigt. Diese Kegel verhindern Reflektionen der elektromagnetischen Wellen, da ansonsten nicht nur die primäre Abstrahlung des Testobjekts, sondern ein Gemisch aus Abstrahlung und Reflexionen aufgezeichnet wird. Aus demselben Grund können die beiden Öffnungen der Messapparatur mit Absorberpanels verschlossen werden. Die Abbildung \ref{fig:StarLab} zeigt ein Messobjekt im Zentrum der Messapparatur.

Das Messobjekt wird mit Polystyrol angehoben, damit das Testobjekt genau in der Mitte der Messapparatur platziert werden kann. Polystyrol hat nur minimalen Einfluss auf die elektromagnetischen Wellen und ist daher geeignet, um Objekte zu stützen und positionieren. Ein weiterer Vorteil des Polystyrols ist das geringe Gewicht von $1.05 g/cm^3$. Die maximale Last, bestehend aus Drehteller und Testobjekt, darf 10 kg nicht überschreiten. Zudem besitzt das Polystyrol eine sehr tiefe Dielektrizitätskonstante. Sie beträgt $\varepsilon\_r=1.03$ bei 50 Hz. Im Vergleich hierzu besitz das als ideal betrachtete Vakuum ein $\varepsilon\_r=1$ bei 50 Hz. Der Verlustwinkel bei 1 MHz ist ebenfalls sehr klein mit $0.05\*10^-3$.

\cite{StarLab,Polystyrol\_Datenblatt,WikiPermitt}

%Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Permittivität

%Quelle: http://www.kern.de

\begin{figure}[!h]

\centering

**\includegraphics**[width=8cm]{content/bilder/Implementierung/StarLab.JPG}%

\caption{StarLab mit Testgerät auf Messplatform}

**\label{fig:StarLab}**

\end{figure}

**\subsection{Netzwerkanalysator}**

Ein Netzwerkanalysator wird in der Elektronik, der Nachrichtentechnik und besonders in der Hochfrequenztechnik eingesetzt. Seine Aufgaben umfassen das Aufnehmen der Streuparameter (S-Parameter), also Reflexion und Transmission von elektrischen Signalwellen an Messobjekten. Der Netzwerkanalysator zeichnet die S-Parameter als Funktion der Frequenz auf. Der Netzwerkanalysator sendet ein Signal, die hinlaufende Welle genannt, zum Messobjekt. Das Messobjekt wird in der englischen Literatur \textit{DUT}, \textit{device under test} genannt. Die Frequenz, Amplitude und Phase der hinlaufenden Welle sind bekannt. Das Messobjekt reflektiert einen Teil der hinlaufenden Welle. Dieser Teil wird weglaufende Welle genannt. Sie wird, ohne in das Testobjekt einzudringen, am Eingang des Messobjekts, zum Netzwerkanalysator zurück reflektiert. Dabei vergleicht der Netzwerkanalysator die beiden Wellen. Der Rest der elektromagnetischen Welle, der nicht am Eingang des Messobjekts refelktiert wird, tritt in das Messobjekt ein, wird dort verändert, das heisst gedämpft, verstärkt oder phasenverschoben. Der transmittierte Signalanteil tritt am Ausgang des DUT als übertragenes Signal in Erscheinung. Die durch das DUT veränderte und am Ausgang anliegende Signalwelle wird auch weglaufende Welle genannt.

Aus dem Verhältnis von reflektiertem zu gesendetem Signal wird die Reflexion, das heisst der Reflexionskoeffizient gemessen. Weiter wird die Dämpfung des Reflektierten Signales in Abhängigkeit der Frequenz aufgezeichnet und dargestellt. Dies wird als Rückflussdämpfung oder als $S\_{11}$-Wert in dB angegeben. Diese wird in der englischer Literatur \textit{Return Loss} genannt.

Der $S\_{21}$-Wert gibt Auskunft über das Verhältnis des übertragenen Signal, zum gesendeten Signal. Dabei wird die Transmission des Messobjektes gemessen.

Die Abbildung \ref{NetzwerkanalysatorZweiTor} zeigt diesen Zusammenhang auf.

\cite{NetzwerkanalyzorTUDarmstadt}

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

\begin{figure}[!ht]

\begin{center}

\begin{tikzpicture}

\draw[line width=1.5pt](4, 1) rectangle (7, 3) node at (5.5,2) {DUT};

\draw[line width=3pt, ->, >=latex](0, 2.4) -- (4, 2.4) node at (2,2.7) {gesendetes Signal};

\draw[line width=2.5pt, ->, >=latex](7, 2) -- (11, 2) node at (9,2.3) {übertragenes Signal};

\draw[line width=1pt, ->, >=latex](4, 1.7) -- (0, 1.7) node at (2,2) {reflektiertes Signal};

%\draw[line width=1.5pt](3, 0) rectangle (5, 1);

\end{tikzpicture}

\end{center}

\caption{Ermittlung der S-Parameter am Zweitor}

**\label{NetzwerkanalysatorZweiTor}**

\end{figure}

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

\begin{figure}[!ht]

\begin{center}

\begin{tikzpicture}

\draw[line width=1.5pt](0, 0.5) rectangle (4, 3.5) node at (2,2) {Netzwerkanalysator};

\draw[line width=1.5pt](8, 1) rectangle (11, 3) node at (9.5,2) {DUT};

\draw[line width=3pt, ->, >=latex](4, 2.4) -- (8, 2.4) node at (6,2.7) {gesendetes Signal};

\draw[line width=1pt, ->, >=latex](8, 1.7) -- (4, 1.7) node at (6,2) {reflektiertes Signal};

%\draw[line width=1.5pt](3, 0) rectangle (5, 1);

\end{tikzpicture}

\end{center}

\caption{Ermittlung der $S\_{11}$-Parameter am Zweitor}

**\label{NetzwerkanalysatorS11}**

\end{figure}

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

\begin{figure}[!ht]

\begin{center}

\begin{tikzpicture}

\draw[line width=1.5pt](0, 1.5) rectangle (4, 4.5) node at (2,3) {Netzwerkanalysator};

\draw[line width=1.5pt](8, 2.1) rectangle (11, 3.9) node at (9.5,3) {DUT};

\draw[line width=3pt, ->, >=latex](4, 3.4) -- (8, 3.4) node at (6,3.7) {gesendetes Signal};

\draw[line width=2.5pt, ->, >=latex](13, 1.8) -- (4, 1.8) node at (6,2.1) {übertragenes Signal};

\draw[line width=2.5pt] (11, 3) -- (13, 3);

\draw[line width=2.5pt] (13, 3) -- (13, 1.8);

\end{tikzpicture}

\end{center}

\caption{Ermittlung der $S\_{21}$-Parameter am Zweitor}

**\label{NetzwerkanalysatorS21}**

\end{figure}

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

\newpage

**\section{Messsetup}**

Um zukünftig die Kommunikation der "Connect 1"\ Geräte mit einem Smartphone zu ermöglichen wird eine Antenne für das " Bluetooth Low Energy Network " gesucht. Aus Simulationen der Loop- und Dipol Antennen resultierte, dass das Abstrahlverhalten von Dipol Antennen genauer untersucht wird und mit Hilfe von Simulationen ein optimales Antennedesign für den Einsatz in den "Connect 1"\ Geräten gesucht wurde.

Die Antennendesigs wurden Anhand der im EMPIRE XPU erstellten Simulationsdaten gefertigt. Die Antennenstrukturen sind aus dem Kupferband des Typs „8111“ von M3 hergestellt. Dieses Band eignet sich sehr gut, um in der Testphase ein einfaches Design kostgünstig und schnell umzusetzen. Die gewünschte Antennenstruktur wird dem Skalpell oder einer Schere aus dem Band ausgeschnitten und auf einen Träger aufgeklebt. \\

Da jede Antenne eine Zuleitung braucht, wurden am Fusspunkt der Kupferbandantennen ein \textit{semi rigid Koaxialkabel} angebracht. Da es sich bei einem Dipol um eine symmetrische Antenne handelt, muss auch die Zuleitung symmetrisch sein. Aus diesem Grunde wurde der Innenleiter und der Mantel des Koaxialkabels mit den Einspeisepunkteden des Dipols verlötet.\\

Die \textit{semi rigid Koaxialkabel} von $HUBER+SUHNER$ des Typs $SUCOFORM\\_47\\_CU$ besitzen eine Impedanz von $50 \pm 2\Omega$. Das Ende des Koaxialkabels ist mit einem SMA Gewinde versehen.\\

Eine semi ridid Koaxialkabel mit einer Dipol Antenne ist in der folgenden Abbidlung gezeigt.

\begin{figure}[!h]

\centering

**\includegraphics**[width=8cm]{content/bilder/Implementierung/KoaxMitAntenne.JPG}%

\caption{Semi ridgit Koaxialkabel mit einer Kupferantenne}

**\label{fig:KoaxMitAntenne}**

\end{figure}

\textbf{Testobjekte}\\

In der Implementierung ist die Herstellung der getesteten Antenne gezeigt. \\

\textbf{Erwartungshaltung}\\

Die Erwartungen an das Funktionsmuster entsprechen den Simulationen der Dipol Antenne aus dem Kapitel \ref{sec:Sim\_verschiedene\_Geometrien}.\\

**\subsection{Messergebnisse}**

**\label{sec:Messergebinsse}**

Aus den Simulationen in der Abbildung \ref{S11\_Vergleich\_Simulation\_Dipolantenn\_freiraum\_Geraet} ist der $S\_{11}$-Verlauf im Freiraum und im Gerät bekannt. Die nachfolgende Abbildung zeigt als rote Kurve den $S\_{11}$-Wert der Dipol Aantenne im Freiraum. Als rote Kurve ist der Verlauf des $S\_{11}$ gezeigt, wenn die Dipol Antenne im Gerät positioniert ist. Es ist die bereits erwähnte Verschiebung der Resonanzfrequenz ersichtlich. Zudem ist die Resonanz der Dämpfung des $S\_{11}$-Verlaufs im Gerät weniger stark ausgeprägt wie im Freiraum. Die Messung der im Gerät platzierten Dipol Antenne ist als grüne Kurve in der Abbildung \ref{S11\_Messung\_Simulation\_Dipolantenn\_Freiraum} dargestellt. Die Resonanz der bluen Kurve(Simulation des Dipols im Gerät) und die Resonanz der grünen Kurve(Messung des Dipols im Gerät) stimmen gut überein. Was erstaunt, ist dass die $S\_{11}$-Dämpfung der zuführenden Welle -15dB aufweisst. Ein Erklärungsversuch weisst auf das Simulationsmodell. Es zeigt qualitativ wie wie sich die Resonanzfrequenz von einem Dipol im Freiraum gegenüber einem Dipol im Gerät verhält. Es macht aber erhebliche Fehler beim Impedanzverhalten. So weisst der gemessene Dipol bei einer Frequenz von 2.45 GHz eine Antennenimpedanz von $Z\_{ant}$ = (30+j4)$\Omega$. Während aus der Simulation die Antennenimpedanz von $Z\_{ant}$ = (16+j14.7)$\Omega$ aus Tabelle \ref{tab:Vergeich\_Lambda/2\_Freiraum\_Geraet} zu entnehmen ist. Demnach ist die Anpassung von an eine 50$\Omega$ Quelle in Realität bersser als aus der Simulation erwartet.

%\begin{figure}[!ht]

% \centering

% \begingroup

% \inputencoding{latin1}

% \input{content/bilder/Messung/Messung\_Sim\_S11\_Freiraum.tikz}

% \endgroup

% \caption{Vergleich des gemessen und simulierten $S\_{11}$ Werts im Freiraum} \label{S11\_Messung\_Simulation\_Dipolantenn\_Freiraum}

%\end{figure}

\begin{figure}[!ht]

\centering

\begingroup

\inputencoding{latin1}

**\input{content/bilder/Implementierung/S11FurDoku.tex}**

\endgroup

\caption{Vergleich des gemessen und simulierten $S\_{11}$-Wert im Ger\"at und im Freiraum} **\label{S11\_Messung\_Simulation\_Dipolantenn\_Freiraum}**

\end{figure}

\newpage

Ein qualitatives Bild des Abstrahlverhaltens der Dipol Antenne im Gerät zeigt die Abbildung \ref{fig:3D Richtdiagramm} Um die Richtwirkung zu interpretieren wurde der minimale Richtwert auf min -25 dB und der maximale Wert auf 0 dB gesetzt. Das Bild zeigt eine Sicht auf die xz-Ebene. Senkrecht nach oben zeigt die positive z-Achse und rechtwinklig dazu verläuft horizontal die x-Achse. Der Pfeil nach rechts zeigt die positive x-Achse. Die negative y-Achse würde rechtwinklig aus der Blattebene zeigen. Die Abbildung \ref{fig:FrontStarLab} zeigt das Gerät im StarLab im Moment der elektromagnetischen Feldverteilung der Abbildung \ref{fig:3D Richtdiagramm}\\

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

\begin{figure}[!h]

\centering

**\includegraphics**[width=8cm]{content/bilder/Implementierung/min25\_0\_x\_yhinten\_zoben.JPG}%

\caption{3DrichtidiagrammDipolantenne}

**\label{fig:3D Richtdiagramm}**

\end{figure}

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

\begin{figure}[!h]

\centering

**\includegraphics**[width=8cm]{content/bilder/Implementierung/Front.JPG}%

\caption{Versuchsanordnung Front Perspektive im Starlab}

**\label{fig:FrontStarLab}**

\end{figure}

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

\newpage

Ein Schnitt durch die xy-Ebene bei z=0 ist in Abbildung \ref{fig:Schnittgemessen} in der oberen Grafik dargestellt. Aus den Simulationen ist zu erwarten, dass die elektromagnetische Feldstärke in Richtung der positiven x-Achse kleiner sein muss als auf der negativen Seite der x-Achse. Da das elektromagnetische Feld auf die linke Seite (neg.x-Achse) nur durch die Gehäusewand gedämpft wird. Der Schnitt durch die xy-Ebene zeigt einen Schnitt wie in einer Vogelperspektive auf das Gerät. Bei der Messung der Feldstärke im StarLab ist das Gerät wie in der Simulation in der xy-Ebene auf der Höhe z=0 positioniert. Das Display zeigt bei der Messung und der Simulation in die positive z-Richtung. \\

%\begin{figure}[!ht]

% \centering

% \begingroup

% \inputencoding{latin1}

% \input{content/bilder/Messung/xyGeraet.tikz}

% \endgroup

% \caption{xy-Ebene}\label{fig:xy\_gemessen}

%\end{figure}

Ein Schnitt in der xz-Ebene bei y=0 ist in der unteren Grafik von Abbildung \ref{fig:Schnittgemessen} gezeigt. Das Gerät ist in der xy-Ebene positioniert. Das Display zeigt in die Richtung der positiven z-Achse. Die Ausrichtung der Antenne im Gerät ist entlang der y-Achse. Der Dipol ist im Ursprung des Koordinatensystems platziert. Aus der Theorie sollte jetzt ein Kreis ersichtlich sein. Da ein radiales elektromagnetisches Feld um die längs Ausrichtung des Dipols zu erwarten ist. Die absorbierenden Eigenschaften des Gerätes zeigen jedoch eine starke Reduktion der elektromagnetischen Feldstärke in Richtung der positiven x-Achse, sowie ein reduziertes Feld entlang der negativen x-Achse. Entlang der positiven-x Achse ist das Fluginstrumet plaziert, dises reduziert die Feldausbreitug erheblich. das Um diese Abbildung zu plotten war es nötig, einen Offset von 17.6 dB zu den Richtwirkung zu addieren.\\

Um die entsprechend in der $\varphi$ zu erhalten muss zuerst der $\theta$ Winkel bei -90$^\circ$ festgehalten werden und $\varphi$ nimmt die elektromagnetische Feldstärkte von $0..\pi$ auf. Anschliessen wird der $\theta$ Winkel bei 90$^\circ$ festgehalten und $\varphi$ nimmt die elektromagnetische Feldstärkte von $0..\pi$ auf. Somit ist die ganze xy-Ebene auf der Höhe z=0 aufgenommen.\\

Der Schnitt in der xz-Eben kann mit festem Winkel $\varphi$ bei 0$^\circ$ über den $\pm \theta$ Bereich aufgenommen werden.

\begin{figure}[!h]

\centering

\begingroup

\inputencoding{latin1}

**\input{content/bilder/Implementierung/SchnittFurDoku.tex}**

\endgroup

\caption{Schnitte durch das 3D Richtdiagramm}

**\label{fig:Schnittgemessen}**

\end{figure}

\newpage

Die Effizienz der Dipol Antenne ist in Abhängigkeit von der Frequenz in der Abbildung \ref{fig:Effizienz\_gemessen} gezeigt. Bei 2.45 GHz beträgt $\eta\_{tot}$ von 49$\%$. Über eine Bandbreite von 100 MHz nimmt die Effizienz Werte im Bereich von 47$\%$ bis 56.3$\%$ an.\\

\begin{figure}[!h]

\centering

\begingroup

\inputencoding{latin1}

**\input{content/bilder/Implementierung/EffizienzFurDoku.tex}**

\endgroup

\caption{xy-Ebene}**\label{fig:Effizienz\_gemessen}**

\end{figure}

%\subsection{Intpretation der Messresultate}

Vergleich aus der Erwartungshaltung und den Messresultaten