

Radarsensoren für die Positions- und Fahrerzustandserkennung im Fahrzeuginnenraum

Dipl.-Ing. Michael Mahler, Robert Bosch GmbH, Abteilung FV/FLO

Dr.-Ing. Hans-Oliver Ruoff, Robert Bosch GmbH, Abteilung FV/FLO

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Menzel, Universität Ulm, Abteilung Mikrowellentechnik

Radar Sensors to Detect Position and Driver's State in the Interior of a Vehicle

Two concepts of radar sensors for the detection of position and state of the driver in the interior of a vehicle are introduced. The first sensor provides the distance between front passengers and the instrumentation panel, and the second determines the frequencies of their heartbeat and breath. Both systems operate in a pulsed mode with an application-dependent frequency. The short pulses, which length determines the resolution of the system, are differently reflected by the "target" as a function of absorption depth. Distance and movement of the object are computed from the time lapse between outgoing and incoming pulses and from the evaluation of the Doppler effect, respectively.

Keynotes (radar sensor, vehicle interior, airbag, distance, heartbeat, breath)

1. Einleitung

Bei steigenden Sicherheitsanforderungen an ein Kraftfahrzeug soll durch verschiedene Systemkonzepte die Sicherheit der Insassen kontinuierlich verbessert werden. Eines dieser Konzepte ist das adaptive Aufblasen des Airbags in Abhängigkeit der Position der betroffenen Person. Durch ein volles Füllen des Airbags könnten der Person u.U. erhebliche Verletzungen zugeführt werden. Dieses Konzept scheiterte in der Vergangenheit an der genauen Positionsbestimmung der Insassen im Fahrzeuginnenraum. Ein weiteres Systemkonzept basiert auf der Fahrerzustandserkennung. Dabei soll der Zustand des Fahrers so weit wie möglich charakterisiert werden, um ihn z.B. am Einschlafen zu hindern. Für beide Systemkonzepte gibt es Lösungsansätze und erste Realisierungen. Der Innenraum kann zum Beispiel mit Hilfe von Video oder Ultraschall gescannt werden. Über eine geeignete „Bildauswertung“ lassen sich dann die „Ziele“ und darüber abgeleitet z.B. die Position der Insassen bestimmen. Ein Problem dabei ist, dass z.B. durch eine Zeitung die Position der Insassen verdeckt werden kann. Das zweite Systemkonzept (Fahrerzustandserkennung) scheitert im Moment an einer geeigneten Sensorik zur Bestimmung des physiologischen Zustandes des Fahrers. Versuche zeigen, dass

eine ausschließliche Auswertung des Fahrverhaltens, wie z.B. des Spurverhaltens, für eine eindeutige Zustandsbestimmung nicht ausreicht. Für beide Systemkonzepte gibt es Lösungsbeiträge auf der Basis von Radarsensoren.

2. Neue Lösungsansätze durch Radarsensoren für den Kraftfahrzeuginnenraum

Das eine im folgenden beschriebene Sensorkonzept dient der Bestimmung des Abstandes zwischen Fahrer/Beifahrer und dem Armaturenbrett, das andere wird zur Ermittlung der Herz- und Atemfrequenz eingesetzt. Es handelt sich dabei um Radarsensoren, die abhängig von der Anwendung bei verschiedenen Frequenzen arbeiten. Die ausgesendeten kurzen Impulse, deren Länge die Auflösung des Systems mit bestimmt, werden durch das „Zielobjekt“ je nach Eindringtiefe in den menschlichen Körper unterschiedlich stark reflektiert. Abstand und Bewegung des Objektes können über die Laufzeit des Impulses zwischen Aussendung und Empfang bzw. aus der Auswertung des Doppler-Effektes ermittelt werden.

Der Sensor zur Erkennung des Insassenorts ordnet einerseits die Position der Person verschiedenen Zonen vor dem Airbag zu, andererseits bestimmt er die Bewegungsrichtung in diesen Bereichen – speziell im Hinblick auf den Gefahrenbereich der Ausblasöffnung des Airbags (Keep-Out-Zone). Ziel ist es, die Verletzungen durch eine Airbagauslösung in zu geringer Nähe des Insassen zu reduzieren. Um die nötige Auflösung zu erreichen, wird der Sensor im mm-Wellenbereich (24GHz) betrieben, wo der menschliche Körper fast vollständig an der Oberfläche reflektiert. Bei dieser Frequenz kann eine so geringe Baugröße erzielt werden, dass keine Probleme bei der Unterbringung der Sensoren im Kraftfahrzeuginnenraum entstehen.

Dagegen arbeitet der Sensor zur Erkennung der Herz- und Atembewegung bei einer tieferen Frequenz (2,45GHz), um die notwendige Eindringtiefe und die Signalreflexion an verschiedenen Schichten (Organen) im Körper zu erreichen. Das System ermöglicht sowohl eine Aussage über die Herzfrequenz als auch über die „Güte“ (Intensität) des Herzschlages. Diese Sensorsignale können für unterschiedliche Zwecke des Insassenschutzes verwendet werden. Die Detektion eines Herzschlages kennzeichnet eindeutig die Anwesenheit eines schutzwürdigen, lebenden Wesens auf dem Sitz im Vergleich zu leblosen Objekten. Die Auswertung der Herz- und Atemfrequenz erlaubt zusätzlich eine bessere Insassenklassifizierung: Bei einem Kind (5 Jahre oder jünger) sind Herz- und Atemfrequenz und ihre Variabilität im Vergleich zu einem Erwachsenen wesentlich höher (z.B. beträgt die Herzfrequenz eines solchen Kindes im Durchschnitt 110 Schläge pro Minute, die eines Erwachsenen etwa nur noch 60). Darüber hinaus gibt die Gegenüberstellung der momentanen Frequenzwerte zu ihrem Langzeitmittel über die physische und psychische Belastung der Insassen Auskunft.

3. Theoretische Grundlagen

3.1 Der Übertragungsweg im menschlichen Körper

Um die Funktion der Sensorsysteme besser verstehen zu können, wird die Theorie der Reflexion von elektromagnetischen Wellen an Grenzschichten verwendet. Der

menschliche Körper hat die Eigenschaft eines verlustbehafteten Dielektrikums, einen gewissen Teil der elektromagnetischen Welle wieder zu reflektieren und den anderen Teil zu absorbieren. Dieses Verhalten ist gewebespezifisch und stark frequenzabhängig, siehe auch im Internet: <http://safeemf.iroecfi.cnr.it>. Für die theoretischen Untersuchungen wurden die Gewebeparameter von dieser Datenbank verwendet.

Als Grundlage für die Feldberechnungen im menschlichen Körper wird ein Menschmodell, das aus dem „Visible Human Projekt“ entstanden ist, verwendet (siehe Internet: http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html).

Als Beispiel soll im folgenden ein Übertragungsweg im Körper bei 2,45GHz von der Hautoberfläche bis zum Herz betrachtet werden.

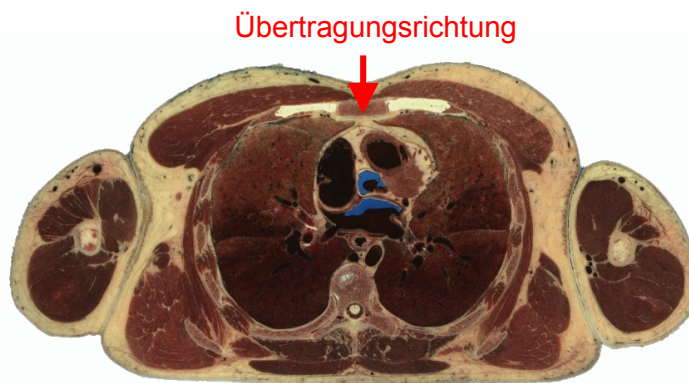
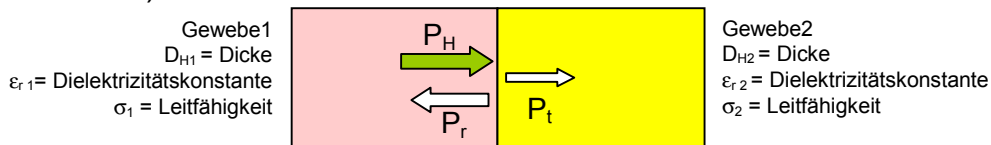


Bild 1: Querschnitt durch den menschlichen Körper in Höhe des 8. Brustwirbels

Zunächst werden die Modelle und Kenngrößen zur Charakterisierung eines solchen Übertragungsweges im menschlichen Körper eingeführt.

Prinzipbild zum anatomischen Aufbau des Menschen (Stoßstelle zwischen 2 Gewebearten):



Leistungsbetrachtung:

Relative komplexe Dielektrizitätskonstante:

$$\underline{\epsilon}_r = \epsilon_r - j \cdot \frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon_0}$$

Komplexer Reflexionsfaktor:

$$\underline{r} = r \cdot e^{j\varphi} = \frac{\sqrt{\underline{\epsilon}_1} - \sqrt{\underline{\epsilon}_2}}{\sqrt{\underline{\epsilon}_1} + \sqrt{\underline{\epsilon}_2}}$$

Reflektierte Leistung an einer Gewebestoßstelle: $P_r = |\underline{r}|^2 \cdot P_H$

Transmittierte Leistung an einer Gewebestoßstelle: $P_t = (1 - |\underline{r}|^2) \cdot P_H$

Die Dämpfung im Gewebe wird über die Eindringtiefe δ_H (Skineffekt) ermittelt, d.h. nach dieser Strecke ist die Leistung auf 37% der ursprünglich eindringenden Leistung abgesunken.

Für eine Gewebedicke D_H gilt: Leistungsabfall auf $e^{\frac{-D_H}{\delta_H}}$ % der Eintrittsleistung.

Die folgenden Tabellen zeigen die errechneten Werten für den in Bild 1 gezeigten Übertragungsweg im Körper.

Tabelle 1: Werte für Reflexions- und Transmissionswerte zwischen den Gewebearten

Weg	Stoßstelle 1	Stoßstelle 2	Stoßstelle 3	Stoßstelle 4	Stoßstelle 5	Stoßstelle 6	Stoßstelle 7
	Luft / Haut trocken	Haut trocken / Fettgewebe	Fettgewebe / Knochen	Knochen / Knochenmark	Knochenmark / Knochen	Knochen / Fettgewebe	Fettgewebe / Herz
Betrag r	0.728	0.464	0.197	0.197	0.197	0.197	0.533
$1- r ^2$	0.470	0.786	0.961	0.961	0.961	0.961	
$1- r ^2$ in dB	-3.276 dB	-0.171 dB	-0.171 dB	-0.171 dB	-0.171 dB	-0.171 dB	
$ r ^2$							0.286
$ r ^2$ in dB							-5.458 dB

Tabelle 2: Errechnete Werte für die Dämpfung im Gewebe

	Stoßstelle 1	Stoßstelle 2	Stoßstelle 3	Stoßstelle 4	Stoßstelle 5	Stoßstelle 6	Stoßstelle 7
Luft	Haut trocken	Fettgewebe	Knochen	Knochenmark	Knochen	Fettgewebe	Herz
Eindringtiefe	2.26 cm	11.70 cm	4.58 cm	12.88 cm	4.58 cm	11.70 cm	
Dicke	1mm	13mm	2mm	13mm	2mm	2mm	
Relative Dämpfung im Gewebe*	Auf 95.66% abgesunken	Auf 89.4% abgesunken	Auf 95.72% abgesunken	Auf 90.4% abgesunken	Auf 95.72% abgesunken	Auf 98.30% abgesunken	

* bezogen auf die ins Gewebe transmittierte Leistung

Bild 2 zeigt das Gesamtergebnis für die Signaldämpfung für diesen Übertragungsweg:

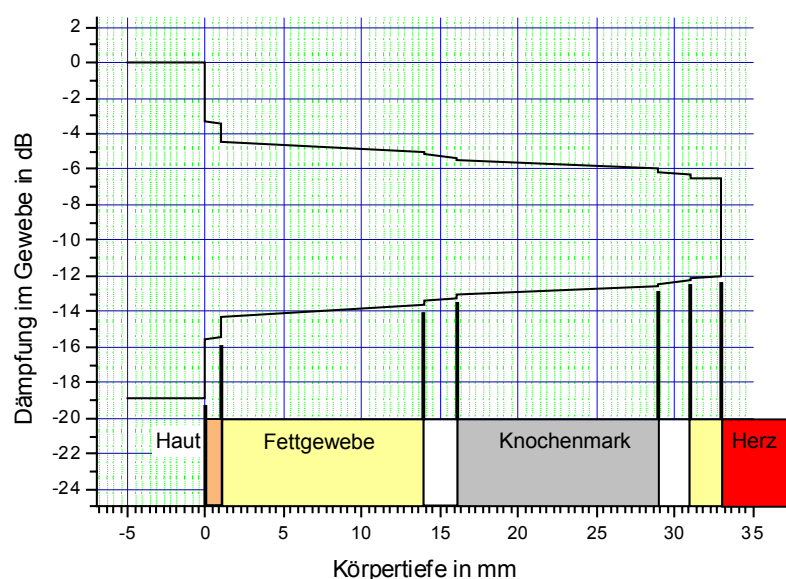


Bild 2: Signalverluste durch Dämpfung und Reflexionen auf einem Übertragungsweg durch den menschlichen Körper.

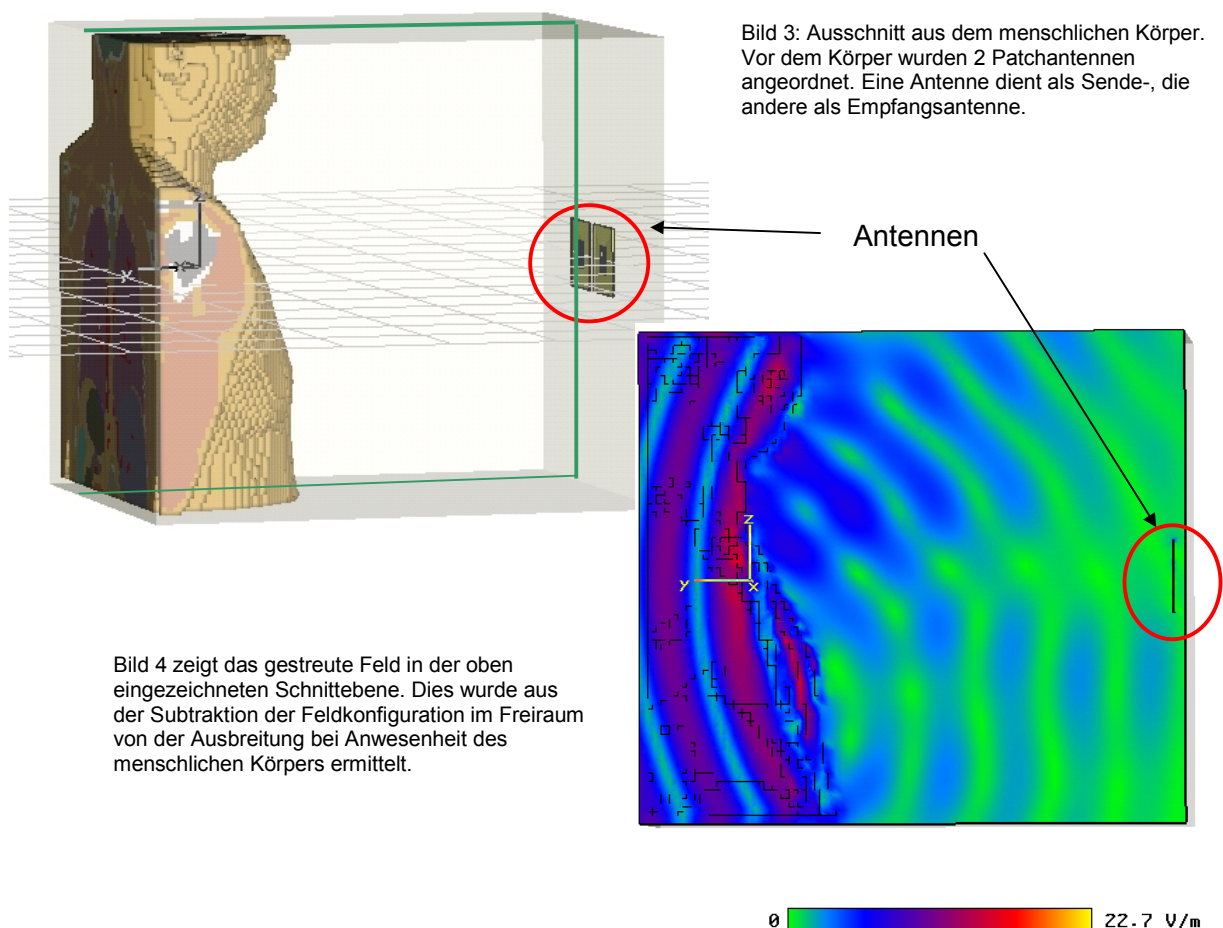
- Bemerkungen:
- Der exponentielle Abfall im Gewebe wurde vernachlässigt.
 - Mehrfachreflexionen an den Gewebeschichten führten nicht zu einer gravierenden Veränderung im Ergebnis.
 - Wegen der Signallaufzeit im Gewebe sind die Signale, die durch Mehrfachreflexionen entstehen schon so weit gedämpft, dass sie keinen Einfluss mehr haben.

Bei der Frequenz 2,45GHz treten zwei starke Reflexionen im Körper auf. Die erste Reflexionsstelle befindet sich am Übergang zwischen Luft und Haut. An dieser Reflexionsstelle kann die Bewegung des Brustkorbes detektiert werden, d.h. die Atemfrequenz bestimmt werden. Die zweite Reflexionsstelle befindet sich zwischen dem Fettgewebe (welches den Raum zwischen Lunge und dem Herz auskleidet) und dem Herzgewebe. An dieser Stelle wird dann die Herzbewegung detektiert. Die Dämpfung des Signals für die Herzschlagmessung beträgt je nach betrachtetem Weg (hier sind viele verschiedene Anordnung der Gewebeschichten möglich) ca. 20- 35 dB. Die maximale Tiefe der Herzscheidewand bezogen auf die Hautoberfläche beträgt beim Durchschnittsmenschen 2,0 bis 3cm. Das Fettgewebe hat keinen großen Einfluss auf die Ergebnisse, denn es besitzt nur eine geringe Dämpfung.

Bei der Frequenz 24GHz ist nur eine starke Reflexionsstelle, die zwischen Luft und Haut, vorhanden. Es müssen keine weiteren Reflexionsstellen berücksichtigt werden, weil die Dämpfung im Gewebe so groß ist, dass die Signalleistung im Körper schnell abnimmt.

3.2 Überprüfung der theoretischen Betrachtungen mit Hilfe von Feldsimulationsprogrammen

Mit Hilfe von Micro-Wave-Studio (Feldsimulationsprogramm der Firma CST) können die elektromagnetischen Felder die im Körper entstehen, sowie die Felder, die vom Körper reflektiert werden, berechnet werden. Mit Hilfe dieser Simulationen werden die Auswirkungen von verschiedenen Antennen und deren Position untersucht. Als Beispiel soll hier folgende Anordnung gezeigt werden:

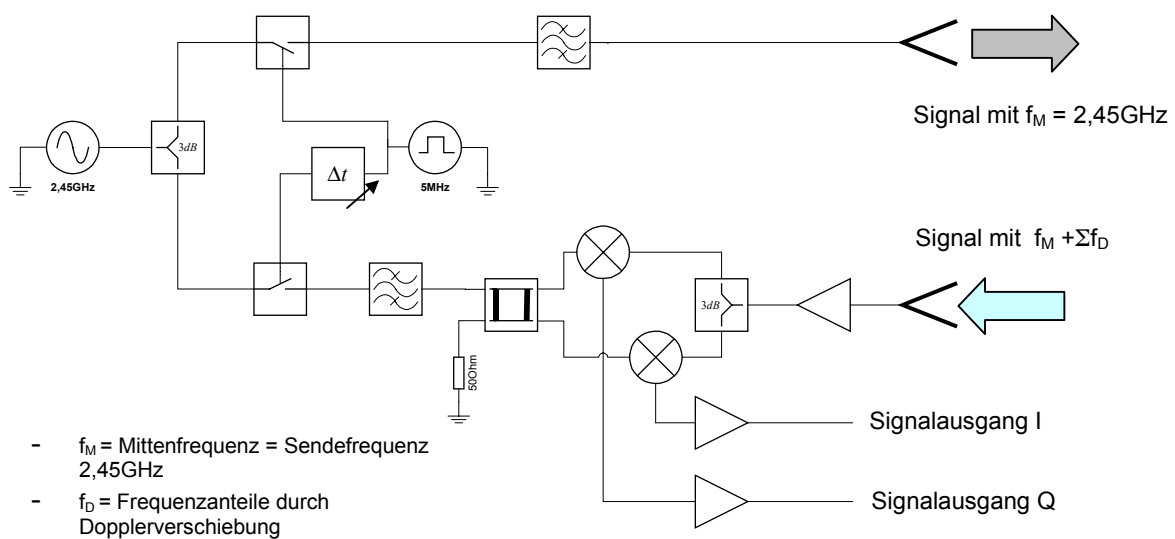


Mit Hilfe der Berechnungen konnten die theoretischen Untersuchungen bestätigt werden. Die maximale Feldstärke des gestreuten Feldes entspricht etwa 50% des einfallenden Feldes. Dieses Ergebnis wurde auch bei den analytischen Berechnungen festgestellt. Die Frequenz 2,45GHz ist geeignet um bis zur Herzoberfläche vordringen zu können.

4. Realisierung erster Testsysteme

Für beide Systemkonzepte wird ein vergleichbares Radarsystem verwendet. Die Grundlage bildet ein Impulsradar, bei dem das Sendesignal geschaltet wird.

4.1 Blockschaltbild 2,45GHz-System



PRF = Puls Repetition Frequency

Bild 5 zeigt das Blockschaltbild für den Herzschlag und Atemsensor bei 2,45GHz

4.2 Blockschaltbild 24GHz-System

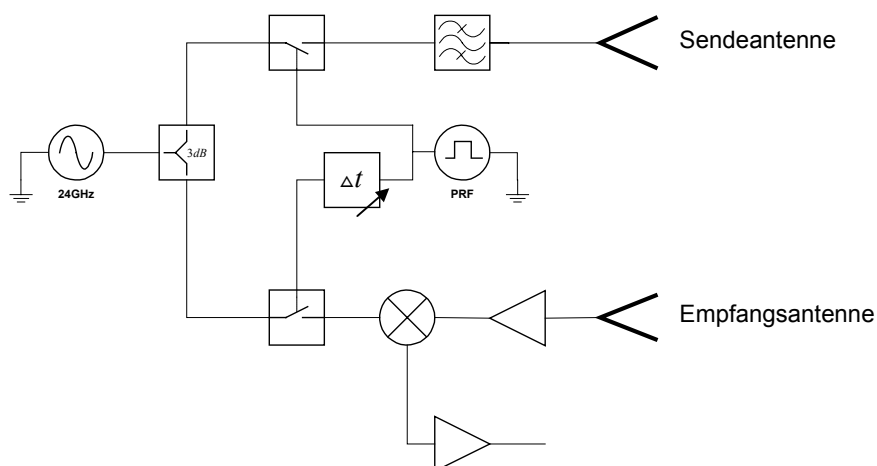


Bild 6 zeigt das Blockschaltbild für den Sensor zur Abstandsbestimmung bei 24GHz

4.3 Arbeitsweise der Sensorsysteme

Bei beiden Systemen wird das Oszillatorsignal aufgeteilt, um ein Sende- und Referenzsignal zu erhalten. Die HF-Signale werden nun durch Schalter im Sende- und im Empfangszweig geschaltet. Der Impuls, der durch dieses Schalten entsteht, wird im Empfangszweig verzögert, um die Laufzeit (vom Sensor bis zum Messobjekt und wieder zurück) des Sendeimpulses auszugleichen. Dieser verzögerte Impuls wird auch als Referenzsignal für eine Dopplerauswertung benutzt. Die Verzögerung im Empfangszweig wird gleichmäßig verändert, was zu einem „Scannen“ eines gewissen Abstandsbereiches führt. Wenn an den Mischern im Empfangszweig an beiden Eingängen gleichzeitig ein Signal anliegt, kann am Mischerausgang ein Empfangssignal detektiert werden. Aus diesem Signal werden folgende Information gewonnen:

- über die Verzögerung / Laufzeit: der Abstand des Objektes
- über den Dopplereffekt / Frequenzverschiebung: die Geschwindigkeit des Objektes.

Durch die Pulsung des Sendesignals verringert sich die mittlere Sendeleistung. Aber auch bei einem Dauerbetrieb ist die Sendeleistung so gering, dass die hier verwendeten Systeme als 100% EMVU-sicher angesehen werden können (Referenz: ICNIRP - Grenzwerte).

5. Messaufbau des 2,45GHz Herzschlag- und Atemsensor mit Messergebnissen

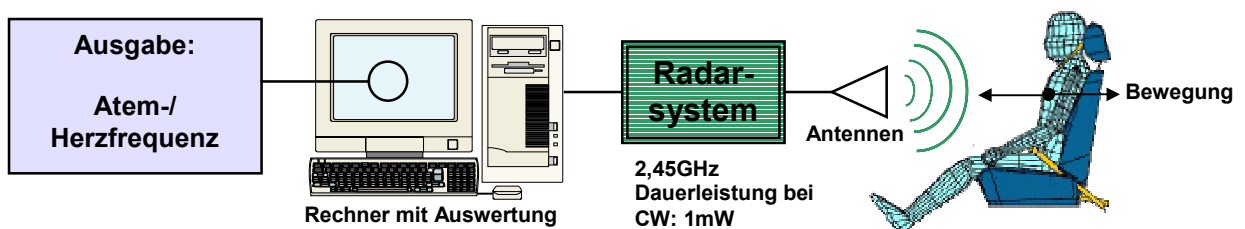


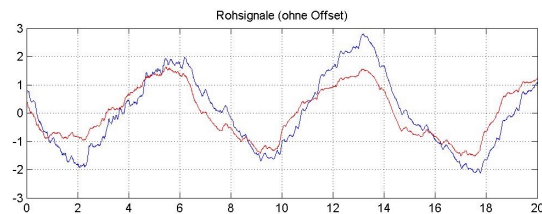
Bild 7: Schematische Darstellung der Messanordnung zur Bestimmung von Herzschlag und Atmung

Die Datenaufnahme mit dem Rechner erfolgt über eine A/D-Wandlerkarte. Zur Signalaufnahme wird das Programm „Labview“ von National Instruments verwendet. Die weitere Signalauswertung wird mit MATLAB durchgeführt.

5.1 Ergebnis für die Bestimmung des Herzschlags und der Atmung

Um die Information der Herzfrequenz und der Atemfrequenz zu erhalten, wird eine FFT - Analyse durchgeführt. Dazu muss zuerst der DC - Offset vom Signal entfernt werden. Aus dem DC - Offset freien Signal wird mit Hilfe einer FFT zuerst die Atemfrequenz ermittelt (Ergebnisse liegen im Bereich von 0,1 bis 0,3 Hz).

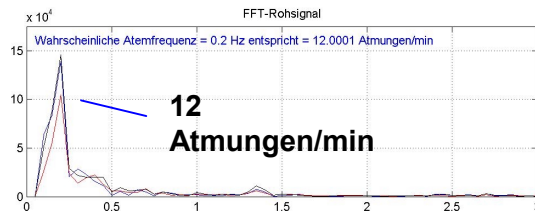
Rohsignal (offsetkompensiert) + Fouriertransformation:



I -Ausgang

Q-Ausgang

t / s Bild 8.1 : Offsetkompensiertes Rohsignal
Bild 8.2: Ergebnis der FFT



FFT: I -Ausgang

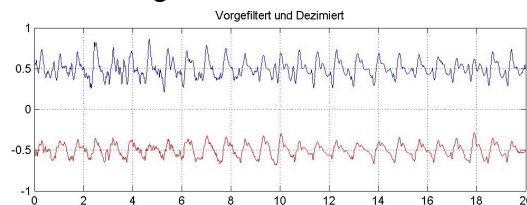
FFT: Q-Ausgang

FFT: $S = I + jQ$

f / Hz

Im nächsten Schritt wird das Signal noch einmal mit einer Hochpassfilterfunktion bearbeitet (hier 0,5Hz). Dadurch können die Signalanteile der Atmung herausgefiltert werden.

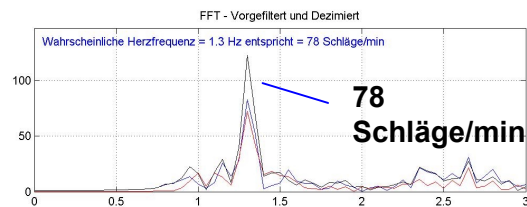
Hochpass gefiltertes Signal + Fouriertransformation:



I -Signal gefiltert

Q-Ausgang gefiltert

Bild 9.1 : Hochpass gefiltertes Signal
Bild 9.2: Ergebnis der zweiten FFT



FFT: I -Ausgang

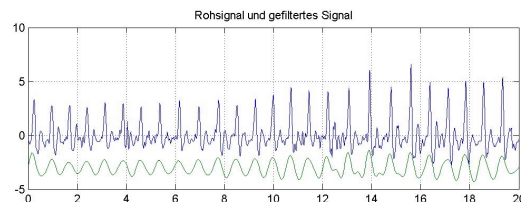
FFT: Q-Ausgang

FFT: $S = I + jQ$

HP gefiltert

Um eine Referenz zu erhalten, wird über einen Drucksensor am Handgelenk gleichzeitig der Puls gemessen.

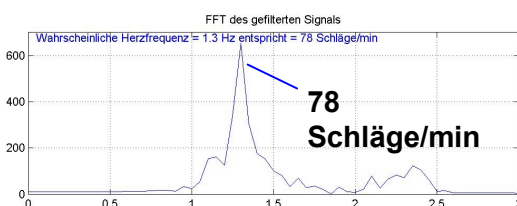
Drucksensorsignal + Fouriertransformation:



Sensor-Signal

Sensor-Signal gefiltert

Bild 10.1 : Drucksensorsignal
Bild 10.2: Ergebnis der FFT



FFT des gefilterten
Sensor-Signals

Diese Messungen werden sowohl im Labor (mit Fahrzeugsitz) als auch in einem Kraftfahrzeug durchgeführt. Es kann für beide Situationen eine gute Übereinstimmung, zwischen der mit dem Radarsensor gemessenen Herzschlagfrequenz zur Referenz (Drucksensor), festgestellt werden.

5.2 Ausblick für das Sensorsystem zur Bestimmung von Herzschlag und Atmung

Um das Ergebnis zu verbessern wird im Moment an einer Integration aller HF-Komponenten auf einer Platine gearbeitet. Diese Integration wird das Signal / Rausch – Verhältnis verbessern. Ebenso ist noch nicht die beste Position für die Antennen im Innenraum gefunden. Hierzu werden weitere Berechnungen mit dem Menschmodell durchgeführt. Die Antennenposition ermöglicht eine Reduzierung der um die Beeinflussungen auf das Signal durch weitere Körperbewegungen.

6. Messaufbau 24GHz-Sensor zur Abstandmessung

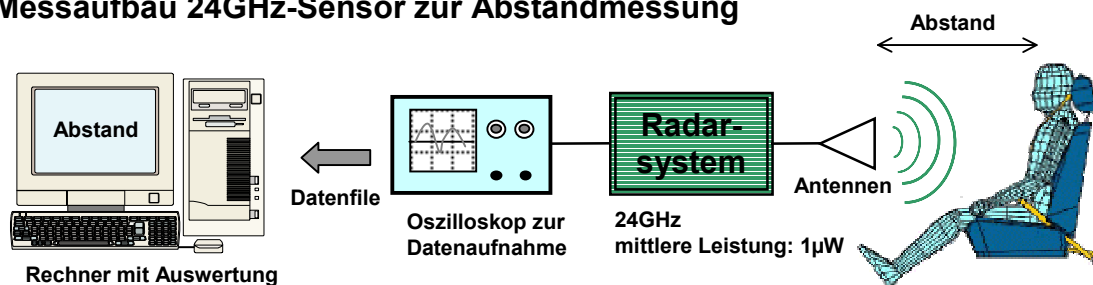


Bild 11 Schematischer Aufbau zur Bestimmung des Abstandes im Kraftfahrzeuginnenraum

6.1 Messergebnisse

- Eine Messung der Atmung der Person ist möglich. Diese kann über die Bewegung des Brustkorbes detektiert werden. Die dadurch verursachten Entfernungsunterschiede können ebenfalls aufgelöst werden (Unterschied zwischen den Zuständen ein- und ausgeatmet). Dies entspricht einer Auflösung von ca. **1 bis 2cm**.
- Der Herzschlag kann nur bei sehr dünnen Personen sicher detektiert werden. Hierbei wird Schockwelle der Herzbewegung im Körper detektiert.
- Die Mehrzielauflösung (Unterscheidung zwischen zwei Zielen) beträgt etwa **20cm**.
- Die geringste messbare Entfernung beträgt ca. **10 bis 15cm**.
- Eine Messung der Bewegungsgeschwindigkeit der Person ist ebenfalls möglich.

Diese Ergebnisse sollen im folgenden graphisch dargestellt werden.

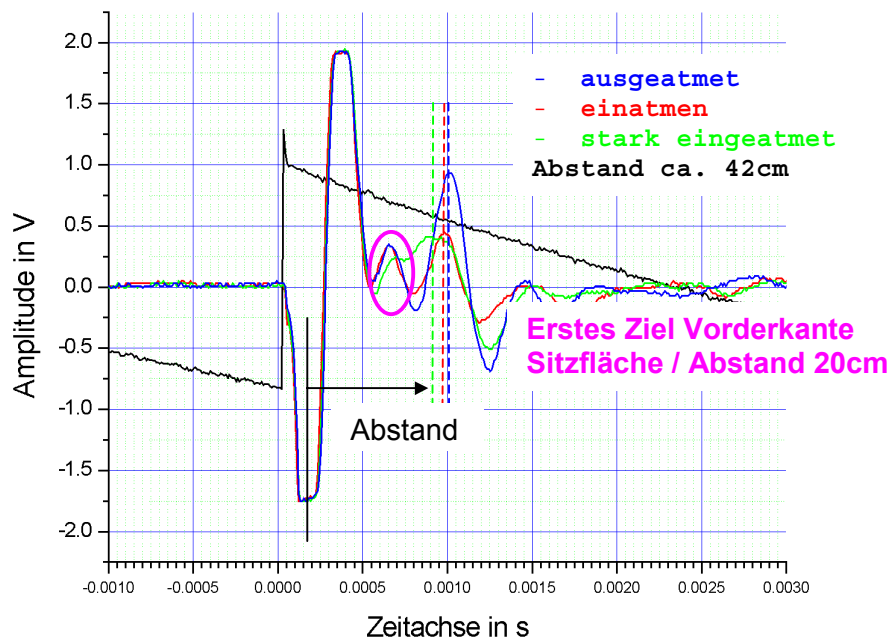


Bild 12: Veränderung der Impulsantwort des Signals über der Zeit.

Bemerkungen zum Diagramm

- Manuelle Messung des Abstandes ergab hier einen Abstand von 41,5cm.
- Sägezahnspannung ist proportional zur Zeitverschiebung. Über diese Sägezahnspannung wird die Entfernungsbestimmung durchgeführt.
- Die Geschwindigkeit des Messobjekts verändert die Amplitude des Empfangimpulses

Dieses Sensorsystem bei 24GHz eignet sich zur Messung des Abstandes zwischen Person und Antenne. Für die Messung der physiologischen Parameter eignet sich das System nicht, hier ist die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der Bestimmung der Werte für den Herzschlag zu groß.

7. Schlussfolgerung und Ausblick

Mit beiden Sensorsystemen können die Anforderungen erfüllt werden. Eine Verbesserung der Signale kann durch weitere Integration der nötigen HF-Komponenten auf ein Basismaterial verbessert werden. Dadurch kann eine noch geringere Bauform erzielt werden. Die Integration der Komponenten verbessert auch das Signal zu Rausch-Verhältnis was wiederum eine geringere Sendeleistung zulassen würde (noch größere EMV - Sicherheit). Die Signalverarbeitung kann durch den Einsatz eines digitalen Signalprozessors noch weiter verbessert und beschleunigt werden.