

1 Einleitung

*Und jedem Anfang wohnt ein Zauber inne,
Der uns beschützt und der uns hilft, zu leben.*

Hermann Hesse, 1941

Innovationen im heutigen Technologiezeitalter eröffnen immer wieder ungeahnte Möglichkeiten. Dieser „Zauber“ moderner Entwicklungen ist von besonderer Bedeutung, wenn er die Gesundheit des Menschen beschützt und erhält. In vielen Bereichen des täglichen Lebens sind Sensoren allgegenwärtig, die Überwachungsaufgaben übernehmen, ohne dass wir uns deren Anwesenheit bewusst sind. So lässt sich das Unfallrisiko im Straßenverkehr beispielsweise durch Einsatz von ABS, ESP sowie dem Airbag im Kfz reduzieren. In Gebäuden warnen Rauch- und Gasmelder vor Bränden und sich anbahnenden Explosionen.

Unfälle können auch durch Unachtsamkeit des Anwenders an gefährbringenden Einrichtungen auftreten, welche Verletzungen an einzelnen Gliedmaßen herbeiführen oder diese gar vollständig abtrennen. Viele dieser Unglücke könnten vermieden werden, wenn ein Sensor den Bereich überwachen würde. Vorrichtungen werden entweder der Bequemlichkeit halber umgangen oder abgeschaltet, um eine Zeitersparnis zu erzielen. Häufige Ursache ist das elektrische Überbrücken des Sensors, das Verdecken von Lichtschranken bzw. das Umgehen von Totmannsschaltungen, wie z.B. an Stanz- und Pressanlagen. Als wirksamer Schutz vor Unfällen sind Sensorsysteme notwendig, welche zuverlässig, unauffällig sowie manipulationssicher sind. Aufgabe dieser Sensoren ist, menschliches Gewebe zu detektieren bzw. dieses von anderen Materialien zu trennen. In dieser Arbeit soll der Fokus auf einer Trennung zwischen menschlichem Gewebe und Werkstoffen, d.h. Hölzern und Kunststoffen, mittels elektromagnetischer Wellen liegen.

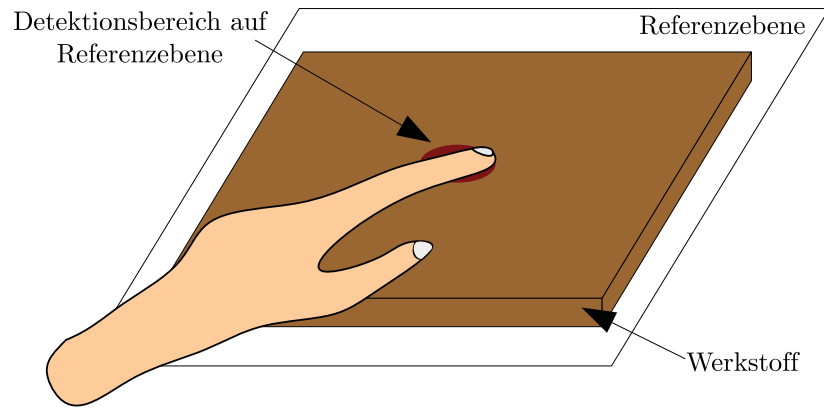


Abbildung 1.1: Detektions-/ Überwachungsbereich zur Materialunterscheidung

1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, planare Werkstoffe, d.h. Hölzer und Kunststoffe mit einer maximalen Höhe bis 80 mm von einer Hand bzw. einzelnen Fingern unterscheiden zu können. Der Detektionsbereich, siehe Abbildung 1.1, soll elliptische Abmessungen mit den Achsenlängen im Bereich von 20 mm und 40 mm aufzeigen. Von besonderem Vorteil erweist sich eine Materialunterscheidung, wenn der Sensor keinen direkten Sichtkontakt zur Hand benötigt. Störende Sensorelemente oberhalb des Detektionsbereichs, die zum Teil auch den Sichtbereich des Anwenders einschränken, entfallen. Daher wird als Ziel eine Montage des Sensors unterhalb dieser Referenzebene angestrebt.

1.2 Stand der Forschung

Es existiert bereits eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien, die zwar prinzipiell eine Hand von dielektrischen Werkstoffen unterscheiden, jedoch auch einige Nachteile mit sich bringen. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Verfahren aufgeführt und deren Funktionsweise erläutert.

1.2.1 Erkennung mittels Video

Der Überwachungsbereich wird durch eine oberhalb befindliche Videokamera abgedeckt. Ein Signalverarbeitungsprozessor wertet die erfassten Bilder kontinuierlich aus. Zur Materialunterscheidung zwischen einer Hand und Werkstoffen lassen sich unterschiedliche Detektionsmethoden einsetzen. Beispielsweise kann über Algorithmen versucht werden, die Hand durch ihre Form, ihre Farbe sowie ihre Oberflächentextur von einem Material zu trennen. Durch die aufgezeichnete Bildfolge lässt sich ferner die Trajektorie, d.h. die weitere Bewegungsrichtung der Hand voraussagen. Frühzeitig kann entschieden werden, ob die Hand innerhalb kurzer Zeit bis zur Mitte des Überwachungsbereichs vordringt oder die Zone nur streift.

Als nachteilig hat sich bei diesem Ansatz die Montage der Kamera oberhalb des Überwachungsbereichs erwiesen. Zudem muss eine freie Sicht auf die Hand sichergestellt sein. Überdeckungen der Hand, z.B. durch Handschuhe, erschweren die Erkennung, da als Entscheidungskriterium nur noch die Handform herangezogen werden kann. Desweiteren ist meist eine zusätzliche Lichtquelle notwendig, um für einen ausreichenden Kontrast zu sorgen. Zeigt der verwendete Werkstoff eine ähnliche Farbe wie die Haut auf bzw. werden starke Reflexionen durch das Material hervorgerufen, ist ebenso eine Handunterscheidung schwierig.

1.2.2 Detektion mit optischer Strahlung

Mittels optischer Strahlung werden vornehmlich im sichtbaren ($\lambda = 380 - 780 \text{ nm}$) sowie im nahen ($\lambda = 780 - 1400 \text{ nm}$) und mittleren ($\lambda = 1400 - 15000 \text{ nm}$) infraroten Spektralbereich die Reflexionen an einem Werkstoff bzw. der menschlichen Haut ausgewertet. Ein hohes Reflexionsverhalten zeigt die menschliche Haut im sichtbaren bzw. nahen Infrarotbereich auf. Hier ist die Absorption in den einzelnen Gewebeschichten gering und wird von Melanin, ein Pigment, das die Hautfarbe definiert, sowie Hämoglobin, der rote Blutfarbstoff in den roten Blutkörperchen zum Transport von Sauerstoff ins Gewebe, bestimmt. Hingegen überwiegt die Absorption im UV- bzw. mittleren Infrarotbereich durch das im Gewebe befindliche Wasser.

Aus diesem Spektralbereich werden mehrere Wellenlängen gezielt ausgewählt, bei denen sich ein hoher Signalunterschied zwischen Reflexionen der menschlichen Hand

und den Werkstoffen einstellt. Als Sendequelle dienen meist mehrere LEDs unterschiedlicher Wellenlänge auf Basis der Halbleitermaterialien InGaP, GaAs sowie InGaAs. Empfangsseitig werden selektive, d.h. schmalbandige Photodioden eingesetzt, um eine hohe spektrale Trennung der einzelnen Wellenlängen zu erreichen. Aus den gemessenen Empfangspegeln der Photodioden sowie deren Verhältnisse zueinander wird mittels einer Auswertelogik die Unterscheidung durchgeführt. Die Sende- und Empfangselemente werden oberhalb eines Detektionsbereiches angeordnet. Der durch die LEDs erzeugte Messspot sowie die in unmittelbarer Nähe zu den Sendequellen befindlichen Photodioden definieren den Überwachungsbereich des Sensors.

Zur Materialunterscheidung ist es notwendig, dass ausgehend vom Sensor eine freie Sicht auf die Hand gewährleistet wird. Dabei muss sichergestellt sein, dass die Haut nicht durch Verbände bzw. durch Handschuhe überdeckt wird. Durch den hohen Wasseranteil in feuchten Materialien sind die zurückreflektierten Spektralanteile, vor allem im mittleren Infrarotbereich, ähnlich zu einer Hand, weshalb Fehlauflösungen auftreten können.

1.2.3 Thermographische Unterscheidung

Als Thermographie wird die Bestimmung der Wärmeemission von Körpern bezeichnet. Nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz nimmt mit steigender Temperatur die emittierte Wellenlänge der Wärmestrahlung ab. Das Strahlungsmaximum einer idealen thermischen Strahlungsquelle mit einer Temperatur von $T \approx 37 \text{ °C}$ liegt im Wellenlängenbereich um $9,35 \text{ }\mu\text{m}$, der als Ausgangswert einer menschlichen Hand dient. Werkstoffe hingegen besitzen bei Raumtemperatur von $T \approx 20 \text{ °C}$ ein Strahlungsmaximum um $\lambda = 9,9 \text{ }\mu\text{m}$. Zudem erhöht sich mit zunehmender Temperatur die Strahlungsleistung (Stefan-Boltzmann-Gesetz). Bevorzugt findet daher die Auswertung der Wärmestrahlung im mittleren Infrarotbereich statt. Die Detektion bzw. Unterscheidung zwischen menschlichem Gewebe zu Werkstoffen erfolgt mittels pyroelektrischer Sensoren, wie z.B. in PIR-Meldern eingebaut, oder anhand von Photodioden, die meist zu einem Array zusammengeschaltet sind, um eine Bildgebung zu ermöglichen. Überschreitet die vom Sensor erfasste Wärmeleistung eine zuvor definierte Schwelle bzw. wird eine stärkere Temperaturänderung detektiert, so wird bei diesem Verfahren zwischen den zu trennenden Materialien unterschieden.

Auch bei diesem Ansatz wird der Sensor oberhalb des Detektionsbereichs angebracht. Die freie Sicht des Anwenders auf das zu überwachende Gebiet wird eingeschränkt. Zudem können Fehlauslösungen auftreten, falls sich der von der Hand zu trennende Werkstoff der menschlichen Körpertemperatur, beispielsweise durch Sonneneinstrahlung, angleicht. Ebenfalls kann die zur Unterscheidung notwendige Temperaturdifferenz zu gering ausfallen, wenn sich unter Kälteeinwirkung die Temperatur der Hand verringert.

1.2.4 Kapazitive Detektion

Bei kapazitiv basierten Detektionsverfahren wird ein schwaches elektrisches Wechselfeld über eine Elektrode in den menschlichen Körper eingepreßt. Die Gegen- bzw. Empfangselektrode befindet sich im Überwachungsbereich. Gelangt die Hand in diese Zone, koppelt ein Teil des Wechselstroms zur Empfangselektrode über. Das dort abgegriffene Signal wird bandpassgefiltert und über einen Einhüllenden-Detektor einem Komparator zugeführt, siehe Abbildung 1.2. Wird eine vorgegebene Schwelle überschritten, befindet sich eine Hand im Überwachungsbereich. Meist wird ein Frequenzbereich zwischen 50 kHz und einigen 100 kHz gewählt, da sich hier für die Impedanz des Körpergewebes und somit auch für die Dämpfung verhältnismäßig geringe Werte einstellen. In Abhängigkeit vom Übergangswiderstand der Elektrode zur Haut werden in [1] bei einem Arm entlang einer Strecke von 40 cm sowie einem Durchmesser von 5 cm Dämpfungen im Bereich von 43 dB bis 67 dB erzielt.

Nachteilig sei jedoch der dauerhafte Kontakt der Person zur Sendeelektrode erwähnt. Die Stärke der kapazitiven Einkopplung des Feldes ist abhängig vom Abstand der Elektrode zur Haut, von der Luftfeuchtigkeit der Umgebung sowie von der Leitfähigkeit des Anwenders, speziell die Feuchtigkeit der Haut.

Fehlauslösungen können auftreten, falls die Hand auf einem leitfähigen Material aufliegt, das sich in unmittelbarer Nähe zur Elektrode befindet oder diese berührt. Durch eine geringe Übergangsimpedanz des menschlichen Körpers zum Bezugspotential des Sensors ist es möglich, dass eine Hand nicht detektiert wird, obwohl sie sich nahe der Empfangselektrode befindet. Ein Teil des eingepreßten Stroms in den Körper wird ins Erdreich abgeleitet.

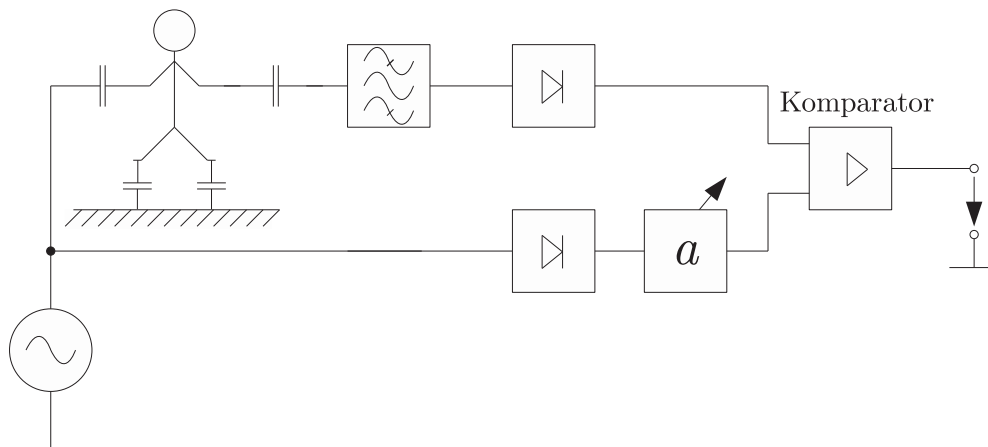


Abbildung 1.2: Blockschaltbild des kapazitiven Detektionsverfahrens

1.2.5 Resonanzfrequenzänderung durch Oszillatorverstimmung

Eine Antenne, die unterhalb der Referenzebene angeordnet ist, deckt den Überwachungsbereich ab. Befinden sich Objekte in diesem Bereich, wird die Antenne verstimmt. Eine Eingangsimpedanzänderung resultiert daraus. Wird ein Schwingkreis mit dieser komplexen Impedanz belastet, bestimmt deren Blindwiderstand die Schwingfrequenz und ihr Wirkwiderstand die Güte, d.h. die 3 dB Bandbreite der Resonanz. Im Vergleich zu einem Werkstoff, der beispielsweise nur eine Resonanzverschiebung hervorruft, treten bei einer Hand zusätzliche Nebenresonanzen auf. Durch den hohen Wasseranteil in der Hand nimmt zudem die Güte des Schwingkreises ab. Diese Merkmale werden zur Materialunterscheidung herangezogen. Die Grundfrequenz, d.h. ohne ein aufliegendes Material, wird vornehmlich in ein ISM-Band gelegt, z.B. um 2,45 GHz. Der Vorteil ist, dass diese Bereiche weltweit genutzt werden dürfen. Eine gesonderte Frequenzuteilung seitens der Regulierungsbehörden ist nicht notwendig, solange die jeweils geltenden Vorschriften eingehalten werden.

Der Nachteil dieses Detektionsverfahrens ist die hohe Anzahl an Fehlauflösungen. Insgesamt sind Änderungen in der Resonanzfrequenzverschiebung gering. Je nach Art und Beschaffenheit des Werkstoffes ist keine Differenzierung zu menschlichem Ge-

webe möglich. Der aus den Messungen gewonnene Informationsgehalt, bedingt durch die geringe Bandbreite, erlaubt es nicht, die physikalischen Eigenschaften der zu trennenden Materialien daraus abzuleiten.

1.3 Lösungsansätze und Gliederung der Arbeit

Aus den Nachteilen der bekannten Systeme resultiert, dass eine Materialtrennung auch bei unterschiedlicher Hautfarbe, bei Benutzung von Handschuhen sowie dem Tragen von Verbänden möglich sein muss. Zudem soll auf eine gezielte Einkopplung von elektrischen Wechselfeldern, wie es beim kapazitiven Detektionsverfahren der Fall ist, verzichtet werden.

Elektromagnetische Wellen besitzen die Fähigkeit, Materialien in Abhängigkeit von ihren dielektrischen sowie magnetischen Eigenschaften zu durchdringen. Je nach Art und Beschaffenheit stellt sich ein unterschiedliches Reflexionsverhalten an der Materialoberfläche sowie Transmissionsverhalten im Material ein. Auf dieser Grundlage soll untersucht werden, ob anhand der reflektierten Signale eine Unterscheidung zwischen Werkstoffen und menschlichem Gewebe generell möglich ist. Unterhalb von 10 GHz ist die Dämpfung der Werkstoffe, welche noch eine praktikable Anwendung erlaubt, gering. Für Frequenzen oberhalb 1 GHz stellen sich, bedingt durch die Wellenlänge, geringe Abmessungen des Sensors ein. Im Vergleich zur Messung bei nur einer Frequenz soll hier insbesondere die Bestimmung des Reflexionsfaktors breitbandig, d.h. bis maximal zu den Bandgrenzen 1 GHz - 10 GHz, erfolgen. Der Informationsgehalt zur Charakterisierung der Materialien steigt an.

In Kapitel 2 werden Grundlagen der Wellenausbreitung sowie das Reflexions- und Transmissionsverhalten von geschichteten Medien vermittelt. Die dielektrischen Eigenschaften der zu differenzierenden Materialien werden aufgezeigt und unterschiedliche Systemkonzepte zur Bestimmung des Reflexionsfaktors diskutiert. Zur Untersuchung typischer Merkmale einer Hand werden in Kapitel 3 erstmalig Feldsimulationen auf Grundlage von Voxel basierten Handmodellen durchgeführt, aus den erhaltenen Ergebnissen die notwendige elektrische Polarisierung des HF-Sensorelements abgeleitet und charakteristische Unterscheidungsmerkmale im Reflexionsfaktor zwischen einer Hand und den Werkstoffen dargelegt. Daran folgend zeigt Kapitel 4 unterschiedliche Signalverarbeitungsansätze zur Materialtrennung auf und liefert eine

1 Einleitung

Abschätzung für den zur Auswertung notwendigen Frequenzbereich. Auf Basis einer Anforderungsdefinition erfolgt die Umsetzung des breitbandigen HF-Sensorelements in Form einer neuen gerichteten Ultrabreitbandantenne in Kapitel 5. Es werden sowohl Messergebnisse im Frequenz- als auch im Zeitbereich beider Antennen aufgezeigt. Die messtechnische Charakterisierung sowie die Unterscheidung von Kunststoffen und Hölzern zu einer menschlichen bzw. im Rahmen dieser Arbeit dielektrisch nachgebildeten Hand ist Schwerpunkt von Kapitel 6. Eine Zusammenfassung der erhaltenen Ergebnisse sowie ein Ausblick schließen die Arbeit.

2 Grundlagen

Für die Unterscheidung zwischen menschlichem Gewebe und Werkstoffen mit Ultraschallsignalen werden gezielt elektromagnetische Wellen in Richtung der Objekte abgestrahlt und die resultierenden Reflexionen ausgewertet. Die zum Verständnis notwendigen Grundlagen der Wellenausbreitung in Medien werden zu Beginn vermittelt, wobei im weiteren Verlauf gezielt auf das Reflexions- sowie Transmissionsverhalten einer dielektrischen Schicht eingegangen wird. Wesentlich bei der Materialunterscheidung ist das dielektrische Verhalten der zu trennenden Materialien Holz bzw. Kunststoffe zu einer Hand, wenn diese einem äußeren Wechselfeld ausgesetzt sind. Dies bildet einen weiteren Schwerpunkt dieses Kapitels. Im zweiten Teil werden grundlegende Systemkonzepte auf Radarbasis vorgestellt, mit denen allgemein der Reflexionsfaktor ermittelt werden kann. Eine abschließende Bewertung stellt Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren gegenüber.

2.1 Physikalisches Verhalten von Materialien im GHz-Bereich

2.1.1 Elektromagnetische Wellen in Materie

Grundlage zur Beschreibung der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen bilden die Maxwell-Gleichungen. Für harmonische Zeitvorgänge lassen sich diese in Zeigerform darstellen. Gleichung 2.1 wird als Durchflutungsgesetz bezeichnet, Gleichung 2.3 definiert das Induktionsgesetz. Die Quellenfreiheit des magnetischen Feldes stellt Gleichung 2.2 dar. Anhand Gleichung 2.4 werden die Quellen des elektrischen Feldes aufgezeigt.