

Carola Schierding, Frauke Gellersen, Patrick Walkemeyer,
Karsten Kuhlmann, Michael Beyer

Zündquellsicherheit bei HF-Strahlung

ISSN 2751-6598
ISBN 978-3-944659-11-4
DOI 10.7795/110.20260106

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Metrologie

PTB-M-9

Braunschweig, 15. Jannuar 2026

Carola Schierding, Frauke Gellersen, Patrick Walkemeyer,
Karsten Kuhlmann, Michael Beyer

Zündquellsicherheit bei HF-Strahlung

ISSN 2751-6598

ISBN 978-3-944659-11-4

DOI 10.7795/110.20260106

Empfohlene Zitierweise/recommended citation

Schierding, C., Gellersen, F., Walkemeyer, P.,
Kuhlmann, K. und M. Beyer, 2026.
Zündquellsicherheit bei HF-Strahlung.
Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt.
PTB-Bericht M-9. ISBN: 978-3-944659-11-4.
Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/110.20260106>

Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21
Telefax: (05 31) 592-92 92
www.ptb.de



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin

Zündquellsicherheit bei HF-Strahlung

Carola Schierding, Frauke Gellersen, Patrick Walkemeyer,
Karsten Kuhlmann, Michael Beyer

Abschlussbericht

PTB FV-Nr.:	37062
Laufzeit:	20.04.2020 bis 30.06.2024
Projektleiter:	Dr.-Ing. Michael Beyer
Projektbearbeiter:	Dr.-Ing. Carola Schierding Dr.-Ing. Frauke Gellersen Patrick Walkemeyer
Kooperationspartner:	Endress+Hauser SE+Co. KG VEGA Grieshaber KG

Kooperationspartner und unterstützende Projektpartner

Kooperationspartner (extern):

- Endress+Hauser SE+Co. KG
- VEGA Grieshaber KG

Kooperationspartner (intern):

- Arbeitsgruppe 2.22: Hochfrequenz-Basisgrößen

Unterstützende Projektpartner:

- Fraunhofer Institut für Angewandte Festkörperphysik (IAF)
- Universität Ulm - Institut für Mikrowellentechnik (MWT)

Projektbearbeitende Personen

Herr Dr. Michael Beyer

Frau Dr. Frauke Gellersen

Herr Michael Hau

Herr Jürgen Rühaak

Frau Dr. Carola Schierding

Herr Patrick Walkemeyer

Forschungsbegleitkreis

Herr Dr. Michael Beyer	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Herr Prof. Dr. Christian Damm	Universität Ulm - Institut für Mikrowellentechnik (MWT)
Herr Dr. Thomas Galler	Endress+Hauser SE+Co. KG
Frau Dr. Frauke Gellersen	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Herr Dr. Arno Götz	Endress+Hauser SE+Co. KG
Herr Dr. Armin Hummelbrumm	Endress+Hauser SE+Co. KG
Herr Dr. Karsten Kuhlmann	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Herr Dr. Stefan Lauer	Endress+Hauser SE+Co. KG
Herr Dr. Harald Lörch	Endress+Hauser SE+Co. KG
Herr Christoph Müller	VEGA Grieshaber KG
Herr Detlef Ramin	Endress+Hauser SE+Co. KG
Herr Holger Sack	VEGA Grieshaber KG
Frau Dr. Carola Schierding	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Herr Jochen Schwendemann	VEGA Grieshaber KG
Herr Dr. Martin Thedens	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Herr Patrick Walkemeyer	Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Kurzfassung

In der Prozessindustrie gewinnt die Radarfüllstandsmessung zunehmend an Bedeutung, auch in explosionsgefährdeten Bereichen wie der Zone 0 oberhalb brennbarer Flüssigkeiten. Obwohl hochfrequente elektromagnetische Strahlung zu den potenziellen Zündquellen zählt, gelten aktuelle Radarfüllstandsmessgeräte aufgrund ihrer geringen Sendeleistung bislang als sicher. Mit dem technologischen Fortschritt hin zu höheren Betriebsfrequenzen – über die bisherige Grenze von 60 GHz hinaus – entsteht jedoch Forschungsbedarf zur Bewertung der Zündfähigkeit hochfrequenter Strahlung.

Das vorliegende Forschungsvorhaben untersucht daher die Zündquellsicherheit im erweiterten Frequenzbereich bis 330 GHz. Ziel ist es, wissenschaftliche Grundlagen für eine Anpassung der nationalen (TRGS 723), europäischen (DIN EN 1127-1) und internationalen Normen (IEC 60079-0, IEC 60079-14) zu schaffen. Im Fokus stehen mögliche Zündmechanismen wie die dielektrische Erwärmung von Feststoffen durch HF-Strahlung sowie die direkte Wechselwirkung mit Dämpfen brennbarer Flüssigkeiten.

Die Arbeit umfasst Experimente und Simulationen zur dielektrischen Erwärmung sowie Zündversuche, die die Wirksamkeit hochfrequenter Strahlung als Zündquelle bewerten. Ergänzend werden Messunsicherheiten analysiert und sicherheitstechnische Grenzwerte abgeleitet. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu beitragen, zukünftige Grenzwerte für Frequenz und Ausgangsleistung praxisgerecht und sicherheitsorientiert festzulegen.

Abstract

In the process industry, radar-based level measurement is increasingly used, including in hazardous areas such as Zone 0 above flammable liquids. Although high-frequency electromagnetic radiation is considered a potential ignition source, current radar level sensors are regarded as safe due to their very low transmission power. However, as operating frequencies continue to rise beyond the existing 60 GHz limit, further research is needed to assess the ignition capability of high-frequency radiation.

This research project therefore investigates the ignition safety of electromagnetic radiation in an extended frequency range up to 330 GHz. The aim is to provide a scientific basis for updating national (TRGS 723), European (DIN EN 1127-1), and international standards (IEC 60079-0, IEC 60079-14). The study focuses on possible ignition mechanisms such as dielectric heating of solid materials by high-frequency radiation and the direct interaction of radiation with vapors of flammable liquids.

The work includes experiments and simulations on dielectric heating as well as ignition tests to evaluate the effectiveness of high-frequency radiation as an ignition source. In addition, measurement uncertainties are analyzed and safety-related threshold values are derived. The findings will support the development of future frequency and power limits that are both practical and safety-oriented.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Grundlagen.....	9
2.1	Explosionsschutz.....	9
2.1.1	Voraussetzungen für eine Zündung	9
2.1.2	Aktuelle normative Anforderungen.....	10
2.1.3	Potentielle Zündquellen bei HF-Strahlung	10
2.2	Hochfrequenztechnik	15
2.2.1	Eigenschaften elektromagnetischer Wellen	15
2.2.2	Dielektrische Erwärmung	19
2.2.3	Gaußscher Strahl.....	21
3	Charakterisierung von dielektrischen Materialparametern und deren Erwärmung	23
3.1	Auswahl der Materialien	23
3.2	Bestimmung der dielektrischen Materialparameter	24
3.3	Bestimmung des Antennenprofils	25
3.4	Erwärmungsmessungen	27
3.4.1	Versuchsaufbau.....	27
3.4.2	Versuchsdurchführung.....	32
3.4.3	Ergebnisse	34
3.5	Kalorimetrische Messung der Radarantenne	35
4	Simulation	38
4.1	Materialparameter	38
4.2	Elektromagnetische Simulation.....	39
4.3	Thermische Simulation	39
4.4	Simulationsergebnisse.....	40
4.5	Untersuchung der Radarantenne	41
5	Zündversuche mittels HF-Strahlung	42
5.1	Versuchsaufbau für Zündversuche in Anlehnung an kleine heiße Bauteile ..	42
5.2	Messobjekt und Temperaturmessung.....	45
5.3	Versuchsdurchführung.....	46
5.3.1	Ergebnisse für Schwefelkohlenstoff-Luft-Gemische	48

5.3.2	Ergebnisse für Diethylether-Luft-Gemische	50
6	Messunsicherheitsbetrachtung und sicherheitstechnischer Grenzwert	52
6.1	Einflussgrößen und Modellgleichung	52
6.2	Ergebnis der Messunsicherheitsbetrachtung und sicherheitstechnischer Grenzwert für HF-Strahlung	55
7	Zusammenfassung	56
8	Schlussfolgerungen	59
9	Umsetzungs- und Verwertungsplan	61
10	Literaturverzeichnis	62
11	Veröffentlichungen aus dem Projekt	64
	Bilderverzeichnis	65
	Tabellenverzeichnis	66
A	Mögliche Zündquellen	67
B	Materialien	68

1 Einleitung

In der Prozessindustrie wird die Füllstandmessung von Flüssigkeiten und Schüttgütern mehr und mehr mit Radarsensoren (Radarfüllstandsmessgeräten) durchgeführt. Oberhalb brennbarer Flüssigkeiten entsteht durch den Dampf, der sich mit der im Tank verbleibenden Luft vermischt, eine explosionsfähige Atmosphäre. Da diese ständig vorherrscht, wird dem Bereich im Tank oberhalb der Flüssigkeit die Explosionsschutz-Zone 0 zugeordnet. Hochfrequente elektromagnetische Strahlung ist eine der 13 in der Norm DIN EN 1127-1 (Explosionsfähige Atmosphären — Explosionsschutz — Teil 1: Grundlagen und Methodik) sowie in der IEC 60079-14 und in der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 723 genannten möglichen Zündquellen [1], [2], [3]. Um eine Zündung zu vermeiden, müssen Füllstandsmessgeräte, die in Bereichen mit potentiell auftretender explosionsfähiger Atmosphäre eingesetzt werden sollen, die in der Norm IEC 60079-0 (Explosive Atmospheres — Part 0: Equipment — General requirements) festgelegten Grenzwerte für Frequenz und Ausgangsleistung erfüllen [4]. Dabei muss die Frequenz im Bereich zwischen 9 kHz und 60 GHz liegen, und die Ausgangsleistung darf je nach Gasgruppe maximal 6 W nicht überschreiten [1]. Die Grenzwerte basieren dabei auf Induktion von Spannungen durch aufgestellte Sendeanlagen in Leiterschleifen, die zum Beispiel durch Kräne oder Tankanlagen entstehen und als unbeabsichtigte Empfangsantenne wirken. Durch Öffnen oder Schließen der Leiterschleife kann es dann zu zündfähigen Funken kommen.

Für die Zulassung der aktuellen Gerätegeneration, die bereits bei rund 80 GHz arbeitet, wurde eine Zündfähigkeit aufgrund der geringen Sendeleistung von rund 10 mW, die weit unterhalb der festgelegten Grenzwerte liegt, ausgeschlossen. Eine weitere Erhöhung der Betriebsfrequenzen bietet weitere technische Vorteile, da sich die Strahlung bei höheren Frequenzen besser bündeln lässt und somit die Möglichkeit besteht, in engeren und kleineren Behältern sowie in Behältern mit vielen Einbauten zu messen. Dies bedarf nun jedoch einer erweiterten Betrachtung der Zündfähigkeit der Zündquelle „hochfrequente Strahlung“ (HF-Strahlung) und einer Erweiterung des Frequenzbereichs sowie der bisher festgelegten Leistungsgrenzwerte.

Gegenstand dieses Forschungsvorhabens ist eine Erweiterung des Frequenzbereichs von 60 GHz auf 330 GHz, mit dem Ziel diese Erkenntnisse in die nationale TRGS 723 [2], die europäische Norm DIN EN 1127-1 [1] und in die internationale Norm IEC 60079-0 [4] sowie IEC 60079-14 [3] einzubringen. Hierfür wird die Zündquellsicherheit für elektromagnetische Strahlung im Bereich der HF-Strahlung in explosionsfähigen Atmosphären ermittelt. Die obere Grenzfrequenz von 330 GHz ergibt sich aus den Spezifikationen von Rechteckhohlleiter und deren Grenzfrequenzen (Frequenzband: R 2.6k, WM-864 oder WR 3) nach der IEEE 1785.1 [5] und der IEC 60153-2 [6]. Die hier betrachtete Frequenz von 330 GHz liegt nach der IEC 60079-0 [4] bereits im Bereich der optischen Strahlung mit einer Grenzfrequenz von > 300 GHz. Bei einer Erweiterung des Frequenzbereichs und den daraus resultierenden neu vorgeschlagenen Grenzwerten für Frequenz und Ausgangsleistung sind die aktuellen regulatorischen Grenzwerte nach der IEC 60079-0 [4] und der IEC 60079-28 [7] zu berücksichtigen.

In dieser Arbeit werden die potentiellen Zündmechanismen, die bei hochfrequenter HF-Strahlung auftreten können, untersucht und bewertet. Zu den Mechanismen, die in Abschnitt 2.1.3 genauer beschrieben werden, zählen unter anderem die dielektrische Erwärmung, bei der HF-Strahlung von Feststoffen absorbiert und in Wärme umgewandelt

wird, sowie eine direkte Wechselwirkung der Strahlung mit dem Dampf oberhalb einer brennbaren Flüssigkeit.

Die dielektrische Erwärmung kann zu einer heißen und damit potentiell zündfähigen Oberfläche führen. Auf diesem Effekt basieren die in dieser Arbeit durchgeführten Experimente und Simulationen. Da bei der Radarfüllstandsmessung bei 80 GHz eine Absorption der Strahlung vom Dampf oberhalb verschiedener Stoffe beobachtet wurde, wird dieser Effekt in einem zweiten Schritt ebenfalls auf die Zündfähigkeit hin untersucht. Die Vorgehensweise zu den einzelnen Schwerpunkten dieser Arbeit ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

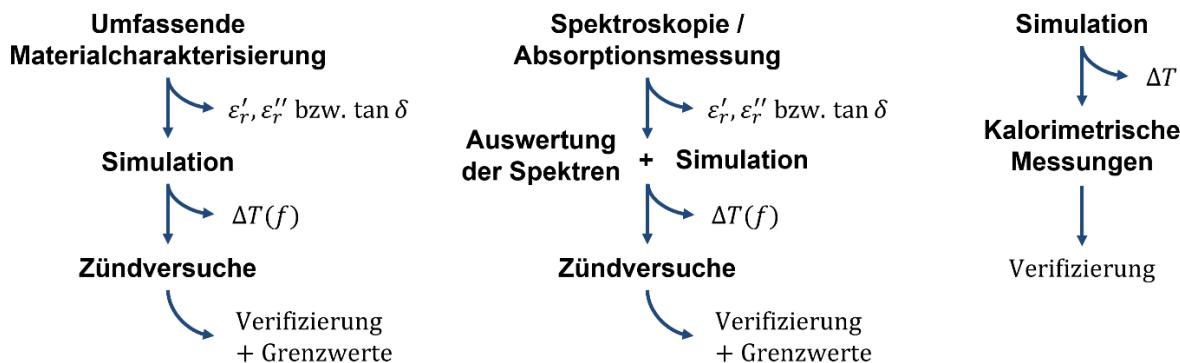


Abbildung 1.1: Vorgehensweise zu den einzelnen Schwerpunkten dieser Arbeit

In Kapitel 2 werden neben den möglichen Zündmechanismen bei HF-Strahlung die Grundlagen zum Explosionsschutz und zur HF-Technik, sowie die aktuellen normativen Anforderungen vorgestellt. In Kapitel 3 und Kapitel 4 werden die Experimente und Simulationen zur dielektrischen Erwärmung vorgestellt (Erwärmungsversuche). Dabei wird auf den Versuchsaufbau, die -durchführung und die verwendeten Materialien eingegangen. In Kapitel 5 werden die Zündversuche mittels HF-Strahlung als Zündquelle betrachtet. Hierbei wird sich mit den Punkten angepasster Versuchsaufbau in Anlehnung an die Prüfung für kleine heiße Bauteile, die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse der Zündversuche befasst. Die Messunsicherheitsbetrachtung der experimentellen Zündversuche und der ermittelte sicherheitstechnische Grenzwert ist in Kapitel 6 dargestellt. Eine Zusammenfassung über die hier betrachtete Forschungsfrage und die resultierenden Erkenntnisse sind in Kapitel 7 aufgeführt. Darauffolgend werden in Kapitel 8 die Schlussfolgerungen zur Zündquellsicherheit bei HF-Strahlung erläutert. Der Anhang enthält weitere Informationen über die 13 genannten Zündquellen der DIN EN 1127-1 [1] und die verwendeten Materialien.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zum Explosionsschutz und zu HF-Strahlung vorgestellt. Dabei werden unter anderem die normativen Anforderungen für strahlungsemittierende Geräte und potentielle Zündgefahren durch HF-Strahlung beleuchtet. Weiterhin wird die dielektrische Erwärmung erklärt.

2.1 Explosionsschutz

In diesem Abschnitt werden die zum Verständnis dieser Arbeit benötigten Grundlagen des Explosionsschutzes und die aktuellen normativen Anforderungen für Geräte vorgestellt, die HF-Strahlung emittieren. Weiterhin werden die potentiellen Zündgefahren bei HF-Strahlung vorgestellt und einer groben Risikoeinschätzung hinsichtlich ihrer Zündwirksamkeit unterzogen.

2.1.1 Voraussetzungen für eine Zündung

Damit es zu einer Explosion kommt, müssen ein Brennstoff (z. B. Benzin) und ein Oxidationsmittel (z. B. Luftsauerstoff) in einem geeigneten Mischungsverhältnis vorliegen. Dieses innerhalb bestimmter Grenzen zündfähige Gemisch kann dann durch eine geeignete Zündquelle gezündet werden. Anschaulich wird dieser Zusammenhang mit dem Explosionsdreieck dargestellt (Abbildung 2.1).



Abbildung 2.1: Explosionsdreieck

Zu den potentiellen Zündquellen gehören nach der DIN EN 1127-1 unter anderem heiße Oberflächen, mechanisch erzeugte Funken, statische Elektrizität sowie elektromagnetische Strahlung im optischen Spektralbereich und im Bereich von 9 kHz bis 300 GHz (in dieser Arbeit allgemein als HF-Strahlung bezeichnet) [1]. Die zuletzt genannte HF-Strahlung stellt die in dieser Arbeit betrachtete Zündquelle dar.

Damit eine Zündquelle wirksam werden kann, d. h. eine Zündung auslösen kann, muss sie in der Lage sein, ein bestimmtes volumenabhängiges Mindestmaß an Energie in

das Gemisch einzubringen. Soll das Gemisch z. B. durch eine heiße Oberfläche gezündet werden, kann die Oberfläche aus diesem Grund nicht beliebig klein sein. Unterhalb einer bestimmten Größe der Oberfläche, die abhängig vom zu zündenden Gemisch wenige mm^2 beträgt, steigt die für eine Zündung benötigte Temperatur teilweise auf ein Vielfaches der Normzündtemperatur für das entsprechende Gemisch an.

Die Zündfähigkeit von explosionsfähigen Gemischen hängt im Allgemeinen auch von den Umgebungsparametern Druck p und Temperatur T ab. In dieser Arbeit werden nur atmosphärische Bedingungen berücksichtigt, d. h. es gilt:

$$-20 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$0,8 \text{ bar} \leq p \leq 1,1 \text{ bar}$$

2.1.2 Aktuelle normative Anforderungen

Damit elektrische Geräte dort eingesetzt werden dürfen, wo explosionsfähigen Atmosphären auftreten können, müssen diese Anforderungen nach der IEC 60079-0 erfüllen [4]. Für strahlungsemittierende Geräte sind in dieser Norm im Abschnitt 6.6.2 in Abhängigkeit von der Gasgruppe Grenzwerte für die Strahlungsleistung bzw. Pulsennergie festgelegt. Eine Auflistung der nicht zu überschreitenden Grenzwerte nach [4] Abschnitt 6.6.2 ist der Tabelle 2.1 zu entnehmen. Die Grenzwerte gelten für den Frequenzbereich von 9 kHz bis 60 GHz, der von den Geräten ebenfalls nicht unter- oder überschritten werden darf.

Tabelle 2.1: Grenzwerte für strahlungsemittierende Geräte in explosionsfähigen Atmosphären; gültig für den Frequenzbereich von 9 kHz bis 60 GHz (vgl. [4]).

Gasgruppe	Strahlungsleistung in W	Pulsennergie in μJ
I	6	1500
II A	6	950
II B	3,5	250
II C	2	50
III	6	1500

Die Grenzwerte sind aufgrund umfassender Untersuchungen entstanden, die im Technischen Bericht CLC/TR50427 vom CENELEC zusammengefasst sind [8]. Aus diesem Bericht geht hervor, dass die Grenzwerte ursprünglich als maximal zulässige Empfangsleistungen an leitfähigen Strukturen, wie z. B. Kränen, aufgrund von in der Nähe aufgestellten Sendemasten festgelegt wurden.

2.1.3 Potentielle Zündquellen bei HF-Strahlung

In der DIN EN 1127-1 und IEC 60079-14 werden 13 mögliche Zündquellen aufgezählt (siehe Anhang 0, Tabelle A.1), wobei HF-Strahlung im Frequenzbereich von 10 kHz bis 300 GHz dazugehört [1]. Dabei wird auf die Gefahr durch Induktion und Funkenbildung an leitfähigen Strukturen hingewiesen. Um HF-Strahlung als Zündquelle umfassend

bewerten zu können ist es notwendig, alle weiteren möglichen Mechanismen zu identifizieren, durch die HF-Strahlung eine Zündung auslösen kann. Zum Beispiel können sich Feststoffe, die HF-Strahlung absorbieren, erwärmen und damit entsteht die Zündquelle „heiße Oberflächen“, indirekt erzeugt durch HF-Strahlung. Analog zur beispielhaften Analyse in der DIN EN 80079-36 (Anhang 0, Tabelle B.1) [9], können durch HF-Strahlung direkt oder indirekt folgende mögliche Zündquellen auftreten:

- Heiße Oberflächen
- Elektrische Funken
- Elektrische Streuströme
- (Elektromagnetische Wellen)

Weitere Zündmechanismen, die in der DIN EN 1127-1 [1] nicht berücksichtigt werden, aber trotzdem auftreten können, sind zum Beispiel eine Zündung durch Gasentladungen oder eine direkte Wechselwirkung der Strahlung durch Anregung bestimmter Atom- bzw. Molekülzustände, durch die es zu einer Dissoziation und damit Radikalbildung kommen kann. Tabelle 2.2 stellt eine Übersicht über alle möglichen Zündmechanismen bei HF-Strahlung dar, die in die drei Gruppen „Heiße Oberflächen“, „Entladungen“ und „Wechselwirkung HF / Gas“ unterteilt sind. Des Weiteren werden diese im Folgenden erläutert.

Tabelle 2.2: Potentielle Zündmechanismen bei HF-Strahlung.

Entladungen	Heiße Oberfläche	Wechselwirkung HF / Gas
Induktion und Funkenentladung	Induktion und ohmsche Verluste (Streuströme)	Gasentladung
	Dielektrische Erwärmung	Anregung von Atomen und Molekülen

Induktion und Funkenentladung

Wie oben schon kurz erwähnt, wurde dieser Mechanismus im CLC/TR50427 [8] umfassend untersucht. Das Szenario, welches dabei betrachtet wird, besteht aus einer Sendeanlage (z. B. Radar, oder Sendemasten für die Telekommunikation) in unmittelbarer Umgebung zu Anlagen, bei denen explosionsfähige Atmosphären auftreten können. Gibt es auf dieser Anlage leitfähige Schleifen, z. B. aufgrund von Rohrsystemen, Kränen oder Tankanlagen (siehe Abbildung 2.2), so können diese als Antenne für die von der Sendeanlage emittierte Strahlung wirken. Wird die Leiterschleife an einem Punkt unterbrochen, kann es an dieser Stelle aufgrund der induzierten Spannung zu einem zündfähigen Funken kommen. Die Untersuchungen im CLC/TR50427 beinhalten Vorschriften und Vorgehensweisen, mit denen eine Risikoanalyse für die Anlage durchgeführt werden kann und Maßnahmen, mit denen ein zündfähiger Funke vermieden werden kann. (vgl. [8])

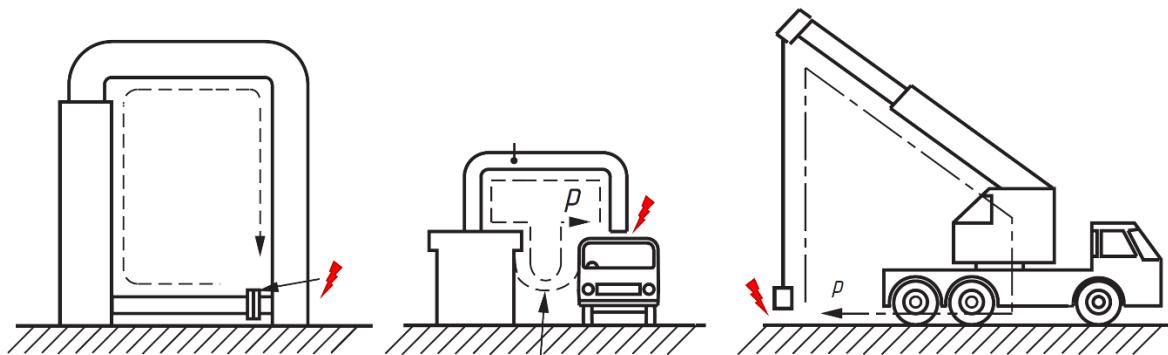


Abbildung 2.2: Beispiele für leitfähige, schleifenartige Strukturen, die sich auf einer Anlage befinden könnten (vgl. [8]).

p: Umfang der Schleife;

Blitz: Kontaktstelle an der ein Funke auftreten könnte

Dabei sei angemerkt, dass konkrete Messungen bis zu einer Frequenz von rund 9 GHz durchgeführt wurden. Die Daten wurden dann für die Anwendung bei höheren Frequenzen auf 60 GHz extrapoliert [8]. Damit Induktion möglich ist, muss die leitfähige Struktur an die Wellenlänge der Strahlung „angepasst“ sein. Dies ist bei niedrigen Frequenzen durch einfache Leiterschleifen leicht möglich, da der Durchmesser der Strukturen durch die langen Wellenlängen im kHz- oder MHz-Bereich relativ groß ausfällt. Bei 60 GHz beträgt die Wellenlänge der Strahlung in Luft bereits nur noch 5 mm und Strukturen, in die diese Strahlung einkoppeln soll, müssen bereits in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Da Induktion jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit ist, wird dieser Mechanismus nicht weiter untersucht.

Induktion und ohmsche Verluste

Analog zu einer Funkenbildung nach Induktion von Spannungen an Leitschleifen, ist auch eine Erwärmung der Leitschleife durch den entstehenden Kreisstrom (Streuströme) und ohmsche Verluste denkbar. Auch dieser Mechanismus wird hier nicht weiter untersucht.

Dielektrische Erwärmung

Die dielektrische Erwärmung beschreibt einen Prozess, bei dem hochfrequente, elektromagnetische Strahlung durch Materialien absorbiert und in Wärme umgewandelt wird. Dieser Mechanismus wird in Abschnitt 2.2.2 detailliert beschrieben.

Aktuelle Radarsysteme zur Füllstandsmessung arbeiten bei hohen Betriebsfrequenzen im zwei- oder dreistelligen GHz-Bereich. Die HF-Strahlung wird dabei stark gebündelt, um möglichst ungestört in Behältern mit vielen Einbauten messen zu können. Die Bündelung der Strahlung erhöht jedoch die Leistungsdichte und potentielle Absorber könnten punktförmig so erhitzt werden, dass die Oberflächentemperatur an diesem Punkt für eine Zündung ausreicht (Hotspot). Dies wurde in der Vergangenheit analog bereits für optische Strahlung und Ultraschall untersucht [10], [11]. Die Untersuchung für elektromagnetische Strahlung im Bereich von 60 GHz bis 330 GHz ist Gegenstand dieser Arbeit.

Gasentladung

Bei einer Gasentladung kommt es zu einem Stromfluss durch ein Gas, welches dabei ionisiert wird. Um eine Gasentladung zu starten, werden freie Elektronen benötigt, von denen eine geringe Menge grundsätzlich in der Atmosphäre vorhanden ist. Durch Stoßionisation wird ein Lawineneffekt ausgelöst, der den Durchbruch kennzeichnet. Ein Gasdurchbruch ist grundsätzlich zündfähig.

Freie Elektronen, die einem hochfrequenten elektromagnetischen Feld ausgesetzt werden, folgen dem Feld mit einer Phasenverschiebung von 90° und nehmen daher zunächst keine Energie aus dem E -Feld auf. Bei Stößen mit Atomen ändert sich die Bewegungsrichtung der Elektronen zufällig, wodurch die Elektronen Energie aufnehmen. Bei jedem Stoß nehmen die Elektronen weitere Energie auf, bis sie in der Lage sind, Atome bzw. Moleküle durch unelastische Stöße zu ionisieren und weitere Elektronen freizusetzen. Es kommt zu einem Gasdurchbruch, wenn mehr Elektronen durch Stöße freigesetzt werden als verloren gehen, wobei Verluste von Elektronen für den Fall der HF-Strahlung nur durch Diffusion auftreten [12].

Die für einen Gasdurchbruch benötigte Feldstärke hängt vom Druck ab und sinkt zunächst mit sinkendem Druck ab. Bei dem Druck, bei dem die Stoßfrequenz der Frequenz der HF-Strahlung gleicht, ist die benötigte Feldstärke minimal. Sinken die Drücke weiter ab, steigt die Feldstärke wieder an. Die minimale Feldstärke für einen Durchbruch bei Wasserstoff und einer Frequenz von 3 MHz wird bei einem Druck von rund 5 mbar erreicht und beträgt $E = 200 \text{ V/cm} = 20\,000 \text{ V/m}$ [12]. Bei Umgebungsdruck steigt die Feldstärke um ein Vielfaches dieses Wertes an. Zum Vergleich: Mit der später vorgestellten HF-Elektronik kann eine HF-Strahlung mit einer Leistung von max. 2 W auf einen Punkt mit einem Durchmesser von ungefähr 5 mm fokussiert werden. Dies entspricht einer Feldstärke von $E = 3100 \text{ V/m}$. Um auf eine Feldstärke von $20\,000 \text{ V/m}$ zu kommen, müsste die Antenne eine Leistung von $\approx 83 \text{ W}$ abstrahlen, damit es bei einem Druck von 5 mbar zu einem Gasdurchbruch kommt.

Aufgrund der hohen benötigten Strahlungsleistungen bei geringen Drücken, wird dieser Effekt hier nicht weiter untersucht und als nicht praxisrelevant für die Füllstandsmessung eingestuft.

Weiterführende Literatur: [13], [14], [15], [16].

Anregung von Atomen und Molekülen

Bei der Radarfüllstandsmessung mit einer Frequenz von 80 GHz bei Aceton wurde beobachtet, dass das Radarsignal vom Dampf über dem Aceton absorbiert wurde und aufgrund des fehlenden Echos keine Messung möglich war. In diesem Abschnitt sollen die möglichen Ursachen dafür untersucht und hinsichtlich ihrer Zündfähigkeit kurz bewertet werden. Grundsätzlich können durch die Absorption der Strahlung Bindungen in Molekülen aufgebrochen werden und freie Radikale erzeugt werden. Diese können mit Sauerstoff reagieren und somit eine Zündung hervorrufen.

Zunächst wird die Photolyse, also das Aufbrechen von Molekülbindingen durch die Absorption eines Photons untersucht. Die Energie des absorbierten Photons muss größer als die Bindungsenergie der Molekülverbindung sein, daher tritt dieser Effekt hauptsächlich im UV-Bereich oder bei noch kürzeren Wellenlängen auf.

Beispiel:

Die Bindungsenergie der Verbindung C-Cl beträgt $5,48 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ pro Molekül [17]. Damit das Photon die gleiche Energie oder mehr besitzt, darf die Wellenlänge höchstens

362,5 nm betragen. Dies entspricht einer Strahlung im UV-A-Bereich mit einer Frequenz von 827 THz.

Bei Frequenzen bis 330 GHz ist eine Zündung durch Photolyse somit nicht zu erwarten, da die Energie der Strahlung weit unterhalb der benötigten Energie liegt.

Eine weitere Möglichkeit der Absorption von Strahlung durch Moleküle ist die Anregung von Rotationszuständen im Molekül. Dies ist bei allen „mikrowellenaktiven“ Molekülen, also solchen, die polare Molekülverbindungen besitzen, möglich. Dies sind z.B. Kohlenwasserstoffe, die eine C=O-Doppelbindung oder eine C-F- bzw. C-Cl-Bindung aufweisen, unter anderem auch Aceton.

Der Frequenzbereich für die Anregung von Rotationszuständen J beträgt im Allgemeinen 30 GHz bis 300 GHz und ist im Mikrowellenbereich daher grundsätzlich möglich. Typischerweise fallen die angeregten Atome nach einer Relaxationszeit im ns-Bereich, wieder auf den Grundzustand zurück. Weiterhin besagen die Auswahlregeln für die Anregung, dass nur benachbarte Rotationszustände $\Delta J = \pm 1$ angeregt werden können. Eine Anregung höherer Rotationszustände mit einer einzigen Quelle ist somit sehr unwahrscheinlich.

Neben Rotationszuständen können auch Vibrationszustände angeregt werden. Diese besitzen einen größeren Energieabstand als die Rotationszustände und können daher nur in einem Frequenzbereich mit höherer Energie angeregt werden. Dieser liegt typischerweise im Bereich von 3 THz bis 300 THz.

Grundsätzlich ist eine konsekutive Anregung von Rotations- und Vibrationszuständen denkbar, so dass die aufgenommene Energie die Bindungsenergie des Moleküls überschreitet und das Molekül dissoziiert. Da dieser Prozess jedoch eine exakte und konsekutive Anregung der einzelnen Zustände voraussetzt, was mit einer einzigen Quelle nicht zu bewerkstelligen ist, wird dieser Mechanismus als unbedenklich im Sinne des Explosionsschutzes eingestuft.

Weiterführende Literatur: [18], [19], [20].

2.2 Hochfrequenztechnik

In diesem Kapitel werden zunächst die Eigenschaften elektromagnetischer Wellen bzgl. ihrer Ausbreitung, Reflexion und Transmission sowie Dämpfung beschrieben. Es wird die komplexe Permittivität erläutert und auf die dielektrische Erwärmung eingegangen. Zum Schluss wird der Gaußsche Strahl vorgestellt. Große Teile dieses Grundlagenkapitels basieren auf den Literaturquellen [21] und [22].

2.2.1 Eigenschaften elektromagnetischer Wellen

Ausbreitung, Polarisation, Dämpfung

Eine sich in z -Richtung ausbreitende, ebene Welle wird über ihr E - und H -Feld beschrieben (2.1):

$$\begin{aligned}\underline{\vec{E}} &= \hat{x}E_0 e^{-\underline{\gamma}z} \\ \underline{\vec{H}} &= \hat{y}\frac{1}{Z_0}E_0 e^{-\underline{\gamma}z}\end{aligned}\tag{2.1}$$

Dabei sind \hat{x} , \hat{y} die Einheitsvektoren in x - und y -Richtung, E_0 die Amplitude des E -Feldes, Z_0 der Freiraumwellenwiderstand (mit $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120 \pi \Omega$) und γ die komplexe Ausbreitungskonstante. Im kartesischen Koordinatensystem ist diese Welle so orientiert, dass das E -Feld in der xz -Ebene schwingt, das H -Feld senkrecht dazu in der yz -Ebene.

Der Poynting-Vektor (2.2) beschreibt den Leistungsfluss, der in diesem Fall in z -Richtung erfolgt.

$$\underline{\vec{S}} = \underline{\vec{E}} \times \underline{\vec{H}}\tag{2.2}$$

Die Polarisation einer elektromagnetischen Welle wird aus der geometrischen Lage des E -Feldes bestimmt. Eine Welle kann linear oder zirkular polarisiert sein. Bei der linearen Polarisation schwingt das E -Feld wie oben beschrieben in einer Ebene und kann je nach Lage des E -Feldes weiter unterteilt werden in eine horizontale oder vertikale Polarisation. Bei der zirkularen Polarisation dreht sich das E -Feld entweder im oder gegen den Uhrzeigersinn, wobei der Leistungsfluss weiterhin senkrecht zum E - und H -Feld erfolgt.

Die Ausbreitungskonstante γ setzt sich aus der Dämpfungskonstante α und der Phasenkonstante β zusammen (2.3):

$$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta\tag{2.3}$$

Dabei gilt für verlustlose Medien $\alpha = 0$ und $\beta = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$. Breitet sich die Welle dagegen in einem verlustbehafteten Medium aus, wird die Welle mit zunehmender Ausbreitung exponentiell gedämpft, siehe Abbildung 2.3. Dies wird deutlich, wenn der Ausbreitungsterm (2.4)

$$e^{-\gamma z} = e^{-\alpha} e^{-j\beta} \quad (2.4)$$

im Zeitbereich (2.5)

$$e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \quad (2.5)$$

betrachtet wird. Dabei ist ω die Kreisfrequenz und t die Zeit.

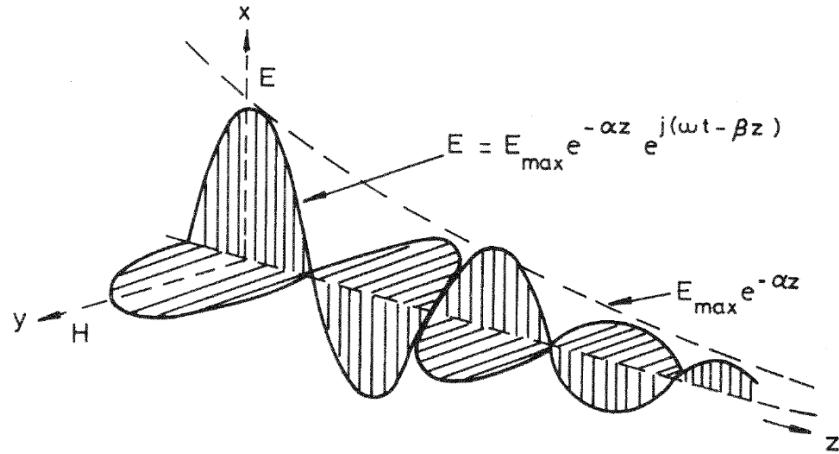


Abbildung 2.3: Ausbreitung einer Welle im verlustbehafteten Medium ([18], Fig. 4.7)

Da sich die Leistung proportional zum Quadrat der Feldstärke verhält, fällt diese mit (2.6):

$$P \sim e^{-2\alpha z} \quad (2.6)$$

Die Eindringtiefe D_P bezeichnet die Tiefe, bei der die Leistung der Welle nach dem Eindringen in das verlustbehaftete Medium auf $1/e \approx 37\%$ abgefallen ist und berechnet sich über (2.7):

$$D_P = \frac{1}{2\alpha} \quad (2.7)$$

Reflexion

Trifft eine elektromagnetische Welle auf ein Medium, wird ein Teil der Welle reflektiert und ein Teil der Welle transmittiert. Unter Einführung des Reflexionskoeffizienten Γ und des Transmissionskoeffizienten T lassen sich die reflektierten (\vec{E}_r) und transmittierten (\vec{E}_t) Anteile der Welle analog zu (2.1) ausdrücken über (2.8).

$$\begin{aligned} \vec{E}_r &= \hat{x} \Gamma E_0 e^{+\gamma z} & \vec{E}_t &= \hat{x} T E_0 e^{-\gamma z} \\ \vec{H}_r &= -\hat{y} \frac{\Gamma}{Z_0} E_0 e^{+\gamma z} & \vec{H}_t &= \hat{y} \frac{T}{Z} E_0 e^{-\gamma z} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Dabei bezeichnet \underline{Z} den komplexen und ggf. verlustbehafteten Widerstand (Impedanz) des Mediums. Die Reflexions- und Transmissionskoeffizienten berechnen sich mit (2.9) zu

$$\Gamma = \frac{\underline{Z} - Z_0}{\underline{Z} + Z_0} \quad (2.9)$$

$$T = \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z} + Z_0} = 1 + \Gamma$$

Die Impedanz \underline{Z} eines Materials steigt mit steigenden Materialverlusten an, wodurch auch der Reflexionskoeffizient ansteigt und gegen 1 strebt. Bei sehr guten Leitern, wie z.B. Metallen, wird die Welle daher fast vollständig reflektiert. Bei Medien mit sehr geringen Verlusten wird ein Teil der Welle aufgrund des Impedanzunterschieds zu Z_0 immer noch reflektiert, der transmittierte Anteil wird aber kaum absorbiert. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden Medien vorgestellt, die „dazwischen liegen“ und sich gut als Absorber verwenden lassen.

Im Übrigen wird das Reflexions- und Transmissionsverhalten linearer HF-Komponenten mit sogenannten S-Parametern beschrieben. Die S-Parameter geben das Verhältnis zwischen der in das Tor einlaufenden zur auslaufenden Welle wieder. Bei Komponenten mit zwei Toren, zu denen auch die Materialien bei der Materialcharakterisierung zählen (denn S-Parameter lassen sich auch beim Freistrahl anwenden), existiert die Matrix (2.10)

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

wobei $a_{1,2}$ jeweils die an den Toren 1 und 2 einlaufenden Wellen und $b_{1,2}$ jeweils die an den Toren 1 und 2 auslaufenden Wellen bezeichnen. Die Parameter S_{xx} werden S-Parameter genannt und verknüpfen die Wellen a und b miteinander. Die S-Parameter haben dabei die in Tabelle 2.3 angegebene Bedeutung. Für lineare und reziproke Netzwerke mit zwei Toren gilt $S_{11} = S_{22}$ und $S_{21} = S_{12}$.

Tabelle 2.3: Bedeutung der S-Parameter

S-Parameter	Formel
S_{11} - Eingangsreflexionsfaktor	$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big _{a_2=0}$
S_{22} - Ausgangsreflexionsfaktor	$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \Big _{a_1=0}$
S_{21} - Vorwärts-Transmissionsfaktor	$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big _{a_2=0}$
S_{12} - Rückwärts-Transmissionsfaktor	$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big _{a_1=0}$

Komplexe Permittivität

Im Vakuum sind die elektrische und magnetische Flussdichte $\underline{\vec{D}}$ und $\underline{\vec{B}}$ über (2.11) mit der elektrischen und magnetischen Feldstärke $\underline{\vec{E}}$ und $\underline{\vec{H}}$ verknüpft.

$$\begin{aligned}\underline{\vec{D}} &= \epsilon_0 \underline{\vec{E}} \\ \underline{\vec{B}} &= \mu_0 \underline{\vec{H}}\end{aligned}\tag{2.11}$$

Dabei ist $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ die Permittivität und $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ die Permeabilität des Vakuums. In einem dielektrischen Medium sorgt ein angelegtes elektrisches Feld $\underline{\vec{E}}$ dafür, dass die Atome bzw. Moleküle polarisiert werden, bzw. evtl. vorhandene Dipole ausgerichtet werden. Diese Polarisation $\underline{\vec{P}}$ addiert sich zu der elektrischen Flussdichte zu (2.12):

$$\underline{\vec{D}} = \epsilon_0 \underline{\vec{E}} + \underline{\vec{P}}\tag{2.12}$$

Dabei ist die Polarisation linear über (2.13) mit der elektrischen Feldstärke verknüpft, wobei $\underline{\chi}$ als (komplexe) Suszeptibilität bezeichnet wird.

$$\underline{\vec{P}} = \epsilon_0 \underline{\chi} \underline{\vec{E}}\tag{2.13}$$

Weiterhin gilt somit (2.14):

$$\underline{\vec{D}} = \epsilon_0 \underline{\vec{E}} + \underline{\vec{P}} = \epsilon_0 (1 + \underline{\chi}) \underline{\vec{E}} = \underline{\epsilon} \underline{\vec{E}}\tag{2.14}$$

Dabei ist (2.15) die komplexe Permittivität des Mediums.

$$\underline{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0 (1 + \underline{\chi})\tag{2.15}$$

Der Imaginärteil der komplexen Permittivität, der auch als Verlustfaktor bezeichnet wird, beschreibt dabei die Verluste des Materials und besitzt aus Gründen der Energieerhaltung ein negatives Vorzeichen. Es gilt weiterhin (2.16), wobei der Index r den materialspezifischen, relativen Anteil der Permittivität bezeichnet.

$$\underline{\epsilon} = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon'_r - j\epsilon''_r)\tag{2.16}$$

Ist das Material elektrisch leitfähig, so kommt es beim Anlegen eines elektrischen Feldes zu einer Verschiebung von Ladungsträgern und damit zu ohmschen Verlusten. Diese Verluste (Index c) sind nach außen hin nicht von den Verlusten durch die genannten Polarisationsmechanismen zu unterscheiden und tragen daher ebenfalls zum Verlustfaktor des Materials bei. Der aufgrund von Leitfähigkeit entstehende, relative Verlustfaktor lässt sich über (2.17) berechnen, wobei σ die Leitfähigkeit des Materials bezeichnet.

$$\varepsilon_c'' = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \quad (2.17)$$

Die Verluste aufgrund der Leitfähigkeit fallen mit steigender Frequenz ab.

Der Imaginärteil der relativen komplexen Permittivität setzt sich nun aus den Beiträgen der einzelnen Verlustmechanismen zu dem effektiven, relativen Verlustfaktor (2.18) zusammen.

$$\varepsilon_{eff}'' = \varepsilon_d'' + \varepsilon_e'' + \varepsilon_a'' + \varepsilon_{mw}'' + \varepsilon_c'' \quad (2.18)$$

Bei den in dieser Arbeit betrachteten Frequenzen und Materialien liefern jedoch nur die Verluste durch die Ausrichtung von Dipolen und ohmsche Verluste durch Leitfähigkeit signifikante Beiträge. Der effektive Verlustfaktor wird daher zu (2.19):

$$\varepsilon_{eff}'' = \varepsilon_d'' + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \quad (2.19)$$

Eine weitere wichtige Größe in diesem Zusammenhang ist der Verlustwinkel δ , der über (2.20) berechnet wird.

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_{eff}''}{\varepsilon_r'} = \frac{\omega \varepsilon_d'' + \frac{\sigma}{\varepsilon_0}}{\omega \varepsilon_r'} \quad (2.20)$$

2.2.2 Dielektrische Erwärmung

Die im Medium absorbierte Leistung wird über die in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Verlustmechanismen in Wärme umgesetzt. Die in Wärme umgesetzte Leistung P_{abs} lässt sich allgemein über (2.21) berechnen, wobei der Stern (*) eine komplexe konjugierte Größe bezeichnet.

$$P_{abs} = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{eff}'' \int_V (\vec{E}^* \cdot \vec{E}) dV \quad (2.21)$$

Für eine ebene Welle, die das ganze Volumen gleichmäßig durchsetzt, vereinfacht sich (2.21) zu (2.22):

$$P_{abs} = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{eff}'' E_{rms}^2 V \quad (2.22)$$

Damit sich die Materialien gut erwärmen lassen, sollten diese ein hohes ε_{eff}'' aufweisen. Da sich die absorbierte Leistung P_{abs} proportional zu ω verhält, steigt die in Wärme umgesetzte Leistung mit der Frequenz an, vorausgesetzt ε_{eff}'' besitzt kein „gegensätzliches“ Verhalten.

Da die Permittivität der Materialien grundsätzlich temperaturabhängig sein kann, sind beim Erwärmen zwei Szenarios denkbar: Zum einen kann P_{abs} mit der Temperatur fallen, wenn $d_T \varepsilon''_{eff} < 0$ und es kommt zu einem Grenzwert für die mögliche Erwärmung des Materials. Zum anderen kann es für $d_T \varepsilon''_{eff} > 0$ zu einem „Thermal Runaway“ kommen, da die absorbierte Leistung mit der Temperatur ansteigt.

Bei begrenzter Leistungsaufnahme stellt sich nach einiger Zeit ein Gleichgewicht zwischen der vom Medium aufgenommenen Leistung P_{abs} und der an die Umgebung abgegebenen Leistung P_{loss} ein. Es kommt zu einer Gleichgewichtstemperaturverteilung an der Oberfläche des Materials. Wärme wird über die Mechanismen Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung an die Umgebung abgegeben.

Die durch Wärmeleitung übertragene Leistung \dot{Q}_L kann im einfachsten Fall über (2.23) berechnet werden.

$$\dot{Q}_L = \kappa \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d} \quad (2.23)$$

Dabei ist κ die Wärmeleitfähigkeit, A die Fläche, durch die die Wärme strömt, ΔT der Temperaturunterschied zwischen den beiden Flächen und d der entsprechende Abstand.

Luft, die durch das aufheizende Material erwärmt wird, beginnt nach oben zu steigen und kalte Luft von unten fängt an nachzustromen. Es kommt zu freier Konvektion bzw. Wärmestromung, durch die es ebenfalls zu einer Leistungsabgabe kommt.

Wärmestrahlung hingegen ist wie HF-Strahlung elektromagnetische Strahlung, die von jedem Körper mit einer Temperatur $T > 0$ K abgestrahlt wird. Die Wellenlänge liegt bei Raumtemperatur jedoch im Bereich um 10 μm (Infraroter Spektralbereich) und erstreckt sich bei steigenden Temperaturen in den sichtbaren Spektralbereich. Der Emissionsgrad ε_g ist eine Eigenschaft des Körpers und gibt an, wie viel Strahlung der Körper im Vergleich zu einem perfekten schwarzen Strahler abgibt. Dieser liegt zwischen 0 (perfekter Spiegel) und 1 (idealer schwarzer Körper). Der über Wärmestrahlung abgegebene Wärmestrom \dot{Q}_R kann über das Stefan-Boltzmann-Gesetz (2.24) berechnet werden,

$$\dot{Q}_R = \varepsilon_g \sigma A T^4 \quad (2.24)$$

wobei σ die Stefan-Boltzmann-Konstante mit $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$ bezeichnet. Da sich die abgegebene Leistung \dot{Q}_R proportional zu T^4 verhält, fällt die Wärmeabgabe durch Wärmestrahlung bei hohen Temperaturen besonders ins Gewicht.

2.2.3 Gaußscher Strahl

Die Antenne, die im späteren Verlauf für die Versuche verwendet wird, weist ein konvergierendes Strahlprofil auf, so dass die HF-Strahlung auf einen Punkt fokussiert wird. Dieses Strahlprofil lässt sich gut mit dem Gaußschen Strahl, gezeigt in Abbildung 2.4 annähern.

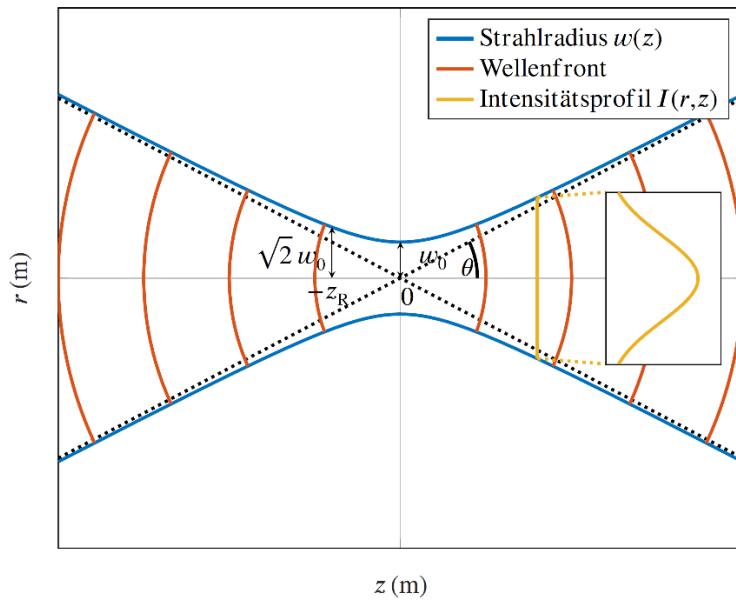


Abbildung 2.4: Gaußscher Strahl: z-Achse Ausbreitungsrichtung; r-Achse Radius

Das Intensitätsprofil $I(r, z)$ des Gaußschen Strahls ist namensgebend und wird über (2.25) beschrieben,

$$I(r, z) = I_0 \left(\frac{w_0}{w(z)} \right)^2 \cdot e^{\frac{-2r^2}{w^2(z)}} \quad (2.25)$$

wobei sich die Intensität I_0 aus der eingespeisten Leistung P_0 über (2.26) berechnen lässt.

$$I_0 = \frac{2P_0}{\pi w_0^2} \quad (2.26)$$

Dabei ist w_0 der Strahlradius an der Taille (in Abbildung 2.4 bei $z = 0$), der beim Gaußschen Strahl oft als $1/e^2$ -Breite angegeben wird. Der Radius $w(z)$ wird also immer dort „gemessen“, wo die Intensität auf das $1/e^2 = 0,135$ -fache der maximalen Intensität abgefallen ist. Dieser lässt sich weiterhin über die Hyperbel nach (2.27) beschreiben,

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2} \quad (2.27)$$

wobei (2.28) als Rayleigh-Länge bezeichnet wird.

$$z_R = \frac{\pi w_0^2 n}{\lambda} \quad (2.28)$$

Dabei ist λ die Wellenlänge der Strahlung und n der Brechungsindex des Mediums. An den Stellen $z = \pm z_R$ beträgt der Radius des Strahls jeweils $w(\pm z_R) = \sqrt{2}w_0$. Dieser Bereich um die Taille herum wird außerdem als „Depth of Field“ (DOF) oder Fokustiefe bezeichnet und seine Länge beträgt $DOF = 2z_R$. Außerdem existiert ein „Fokus-Limit“ für den Radius w_0 an der Taille, der sich über (2.29) berechnen lässt.

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_R}{z} \right)^2 \right] \quad (2.29)$$

3 Charakterisierung von dielektrischen Materialparametern und deren Erwärmung

In diesem Kapitel werden die zur dielektrischen Erwärmung durchgeführten Versuche vorgestellt. Ziel ist es, den worst-case Fall für die Bestrahlung potenzieller Absorber mit HF-Strahlung durch Radarsensoren oder ähnlicher Geräte zu konstruieren und die maximale Temperaturerhöhung in Abhängigkeit der Strahlungsleistung für diesen Fall zu ermitteln.

Dabei wird das Absorbermaterial sowie die Größe und die Geometrie der Proben variiert. Zunächst werden die Vorversuche vorgestellt, zu denen eine Materialcharakterisierung der ausgewählten Absorbermaterialien und die Charakterisierung des Antennenprofils der zur Bestrahlung benutzten Antenne gehört. Danach werden die einzelnen Teile der Erwärmungsmessungen beschrieben, was den Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse beinhaltet. Der Versuchsaufbau besteht aus einer HF-Signalerzeugung, einem Temperaturmesssystem und einer Probenhalterung. Die Versuche werden bei einer Frequenz von 92 GHz durchgeführt.

Es soll außerdem die Erwärmung an den Antennen der Radarfüllstandsmessgeräte gemessen werden. Dazu wird eine Radarantenne für das Hohlleiterband WR-10 von Endress+Hauser mithilfe eines Kalorimeters auf ihre Erwärmung hin untersucht.

3.1 Auswahl der Materialien

Die bei den hier vorgestellten Versuchen verwendeten Materialien werden nach den in Abschnitt 2.2.2 beschrieben Eigenschaften ((Ab-)Leitfähigkeit, polare Moleküle) ausgewählt. Da die Auswahl an Materialien (v. a. Feststoffen) mit polaren Molekülen sehr eingeschränkt ist, werden stattdessen (ab-)leitfähige Materialien herausgesucht. Am besten eignen sich hier ESD-Materialien (ESD - Electrostatic Discharge) aus diversen Kunststoffen, die durch den Zusatz von Kohlenstoff eine gewisse Leitfähigkeit aufweisen. Vor allem ESD-Materialien auf der Basis von PEEK (Polyetheretherketon) eignen sich aufgrund hoher Temperaturbeständigkeit (Schmelztemperatur 343 °C [23]) und hoher mechanischer Festigkeit gut für die Versuche. Eine vollständige Liste mit den bei den Versuchen verwendeten Materialien, deren Herstellern und Bezugsquellen findet sich im Anhang 0.

Je höher die Leitfähigkeit des Materials ist, desto stärker wird die HF-Strahlung wieder reflektiert. Ziel ist es, Materialien zu finden, die nach Möglichkeit 90% der Strahlung oder mehr absorbieren. Dazu werden die Materialien im nächsten Schritt bezüglich ihrer dielektrischen Eigenschaften charakterisiert.

3.2 Bestimmung der dielektrischen Materialparameter

Um die Materialien entsprechend ihrer dielektrischen Materialparameter ϵ'_r und ϵ''_r vorsortieren zu können und Daten für eine spätere Simulation zu erhalten, wird die komplexe Permittivität ϵ_r der Materialien gemessen. Dazu wird ein in Fachbereich 2.2 der PTB entwickelter Messaufbau verwendet (Abbildung 3.1) [24].

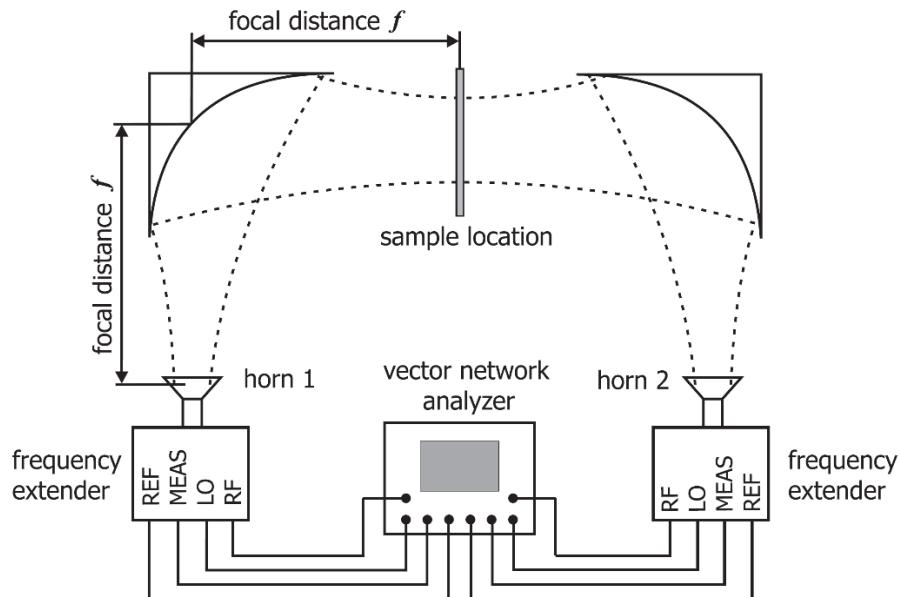


Abbildung 3.1: Quasioptischer Messaufbau zur Messung der Materialparameter [24]

Mit dem Messaufbau kann die komplexe Permittivität der Materialien im Frequenzbereich von 60 GHz bis 330 GHz bei Raumtemperatur gemessen werden. Durch eine Näherung im Algorithmus für die Umrechnung der S-Parameter in die Permittivität sollte der Verlustfaktor $\tan \delta$ kleiner 0,1 sein, da es ansonsten zu Ungenauigkeiten in der Berechnung kommt.

Tabelle 3.1 zeigt die Werte für ϵ'_r , ϵ''_r und $\tan \delta$ bei 92 GHz für die vermessenen Materialien. Für einige ESD-Materialien, bei denen $\tan \delta$ die Grenze von 0,1 überschreitet, sind die Messdaten als Näherungswerte zu verstehen. Einige weitere ESD-Materialien konnten aufgrund ihrer hohen Dämpfung nicht vermessen werden, werden jedoch dennoch für die Erwärmungsversuche eingesetzt. Insgesamt zeigt die Messung hohe Werte für die Dämpfung ϵ''_r bei ESD-Materialien und eher geringe Werte bei Kunststoffen und ESD-Schäumen.

Tabelle 3.1: Messwerte aus der Materialcharakterisierung bei 92 GHz und (20 ± 5) °C

ESD-Material	ϵ'_r	ϵ''_r	$\tan \delta$	Kunststoff	ϵ'_r	ϵ''_r	$\tan \delta$
PE1000	2,6	0,34	0,13	PTFE	2,1	0,005	0,002
PE UHMW ESD	2,5	0,25	0,1	PVC-Hart	2,8	0,03	0,01
TivarEco	2,6	0,28	0,1	Acryl	2,5	0,02	0,008
ST6000	2,6	0,33	0,12	Polypropylen	2,3	0,003	0,001
ESD-Mat. Nr. 1	12,7	1,8	0,14	PEEK	3,2	0,02	0,006
ESD-Mat. Nr. 2	12,9	2,6	0,12				
				ESD-Schäume	ϵ'_r	ϵ''_r	$\tan \delta$
Carbon Mide	-	-	-	ESD-Schaumstoff	1,2	0,05	0,04
PEEK ESD101	-	-	-	HF-Absorber (top)	1,1	0,03	0,03
PEEK CA30	-	-	-	HF-Absorber (mid)	1,1	0,06	0,005
Murflohr+Kohle	-	-	-	HF-Absorber (bot)	1,2	0,16	0,14

3.3 Bestimmung des Antennenprofils

Für die Durchführung der Erwärmungsversuche wird eine fokussierende Rundhornantenne mit aufgesetzter PTFE-Linse verwendet (Eravant SAQ-903017-10-S1). Die Antenne arbeitet im W-Band (75 GHz bis 110 GHz) und weist bei 10 dB unterhalb des Maximums eine Brennweite von 43,18 mm (1,7") und einen Fokusdurchmesser von 5,08 mm (0,2") auf [25].

Um die bestmögliche Bestrahlung der Proben zu ermöglichen, wird die Abstrahlcharakteristik der Antenne bei der Versuchsfrequenz von 92 GHz nachgemessen. Dazu wird die Feldstärke vor der Antenne in verschiedenen Ebenen mit einem dielektrischen Wellenleiter (WR-10), der während der Messung in je zwei Dimensionen verfahren werden kann, abgetastet. Um eine optimale Einkopplung des Feldes in den Wellenleiter zu ermöglichen wird das Ende des Wellenleiters an der langen Seite angespitzt. Das andere Ende wird an einen VNA angeschlossen.

Abbildung 3.2 zeigt die im Versuchsaufbau verwendete Ausrichtung der Antenne und des Wellenleiters. Der Wellenleiter ist über eine Halterung an zwei motorisierten Linearachsen befestigt (in Abbildung 3.2 nicht gezeigt). Für die Messung werden die Linearachsen jeweils so ausgerichtet, dass der Wellenleiter entweder in x- und y-Richtung, in x- und z-Richtung oder in y- und z-Richtung verfahren werden kann. Die Motoren der Linearachsen werden von einem Labview-Skript angesteuert, welches in Fachbereich 2.2 der PTB entwickelt wurde.

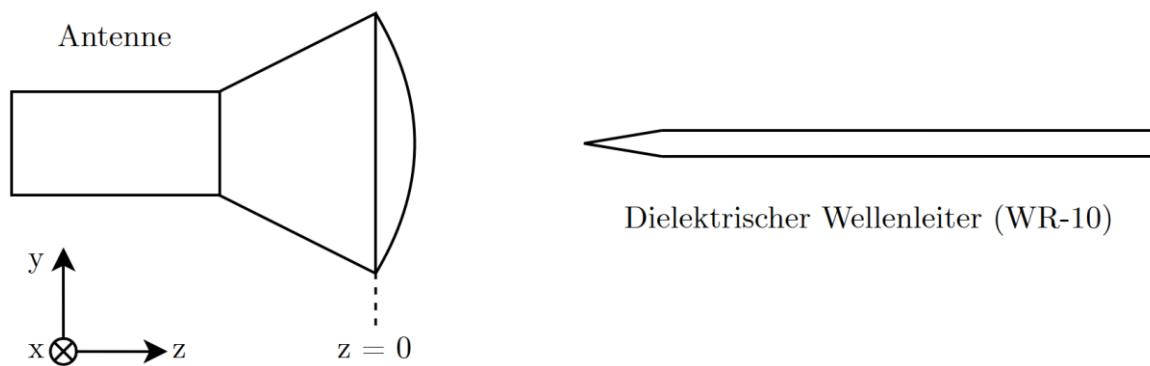


Abbildung 3.2: Versuchsaufbau zur Messung der Antennencharakteristik

Um zu überprüfen, in welchem Abstand sich der Fokus der Antenne befindet, werden zunächst die xz- und yz-Ebenen abgetastet und danach die xy-Ebene, in der sich der Fokus befindet. Die Schrittweite beträgt bei den Messungen in der xz- und yz-Ebene 0,5 mm und in der xy-Ebene 1 mm.

Die Ergebnisse der Messung sind in Abbildung 3.3 für 92 GHz dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Lage des Fokus bei $z = 43$ mm bestätigt werden konnte. Der Fokus selbst ist leicht elliptisch verzerrt und hat eine Halbwertsbreite bzw. -höhe von 4 mm bzw. 3,5 mm. Bei 10 dB unterhalb des Maximums betragen die Breite und die Höhe jeweils 7 mm und 6 mm.

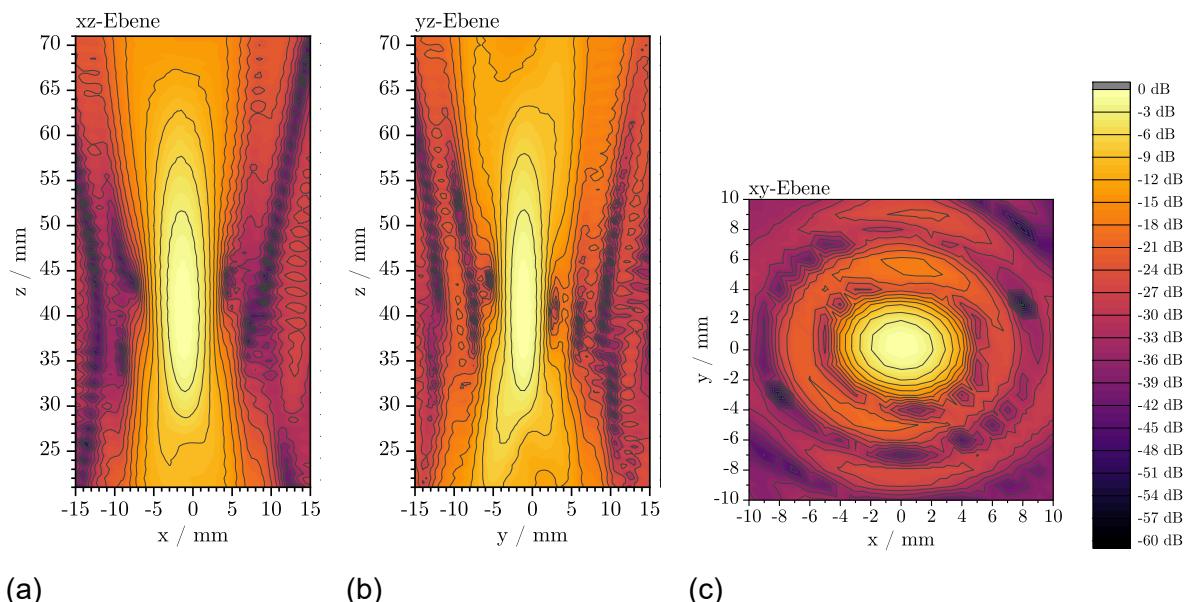


Abbildung 3.3: Messergebnisse der Antennencharakteristik bei 92 GHz
(a) xz-Ebene; (b) yz-Ebene; (c) xy-Ebene

3.4 Erwärmungsmessungen

In diesem Abschnitt werden der Versuchsaufbau, die -durchführung und die Resultate der Erwärmungsmessungen beschrieben.

3.4.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau für die Erwärmungsmessungen besteht aus der HF-Signalerzeugung, einem Temperaturmesssystem (bestehend aus Thermoelement und Wärmebildkamera) sowie einer Probenhalterung.

HF-Signalerzeugung

Die Versuche sollen bei einer Frequenz durchgeführt werden, bei der möglichst viel Leistung zur Verfügung gestellt werden kann. Aufgrund einer Anwendung im Wetterradar sind leistungsstarke Verstärker bei Frequenzen um 94 GHz verfügbar. Der hier verwendete Leistungsverstärker (HPA - High Power Amplifier) (Millitech AMP-10-41300) arbeitet im Frequenzbereich von 92 GHz bis 96 GHz und besitzt bei 92 GHz sein Leistungsmaximum. Die Versuche werden daher bei 92 GHz durchgeführt.

Der Aufbau der HF-Signalerzeugung ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Um das Ausgangssignal bei 92 GHz zu erzeugen, wird zunächst ein Signal bei 15,33 GHz mithilfe eines Signalgenerators (Rohde&Schwarz SMF100A) erzeugt. Die Frequenz des erzeugten Signals wird anschließend mithilfe eines Vervielfachers (VDI WR10SGX-M) um den Faktor 6 auf 92 GHz angehoben. Das vervielfachte Signal wird mithilfe des HPA auf bis zu 2 W verstärkt und von der fokussierenden Rundhornantenne (s. o.) abgestrahlt. Um die Leistung am Eingang der Antenne und den Gain des Verstärkers bestimmen zu können, wird vor und nach dem HPA jeweils ein Teil der Leistung über Richtkoppler ausgekoppelt. Der Isolator zwischen dem Vervielfacher und dem HPA schützt beide Geräte vor Reflexionen in diesem Pfad.

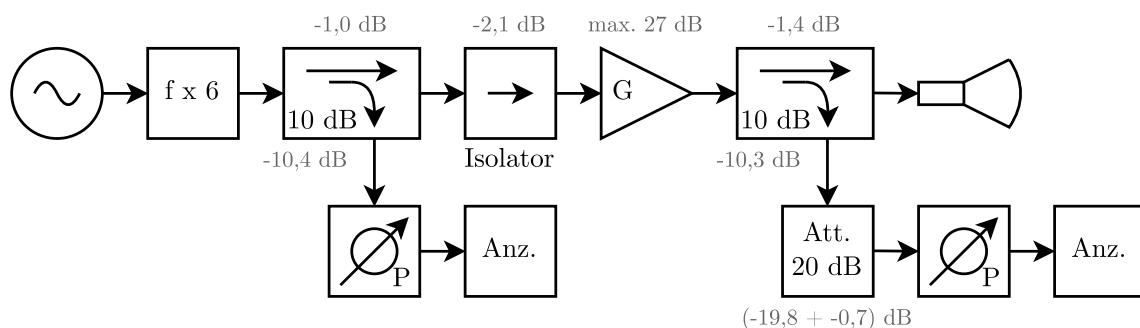


Abbildung 3.4: Versuchsaufbau zur Erzeugung der HF-Strahlung mit Leistungsmessung

Die Ausgangsleistung der HF-Signalerzeugung wird über die Ausgangsleistung des Vervielfachers eingestellt. Dieser besitzt für diesen Zweck einen Eingang für eine Spannung von 0 V bis 5 V, wobei der Vervielfacher bei 0 V abgeschaltet ist und bei 5 V die volle Ausgangsleistung von 18 dBm liefert. Die Leistung der HF-Strahlung an der Antenne P_{out} berechnet sich aus dem ausgekoppelten Teil hinter dem HPA $P_{Ch.D}$ über die Dämpfung der Einzelteile (siehe Abbildung 3.4) durch (3.1), (3.2) und (3.3).

$$P_{out}[dBm] = P_{Ch.D}[dBm] + 0,7 \text{ dB} + 19,8 \text{ dB} + 10,3 \text{ dB} - 1,4 \text{ dB} \quad (3.1)$$

$$P_{out}[dBm] = P_{Ch.D}[dBm] + 29,4 \text{ dB} \quad (3.2)$$

$$P_{out}[W] = \frac{10^{P_{out}[dBm]}/10}{1000} \quad (3.3)$$

Während der Durchführung der Versuche wurde beobachtet, dass der HPA im Betrieb sehr heiß wird (70 °C am Kühlkörper). Es wurde beobachtet, dass die Ausgangsleistung bei steigender Temperatur sinkt, obwohl die Eingangsleistung konstant bleibt. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wird der Verstärker mit einer Wasserkühlung ausgestattet. Diese besteht aus Kupferrohren, die zwischen den Kühlrippen platziert und mit Alufolie „eingebettet“ werden, so, dass die Kupferrohre thermisch mit den Kühlrippen verbunden sind. Mit einer Kühlwassertemperatur von ungefähr 15 °C bleibt die Oberflächentemperatur des HPA unterhalb 30 °C und die Ausgangsleistung konstant.

Um den Aufbau für die HF-Signalerzeugung und die Probe gegeneinander ausrichten zu können, wird die HF-Signalerzeugung ab dem Vervielfacher auf einer Halterung platziert, die in x-, y- und z-Richtung jeweils um $\pm 2,5$ cm verfahren werden kann. So wird sichergestellt, dass die Probe mittig bestrahlt wird (Kontrolle mit Thermokamera und Messung Abstand Fokus).

Temperaturmesssystem

Um die Temperatur der Probe während der Versuche zu messen, wird ein Thermoelement und eine Wärmebildkamera verwendet, gezeigt in Abbildung 3.5.

Mit dem Thermoelement (Typ K, Durchmesser 0,003 Zoll, Omega Engineering Ltd.) wird die Kerntemperatur der Probe gemessen. Dazu wird dieses mit etwas Wärmeleitpaste in ein kleines Loch auf der Rückseite der Probe eingeführt. Das Loch hat eine Tiefe von 3 mm (bei einer Breite der Proben von je 5 mm) und einen Durchmesser von 0,4 mm. Das Thermoelement ist außerdem an einem Metalldraht auf der Rückseite der Probenhalterung befestigt, welcher so gebogen wird, dass das Thermoelement unter etwas Spannung in die Probe gedrückt wird. Dies sichert einen guten thermischen Kontakt zwischen Thermoelement und Probe.

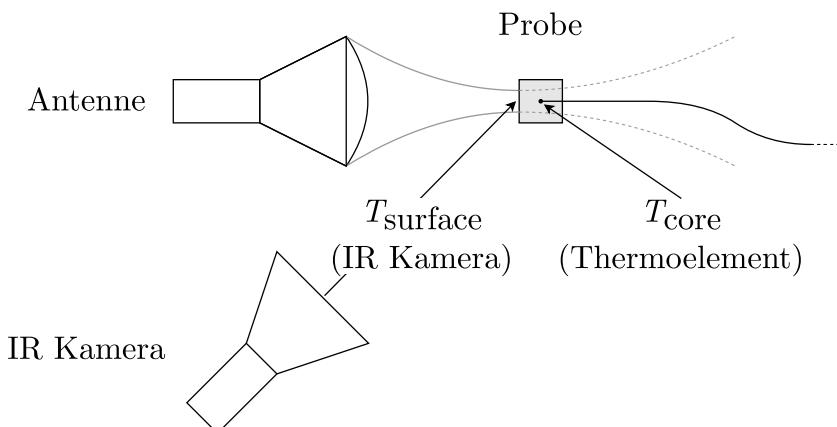


Abbildung 3.5: Temperaturmessung mittels Thermoelement und Wärmebildkamera

Um das Thermoelement auszulesen wird ein A/D-Wandler (National Instruments (NI) TB-9212) verwendet, der in der Lage ist, bis zu acht Thermoelemente gleichzeitig auszulesen. Dieses Modul wird über eine PC-Schnittstelle (NI cDAQ-9174) mit einem Rechner verbunden, auf dem die in LabView programmierte Steuerungssoftware läuft. Zusätzlich zur Kerntemperatur der Probe werden mit diesem System noch zwei weitere Thermoelemente für die Raumtemperatur und die Temperatur des HPA ausgelesen.

Der Messfehler eines Typ K Thermoelements beträgt $\pm 2,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 0,75 \text{ \%}$, je nachdem, was größer ist. Der Messfehler des oben angegebenen A/D-Wandlers beträgt $\pm 0,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [26]. Um die Unsicherheit u_{Th} der Temperaturmessung mit dem Thermoelement zu berechnen, wird zunächst angenommen, dass die Abweichungen innerhalb der genannten Fehlgrenzen gleichwahrscheinlich und außerhalb der Fehlgrenzen mit Wahrscheinlichkeit Null auftreten. Dies entspricht einer Rechteckverteilung nach dem „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM) [27]. Der Unsicherheitsbeitrag des Thermoelements u_K und des A/D-Wandlers u_{AD} werden in (3.4) sowie (3.5) angegeben, wobei T die gemessene Temperatur ist.

$$u_K = \frac{2,2 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 1,3 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \forall T < 293 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$= \frac{T \cdot 0,75 \text{ \%}}{\sqrt{3}} \quad \forall T \geq 293 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.4)$$

$$u_{AD} = \frac{0,8 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.5)$$

Da die Beiträge u_K und u_{AD} voneinander unabhängig sind, werden diese quadratisch addiert, um die Gesamtunsicherheit u_{Th} der Temperaturmessung mit dem Thermoelement über (3.6) zu berechnen:

$$u_{Th} = \sqrt{u_K^2 + u_{AD}^2} = 1,4 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \forall T < 293 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{T \cdot 0,75 \text{ \%}}{\sqrt{3}}\right)^2 + (0,5 \text{ }^{\circ}\text{C})^2} \quad \forall T \geq 293 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.6)$$

In dieser Rechnung nicht berücksichtigt bleiben die Unsicherheitsbeiträge, die durch den Kontakt des Thermoelements mit der Probe und der Position bzw. Tiefe des Lochs in der Probe entstehen. Diese Beiträge werden durch den Druck des Metalldrahtes, an dem das Thermoelement befestigt ist und dem Einsatz von Wärmeleitpaste so gering wie möglich gehalten. Die Position des Lochs auf der Rückseite der Probe weicht max. $\pm 1 \text{ mm}$ vom Zentrum ab, wobei die Tiefe durch den Tiefenanschlag der verwendeten Bohrmaschine auf $0,1 \text{ mm}$ genau ist.

Die Oberflächentemperatur auf der bestrahlten Seite der Probe wird mithilfe einer Wärmebildkamera (FLIR T1030sc) mit Teleobjektiv (FLIR T199077, Brennweite 80 mm) gemessen. Die Kamera arbeitet im Wellenlängenbereich von $7,5 \text{ } \mu\text{m}$ bis $14 \text{ } \mu\text{m}$, was zum langwelligen Infrarotbereich gehört. Die Wärmebildkamera und das Objektiv besitzen je nach Messbereichseinstellung die in Tabelle 3.2 angegebenen Messfehler

und Unsicherheiten (vgl. [28]). Dabei werden die Unsicherheiten aus den Messfehlern durch eine Rechteckverteilung [27] bestimmt, analog zur Bestimmung der Unsicherheiten der Temperaturmessung.

Tabelle 3.2: Messfehler und Unsicherheiten der FLIR Wärmebildkamera (vgl. [28])

Messbereich	Messfehler	Unsicherheit
-40 °C – 150 °C	5 °C – 100 °C	± 1 °C
	100 °C – 150 °C	± 1 %
0 °C – 650 °C	0 °C – 100 °C	± 2 °C
	100 °C – 650 °C	± 2 %

Des Weiteren ist bei der Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera der Emissionsgrad ε_g des zu messenden Objekts zu berücksichtigen. Da dieser Emissionsgrad für jedes Material unterschiedlich oder unbekannt ist, wird die Wärmebildkamera mit der Einstellung $\varepsilon_g = 1,00$ verwendet. Die Aufnahmen der Wärmebildkamera werden in einem Rohdatenformat abgespeichert, so dass eine nachträgliche Korrektur des Emissionsgrades mithilfe der zur Kamera gehörenden Software möglich ist. Zusätzlich beeinflusst die Ungenauigkeit des Emissionsgrades die Unsicherheit der Temperaturmessung.

Weiterhin wird die Temperaturmessung durch den Betrachtungswinkel zwischen Probe und Kamera sowie der Hintergrundstrahlung beeinflusst. Letztere äußert sich als „Umgebungstemperatur“, erzeugt durch von der Umgebung reflektierte Wärmestrahlung, und kann in der Kamera eingestellt werden. Um diese zu minimieren bzw. möglichst konstant zu halten wird das Licht abgeschaltet und in einem möglichst abgeschatteten Bereich des Labors gearbeitet.

Weiterhin nicht einzeln berücksichtigte Unsicherheitsbeiträge liefern bei beiden Temperaturmessungen zum Beispiel Ungenauigkeiten in der Ausrichtung der Antenne und der Probe, die Befestigung der Probe an der Halterung sowie Ungenauigkeiten in der Strahlungsleistung. Die dadurch entstehenden Unsicherheiten werden jedoch in den oben angegebenen, errechneten Unsicherheiten der Wiederholungsmessungen berücksichtigt.

Probenhalterung

Die Probenhalterung besteht aus einem quadratischen Stab (10 mm x 10 mm) aus dem Material „Rohacell“. Dabei handelt es sich um einen geschäumten Kunststoff, der eine hohe mechanische Festigkeit aufweist, für HF-Strahlung aber nahezu transparent ist. Der Stab besitzt am oberen Ende eine seitliche Vertiefung, über die ein Streifen Kapton-Klebeband gespannt wird, siehe Abbildung 3.6.

In der Mitte des Kapton-Streifens wird die Probe mit Sekundenkleber befestigt. Diese Konstruktion soll sicherstellen, dass die Probe thermisch möglichst gut von der Halterung entkoppelt ist und hauptsächlich Kontakt zu Luft hat. Um die Probe genau auf die Antenne ausrichten zu können, kann auch die Probenhalterung in x-, y- und z-Richtung verfahren werden. Der Verfahrweg beträgt je Achse ± 5 mm. Des Weiteren ist die Halterung um 45° gegenüber der Darstellung in Abbildung 3.5 gedreht. Zusätzlich ist in Abbildung 3.6 (rechts) der Metalldraht zu sehen, der das Thermoelement führt und in die Probe drückt.



Abbildung 3.6: Antenne und Probenhalterung

Arbeitsschutz

Um sicherzustellen, dass Personen während den Versuchen vor Einflüssen der HF-Strahlung geschützt sind, wird der Versuchsaufbau in einer Stahlkabine mit einem durch Metallgitter abgetrennten Vorraum durchgeführt. Im Vorraum können sich während der Messung Personen aufhalten. Da die Maschenweite des Gitters jedoch nicht ausreicht, um Strahlung bei einer Frequenz von 92 GHz vollständig abzuschirmen, wird als weitere Schutzmaßnahme ein offener und auf der Innenseite mit HF-Absorbern beklebter Würfel hinter der Antenne platziert, siehe Abbildung 3.7. So wird der größte Teil der HF-Strahlung absorbiert und die Person im Vorraum geschützt.

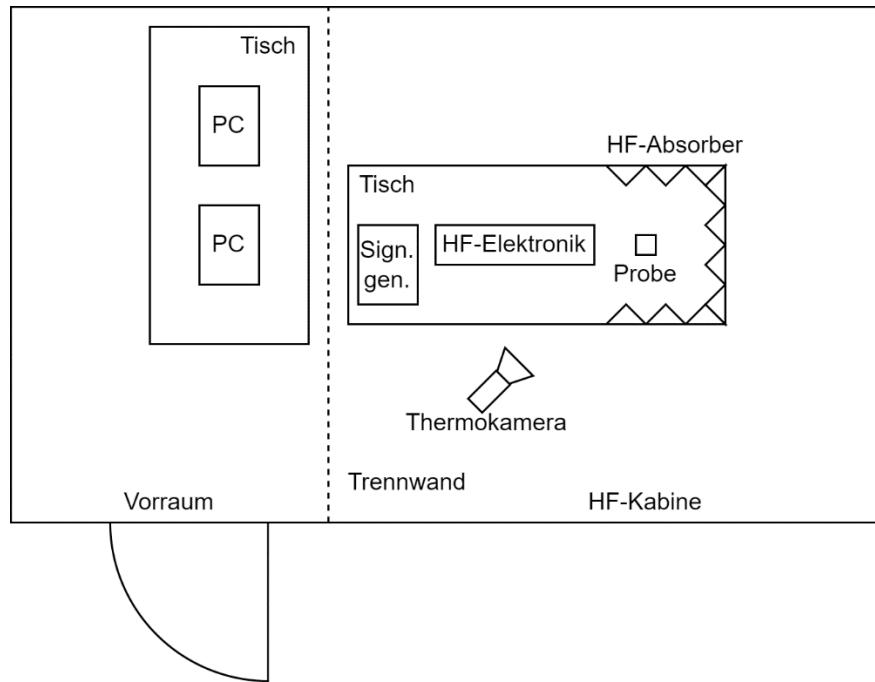


Abbildung 3.7: HF-Kabine mit Vorraum und Absorberwürfel hinter der Antenne

Um sicherzustellen, dass die im Bundes-Immissionsschutzgesetz (26. BImSchV, [29]) festgelegten Expositionsgrenzwerte von 61 V/m für HF-Strahlung im Frequenzbereich von 2 GHz bis 300 GHz nicht überschritten werden, wird der Innenraum der Stahlkabine mithilfe eines Leistungsmessgerätes „abgetastet“. Auf dem Leistungsmessgerät

wird eine Horn-Antenne (Standard-Gain-Horn Flann Microwave LTD. 27240) mit einem Gewinn G von 20 dBi montiert, mit der die Leistung an verschiedenen Stellen in der Kabine gemessen wird. Die HF-Signalerzeugung wird dazu auf die maximale Ausgangsleistung eingestellt und die Antenne muss während der Messung immer wieder gedreht werden, um die Polarisationsrichtung anzupassen (es sind auf maximale Empfangswerte zu achten).

Da das Messgerät eine Leistung anzeigt, muss die angezeigte Leistung in die Feldstärke vor der Antenne umgerechnet werden. Andersherum kann aus dem Grenzwert von 61 V/m auch die max. Empfangsleistung für die verwendete Antenne berechnet werden, um festzustellen, wie groß die gestreute Strahlung ist. Dazu wird die Feldstärke zunächst über (3.7) in eine Leistungsdichte von $9,87 \text{ W/m}^2$ umgerechnet.

$$S = \frac{E^2}{Z_0} \quad (3.7)$$

Die Antennenwirkfläche A_w verknüpft die Leistungsdichte vor der Antenne mit der Leistung am Eingang der Antenne mittels (3.9).

$$A_w = \frac{P}{S} \quad (3.8)$$

Zusätzlich erfolgt die Berechnung der Antennenwirkfläche über (3.9), unter Berücksichtigung der bekannten Parameter der Wellenlänge und dem Gewinn.

$$A_w = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad (3.9)$$

Es ergibt sich für die Wellenlänge (bei 92 GHz: $\lambda = c/f$, wobei $c = c_0/n$ die Lichtgeschwindigkeit im Medium darstellt mit $c_0 = 299792458 \text{ m/s}$ und $n \approx 1$) sowie dem Gewinn (20 dBi) die Antennenwirkfläche $A_w = 8,45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$. Mithilfe von (3.8) lässt sich die maximale Empfangsleistung P_{max} zu 0,8 mW bzw. -1 dBm berechnen.

Damit die Feldstärke von 61 V/m nicht überschritten wird, darf die maximal angezeigte Leistung am Messgerät mit der oben angegebenen Hornantenne 0,8 mW bzw. -1 dBm nicht überschreiten. Dies wurde in der Stahlkabine überprüft und es wurde festgestellt, dass dieser Grenzwert lediglich in unmittelbarer Umgebung des Absorberwürfels überschritten wurde, nicht jedoch im Vorraum der Kabine.

3.4.2 Versuchsdurchführung

Die Antenne und die Probe werden zunächst so gegeneinander ausgerichtet, dass der Fokuspunkt der Antenne genau auf der Vorderseite der Probe liegt. Die Fokallänge der Antenne wird ab der Mitte der Linse gemessen und beträgt 43 mm. Da die Linse eine halbe Dicke von 13 mm aufweist, muss der Abstand zwischen der Linse und der Probe 30 mm betragen, damit der Fokuspunkt wie oben beschrieben genau vorne auf der Probe liegt (siehe Abbildung 3.8).

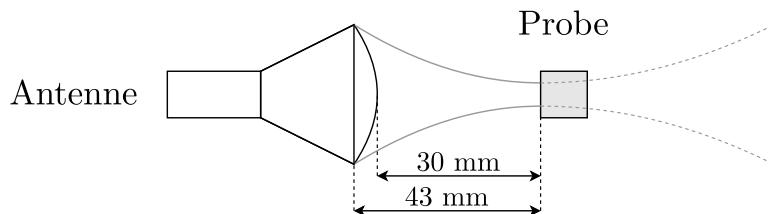


Abbildung 3.8: Abstände zwischen Antenne und Probe

Die Antenne wird in x- und y-Richtung so ausgerichtet, dass der Fokuspunkt mittig auf der bestrahlten Seite der Probe liegt. Dazu wird die HF-Elektronik mit geringer Strahlungsleistung eingeschaltet, so dass der Fokuspunkt auf der Probe mit der Wärmebildkamera sichtbar wird. Der Fokuspunkt wird dann „auf Sicht“ mittig ausgerichtet und die HF-Elektronik wieder abgeschaltet.

Nachdem die Antenne und die Probe gegeneinander ausgerichtet worden sind, wird die Erwärmungsmessung gestartet. Dazu wird die HF-Elektronik eingeschaltet und die HF-Leistung schrittweise erhöht. Jede Leistungsstufe wird so lange gehalten, bis die Kerntemperatur der Probe einen konstanten Wert erreicht hat. Der beschriebene zeitliche Verlauf der Erwärmungsmessung ist in Abbildung 3.9 durch die schwarze Kurve dargestellt.

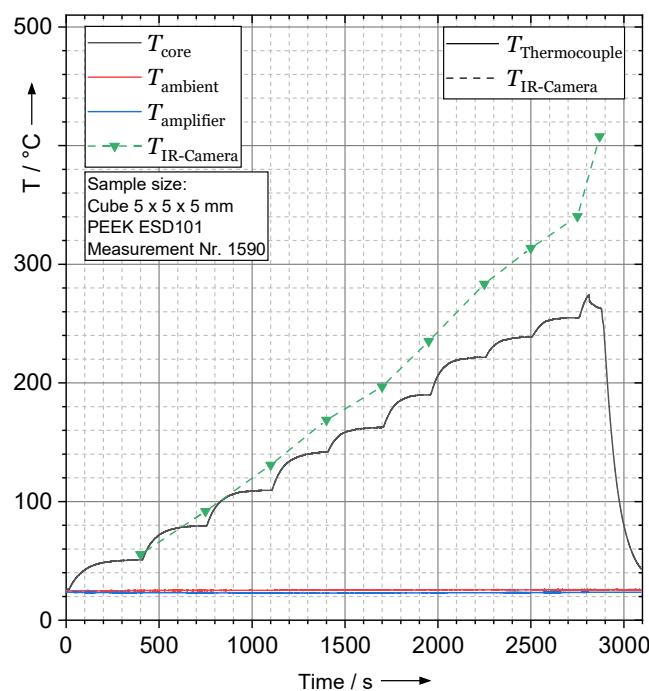


Abbildung 3.9: Zeitlicher Verlauf der gemessenen absoluten Temperaturen bei einer Erwärmungsmessung

Nach Erreichen der Kerntemperatur, wird die Oberflächentemperatur mit der Wärmebildkamera aufgenommen (siehe Abbildung 3.9, grüne Linie) und die zugehörige verstrichene Zeit seit Beginn des Versuchs notiert, um die Oberflächen- und Kerntemperatur nach Versuchsende einander zuordnen zu können. Um die Temperaturerhöhung in K zu erhalten, wird die Umgebungstemperatur $T_{ambient}$ von der jeweiligen Temperatur T_{core} und $T_{IR-Camera}$ abgezogen.

3.4.3 Ergebnisse

Die Versuche werden zunächst mit Würfeln einer Kantenlänge von (5 x 5 x 5) mm von verschiedenen Materialien durchgeführt, wobei für jede Probe zusätzlich zwei Wiederholungsmessungen durchgeführt werden. Die erhaltenen Temperaturdaten werden dann über die drei Messungen gemittelt. In Abbildung 3.10 (links) ist die Temperaturerhöhung auf der Oberfläche $T_{surface}$ und im Kern der Probe T_{core} in Abhängigkeit von der Leistung für ausgewählte Materialien dargestellt.

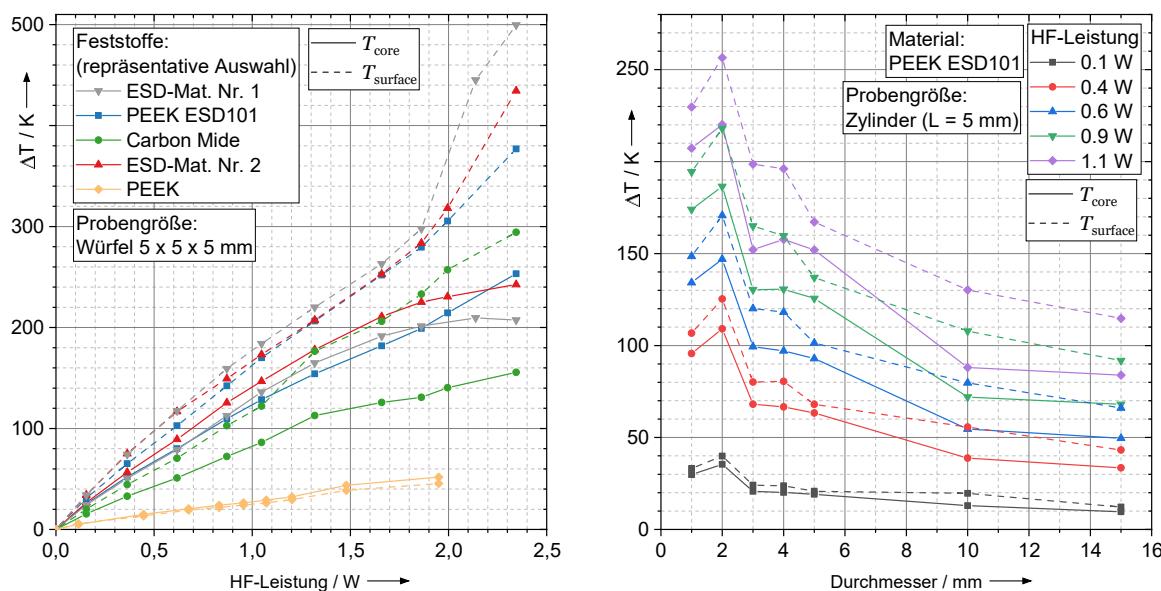


Abbildung 3.10: Messergebnisse der Erwärmungsversuche bei 92 GHz für unterschiedliche Materialien (links) und unterschiedliche Durchmesser der Proben (rechts)

Die drei worst-case Absorber (ESD-Mat. Nr. 1, ESD-Mat. Nr. 2, PEEK ESD101) erreichen bei 2,34 W eine Oberflächentemperaturerhöhung von 500 K, 434 K und 377 K bei Kerntemperaturerhöhungen von 207 K, 243 K und 253 K. Bei den Materialien ESD-Mat. Nr. 1 und ESD-Mat. Nr. 2 handelt es sich um einen gummiartigen, ESD-fähigen Kunststoff. ESD-Mat. Nr. 1 weist eine raue und ESD-Mat. Nr. 2 eine glatte Oberfläche auf. Reines PEEK als Vergleichsmaterial mit in der HF-Technik bereits als hoch bezeichneten Verlusten erreicht bei 1,95 W eine Temperaturerhöhung von 46 K an der Oberfläche und 52 K im Kern. Die Ergebnisse zeigen eine deutlich sichtbare Zündgefahr bei Materialien, die mit Kohlenstoff versetzt wurden und damit eine gewisse Leitfähigkeit aufweisen.

Um den Einfluss der Geometrie auf die Erwärmung zu untersuchen werden die nächsten Messungen mit zylinderförmigen Proben mit einer Länge von 5 mm durchgeführt, wobei der Durchmesser von 1 mm bis 15 mm variiert wird. Die Proben bestehen in diesem Fall aus dem Material PEEK ESD101, da es sich mechanisch gut bearbeiten lässt und trotzdem eine hohe Absorptionsfähigkeit aufweist. Die HF-Leistung wird für diese Messung von 0,1 W bis 1,1 W variiert. Abbildung 3.10 zeigt rechts die Messergebnisse. Die maximale Temperaturerhöhung steigt über alle HF-Leistungen bis zu einem Durchmesser der Probe von 2 mm an und nimmt darüber hinaus wieder ab. Bei 1,1 W Strahlungsleistung wird bei 2 mm Probendurchmesser eine Temperaturerhöhung von 257 K an der Oberfläche und 220 K im Kern erreicht. Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden als Konferenzbeitrag auf der Kleinheubacher Tagung 2022 unter dem Titel „Using RF Measurement Techniques to Evaluate Ignition Hazards due to Dielectric Heating in Explosive Atmospheres“ veröffentlicht [30].

3.5 Kalorimetrische Messung der Radarantenne

Um die Eigenerwärmung einer Radarantenne bei 170 GHz zu untersuchen, werden Erwärmungsmessungen in einem HF-Mikrokalorimeter durchgeführt. Ziel dieser Messungen ist es zu klären, ob die Erwärmung der Antenne selbst als mögliche Zündquelle in Frage kommt.

An der PTB werden Mikrokalorimeter als hochpräzise Messaufbauten für die Rückführung der Messgröße HF-Leistung verwendet [1]. Die Messung der Eigenerwärmung einer Antenne stellt in diesem Zusammenhang eine Zweckentfremdung des Messaufbaus dar. Aufgrund der sehr guten thermischen Stabilität des Kalorimeters sowie der vorhandenen Leitungen im Messaufbau eignet er sich jedoch hervorragend für diese Untersuchung.

Abbildung 3.11 zeigt die im Versuch charakterisierte Antenne mit dielektrischer Linse im Vordergrund sowie dem Hohlleiteranschluss für die Leistungseinspeisung und den Anschluss im Mikrokalorimeter auf der Rückseite.



Abbildung 3.11: Radarantenne für die kalorimetrische Messung

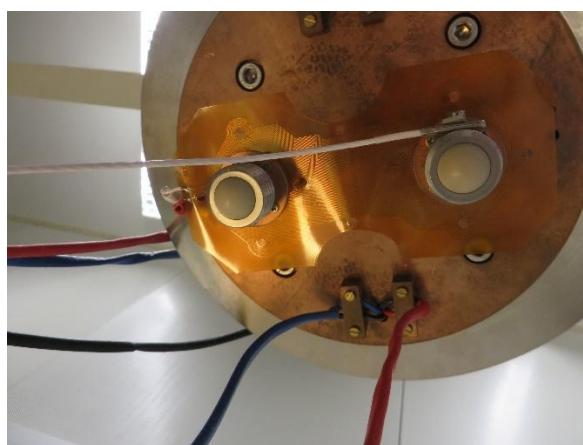


Abbildung 3.12: Antennen symmetrisch montiert im Deckel des Mikrokalorimeters



Abbildung 3.13: Mikrokalorimeter-Gefäß

Abbildung 3.12 zeigt die symmetrisch im Deckel des Mikrokalorimeters montierten Antennen. Im Versuch wird nur eine Antenne mit Leistung gespeist, wodurch eine Temperaturdifferenz zwischen den symmetrisch montierten Antennen entsteht. Zur Mes-

sung dieser Differenz wird eine Thermosäule (eine Reihenschaltung von Thermokontakten) verwendet, die auch bei sehr geringen Temperaturdifferenzen (im Bereich von einigen Mikrokelvin) eine Thermospannung ausgibt.

An der aktiven Antenne ist zusätzlich ein PT100-Temperaturfühler angebracht, um die aktuelle Temperatur der Antenne zu ermitteln.

Abbildung 3.13 zeigt das Versuchsgefäß, auf das der Deckel aufgesetzt wird. Das Versuchsgefäß besitzt mehrere Wandungen, und die Zwischenräume werden mit Verpackungsflips gefüllt. Nach dem Verschließen des Deckels wird auch dieser mit den Verpackungsflips bedeckt. Dadurch entsteht insgesamt eine sehr gute thermische Isolierung des Versuchsaufbaus.

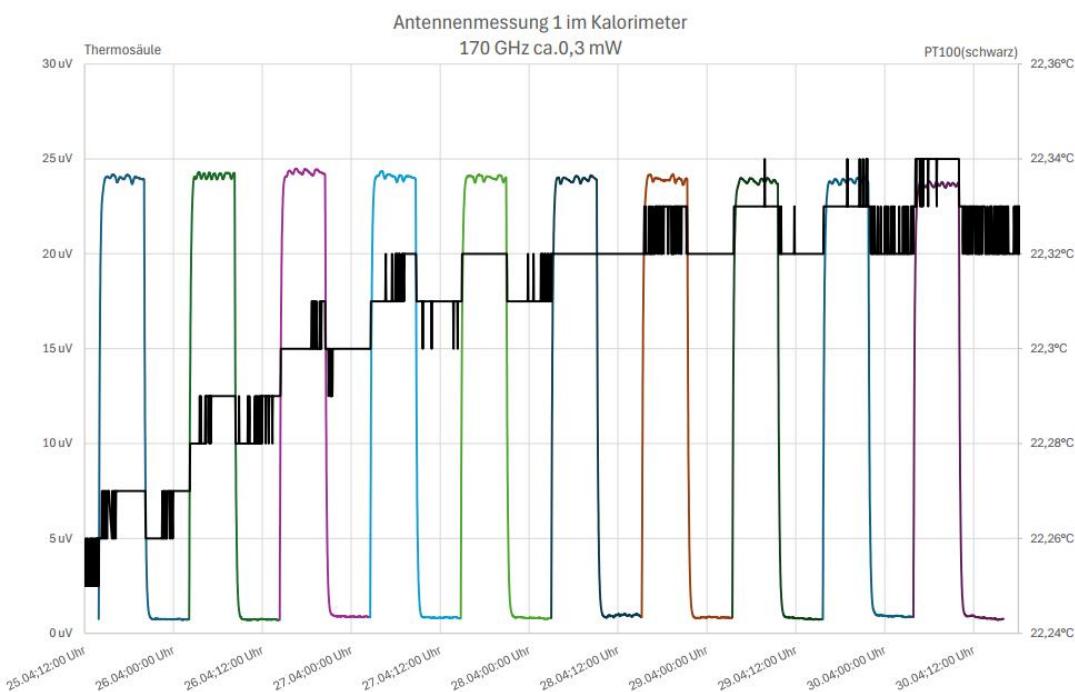


Abbildung 3.14: Ergebnis der Erwärmungsmessung der Antenne im Mikrokalorimeter mit einem Schaltabstand von sechs Stunden

Während des Versuchs wird die aktive Antenne mit einer Eingangsleistung von 0,3 mW bei 170 GHz gespeist. Die Leistung wird hierbei periodisch im Abstand von sechs Stunden ein- oder ausgeschaltet. Durch die langen Zeitintervalle zwischen den Schaltvorgängen soll eine gleichmäßige und stabile Erwärmung oder Abkühlung des Aufbaus erreicht werden.

Abbildung 3.14 zeigt das Messergebnis eines solchen Versuchs über fünf Tage. Die Ausgangsspannung der Thermosäule ist farbig dargestellt und zeigt die periodische Ein- und Ausschaltung der Eingangsleistung der aktiven Antenne. In Schwarz ist die Erwärmung der Antenne dargestellt, wie sie mit dem PT100-Sensor gemessen wurde.

Es wurde eine Erwärmung von ~ 10 mK gemessen, was der kleinsten messbaren Temperaturdifferenz mit diesem Aufbau entspricht. Diese Temperaturdifferenz korreliert mit den Schaltzyklen der Eingangsleistung der Antenne.

Zusätzlich ist eine Temperaturdrift über die gesamte Versuchsdauer erkennbar. Diese ist jedoch auf die begrenzte Stabilität der Raumtemperatur zurückzuführen und nicht durch die eingespeiste HF-Leistung oder die daraus resultierende Erwärmung der Antenne verursacht.

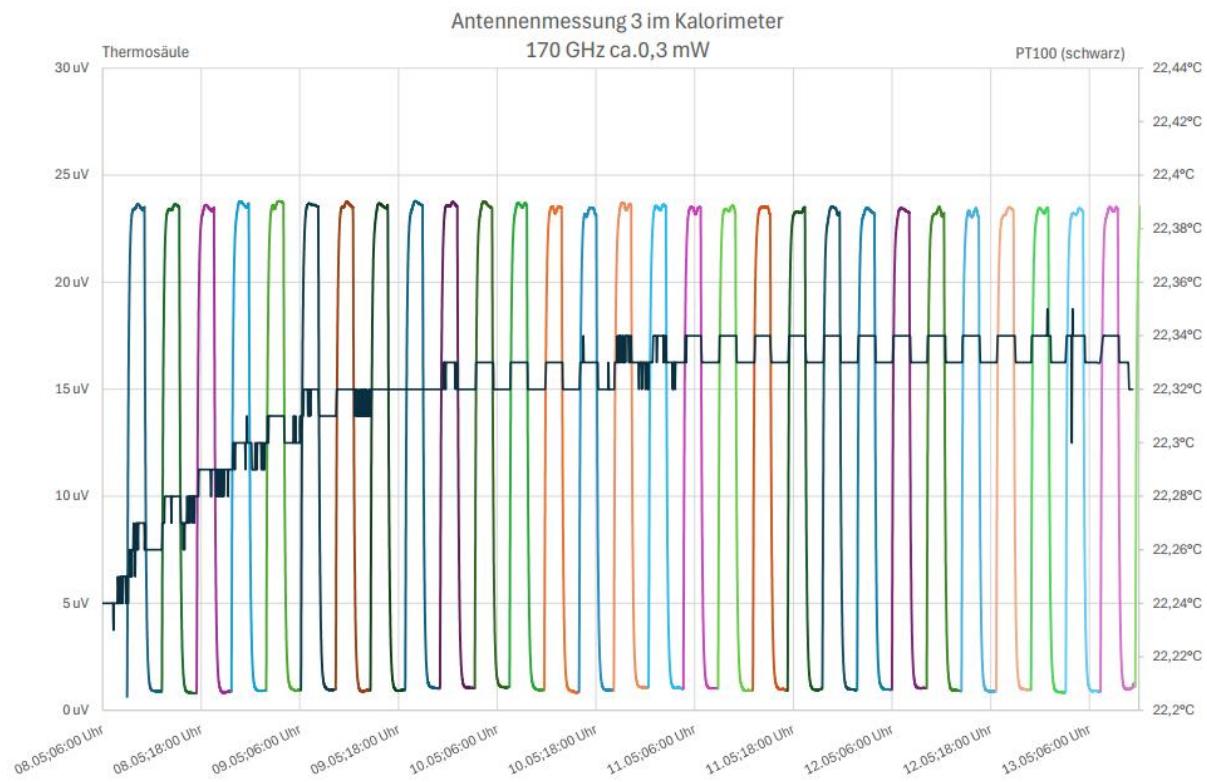


Abbildung 3.15: Ergebnis der Erwärmungsmessung der Antenne im Mikrokalorimeter über einen Zeitraum von fünf Tagen

Da sich in den ersten Versuchen zeigte, dass sich eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Aufbau deutlich schneller als innerhalb von sechs Stunden einstellt, wurde der Versuch mit einem verringerten Abstand von nur zwei Stunden zwischen den Umschaltungen wiederholt.

Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 3.15 dargestellt. Es bestätigt erneut die Erwärmung der Antenne um ~ 10 mK, und es ist wiederum ein leichter Drift der Raumtemperatur erkennbar.

Die Erwärmung um 10 mK wurde mit einer kontinuierlichen HF-Leistung von 0,3 mW erreicht. Unter der Annahme, dass sich die Erwärmung durch die eingestrahlte HF-Leistung linear verhält, ergibt sich bei einer kontinuierlichen eingespeisten HF-Leistung von 2 W eine Erwärmung von 66,67 K.

Allerdings ist die Einspeisung eines kontinuierlichen HF-Signals bei 170 GHz mit 2 W kein realistischer Betriebsfall für einen Radarsensor. Die tatsächliche Leistung liegt deutlich darunter, und es wird sich nicht um ein kontinuierliches Signal handeln.

4 Simulation

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Simulationen zur dielektrischen Erwärmung vorgestellt. Als Simulationssoftware kommt CST Microwave Studio (CST) zum Einsatz. Ziel der Simulationen ist es, die Erwärmungsversuche nachzubilden und durch Parametervariationen Ergebnisse bei weiteren Frequenzen und Leistungen zu erhalten, die sich im Versuchsaufbau nicht realisieren lassen.

Die Simulation gliedert sich in einen elektromagnetischen und einen thermischen Teil, die in CST miteinander gekoppelt werden. Im elektromagnetischen Teil wird zunächst die in der Probe absorbierte Leistung berechnet, aus der sich im thermischen Teil unter Berücksichtigung thermischer Verlustmechanismen wie Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion die Temperaturerhöhung der Probe berechnen lässt.

Im Folgenden werden die Simulationseinstellungen für beide Teile beschrieben, sowie die Ergebnisse vorgestellt. Die Simulationsergebnisse werden außerdem mit den Erwärmungsmessungen verglichen.

Zusätzlich wird die Simulation der Radarantenne vorgestellt, die hinsichtlich ihrer Erwärmung im Betrieb bei verschiedenen Frequenzen untersucht wird.

4.1 Materialparameter

Um eine hohe Vergleichbarkeit zwischen der Simulation und den Versuchen zu gewährleisten, sollte ein Material verwendet werden, dessen Materialparameter möglichst bekannt sind. Im Rahmen dieser Arbeit wird PEEK für diesen Zweck verwendet, da es auch für reale Erwärmungsmessungen zur Verfügung steht und die Ergebnisse der Simulation so mit den Messungen verglichen werden können. PEEK ist kein herausragender Absorber, bietet aber eine große Datenmenge an Materialeigenschaften, wobei die für CST wichtigen Materialparameter in Tabelle 4.1 zusammengefasst sind.

Tabelle 4.1: Relevante Materialparameter von PEEK für die Simulation mit CST (vgl. [31])

Elektrische Parameter	Symbol	Wert	Quelle
Relative Permittivität	ϵ'_r	3,2	bei 92 GHz gemessen
Verlustfaktor	$\tan \delta$	0,006	bei 92 GHz gemessen
Thermische Parameter	Symbol	Wert	Quelle
Emissionsgrad	ϵ_g	0,92	[31]
Wärmeleitfähigkeit	κ	0,25 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	[31]
Spezifische Wärmekapazität	c_p	2160 $\text{K}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	[31]
Dichte	ρ	1320 kg/m^3	[31]

4.2 Elektromagnetische Simulation

Mithilfe der elektromagnetischen Simulation wird die vom Absorber aufgenommene Leistung unter kontinuierlicher Bestrahlung ortsauflöst berechnet. Dies bildet die Grundlage für die im zweiten Teil beschriebene thermische Simulation.

Strahlprofil der Antenne

Die im Versuch verwendete Antenne hat ein näherungsweise gaußsches Strahlprofil, welches in CST mit dem Makro „GaussianBeam“ erzeugt wird. Abbildung 4.1 zeigt das so generierte Strahlprofil, welches gut mit dem gemessenen Strahlprofil aus Abbildung 3.3 übereinstimmt.

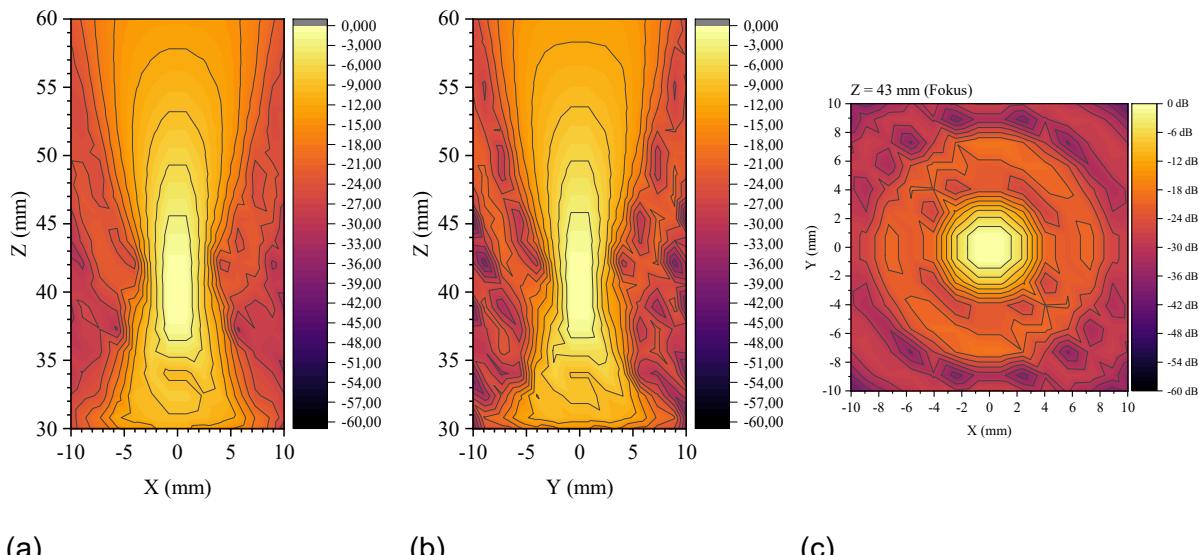


Abbildung 4.1: Simulationsergebnisse für den Gaußschen Strahl bei 92 GHz
(a) xz-Ebene, (b) yz-Ebene, (c) xy-Ebene

Analog zu den Versuchen wird die würfelförmige Probe so im Strahl platziert, dass der Fokuspunkt genau auf der Vorderseite der Probe liegt (vgl. Abbildung 3.5).

Randbedingungen

Als Randbedingung für die elektromagnetische Simulation wird „open (add space)“ ausgewählt. Dies entspricht für HF-Strahlung unsichtbare Wandungen, mit einem von CST automatisch gewählten Abstand zur Probe. Weiterhin wird das CST interne Modell für Luft („Air“) für das umgebende Material der Probe eingestellt. Symmetrieebenen werden in dieser Simulation nicht verwendet.

4.3 Thermische Simulation

Die thermische Simulation baut auf der elektromagnetischen Simulation auf, indem aus den in der Probe auftretenden Verlusten die Erwärmung der Probe berechnet wird. Die kontinuierlich aufgenommene Leistung wird in der Probe in Wärme umgesetzt und über die Verlustmechanismen Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion wieder an die Umgebung abgegeben. Mithilfe von CST wird die sich einstellende Gleichgewichtstemperatur der Probe und der Umgebung ortsauflöst berechnet.

Randbedingungen

Um auch in der thermischen Simulation abzubilden, dass der Würfel zum größten Teil von Luft umgeben ist, wird als Randbedingung adiabatisch verwendet. Dies entspricht Wandungen die keinen Einfluss auf Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion haben. Als umgebendes Material wird anders als in der elektromagnetischen Version das CST interne Modell für Luft mit dem Zusatz „CHT“ („Air (CHT)“) gewählt, wobei CHT für „Conjugate Heat Transfer“ steht. Dieses Modell von Luft enthält weitere Materialparameter, die notwendig sind, um Konvektion berücksichtigen zu können.

4.4 Simulationsergebnisse

In der Simulation wird zunächst ein Würfel aus PEEK bei einer Frequenz von 92 GHz bestrahlt, wobei die Leistung von 0 W bis 2 W variiert wird, dargestellt in Abbildung 4.2 links. Zu sehen ist, dass die simulierte Temperaturerhöhung unterhalb der tatsächlich gemessenen Temperaturerhöhung liegt, wobei die Differenz für 1 W bei 7 K an der Oberfläche und 8 K im Kern liegt. Zu erklären sind diese Unterschiede durch Abweichungen zwischen dem simulierten und dem realen Antennenprofil, dem Einfluss der Probenhalterung, Ungenauigkeiten in der Einstellung der HF-Leistung (Messung) sowie Unsicherheiten in den Materialparametern und in der Temperaturmessung.

Im nächsten Schritt wird die Frequenz der HF-Strahlung variiert, wobei die Leistung auf konstante 2 W eingestellt wird. Die Ergebnisse (Abbildung 4.2, rechts) zeigen, dass die Temperaturerhöhung mit der Frequenz zunimmt. Ab 260 GHz wird eine Temperaturerhöhung von 65 K (Temperaturklasse T6: 85 °C - 20 °C Raumtemperatur; markiert durch schwarze Linie) an der Oberfläche überschritten. Ab 260 GHz ist in diesem Szenario also auch eine Zündung mit PEEK möglich.

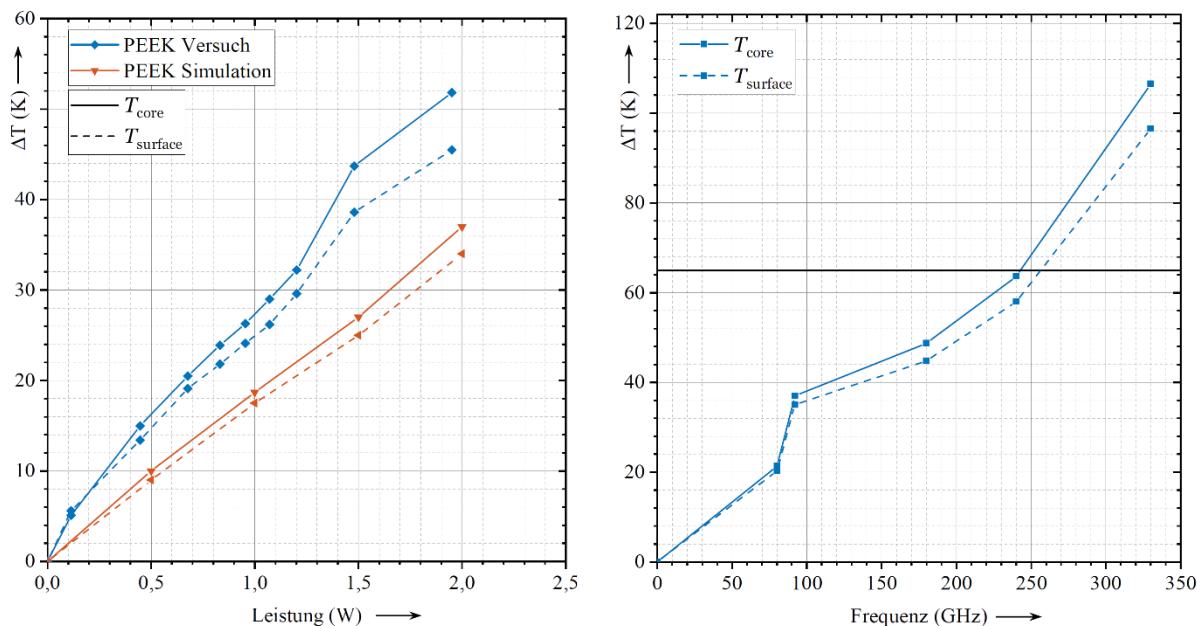


Abbildung 4.2: Simulationsergebnisse für PEEK

Links: Bei 92 GHz in Abhängigkeit der Strahlungsleistung

Rechts: Bei Variation der Frequenz und konstanter Strahlungsleistung von 2 W

Abbildung 4.3 zeigt exemplarisch die Temperaturverteilung bei einer bestrahlten Probe. Erkennbar ist dabei der Hotspot in der Mitte der Probe und die Konvektion.

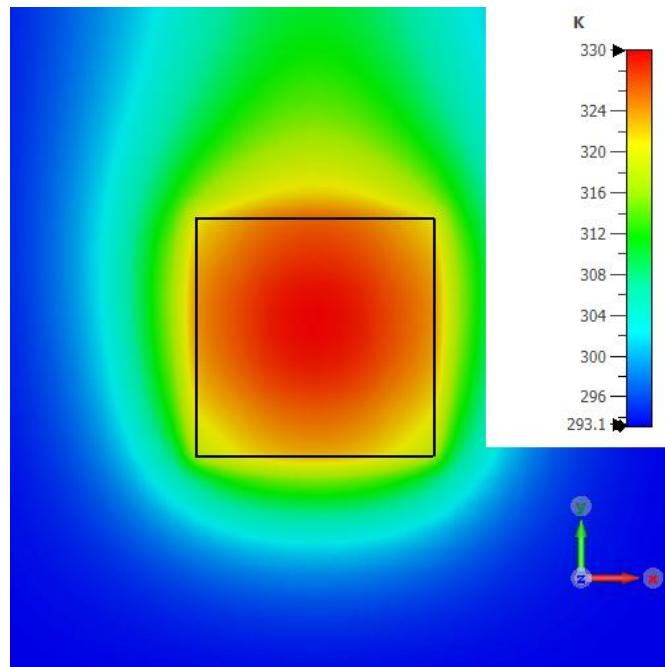


Abbildung 4.3: Simulierte Temperaturverteilung einer bestrahlten Probe

4.5 Untersuchung der Radarantenne

Die Radarantenne, die aus Aluminium und PEEK besteht, wurde bei den Frequenzen 170 GHz und 250 GHz untersucht, jeweils mit einer Strahlungsleistung von 1,5 mW. Zu beachten ist, dass diese Radarantenne für den Bereich von 170 GHz dimensioniert ist. Ebenfalls wurden Einflüsse durch Konvektion und Wärmestrahlung dabei nicht untersucht. Als thermische Randbedingung wurde „open“ gewählt. Die Temperaturverteilung an der Antenne ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Bei 170 GHz beträgt die maximale Temperaturerhöhung 230 mK und für 250 GHz ist eine maximale Temperaturerhöhung von 250 mK festzustellen.

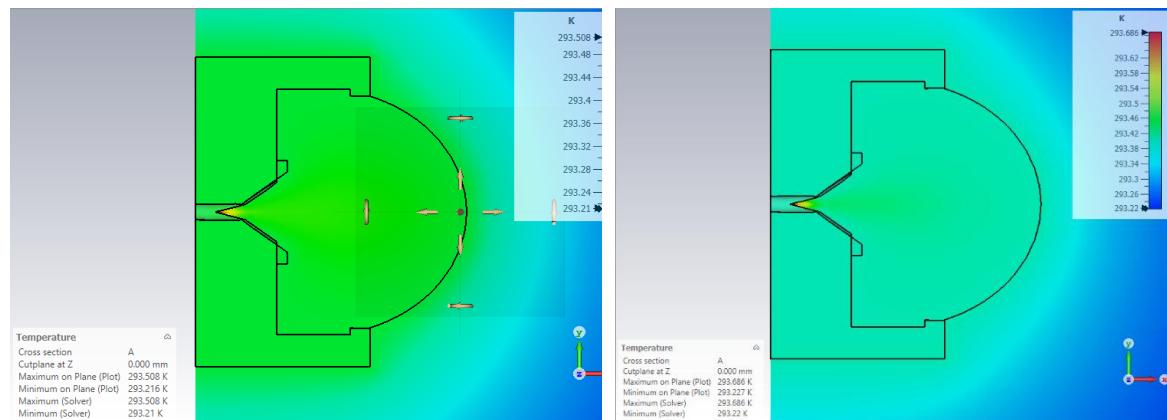


Abbildung 4.4: Temperaturverteilung der Radarantenne: 170 GHz (links); 250 GHz (rechts)

5 Zündversuche mittels HF-Strahlung

In diesem Kapitel wird die mögliche Zündung explosionsfähiger Atmosphären untersucht, die durch heiße Oberflächen fester Stoffe verursacht werden, die elektromagnetischer Strahlung ausgesetzt sind. Um festzustellen, ob durch diesen Prozess eine entstandene heiße Oberfläche des Feststoffs eine potenzielle Gefahr darstellt, werden strahlungsabsorbierende Feststoffe bei einer Frequenz von 92 GHz untersucht. Aufgrund der geringen Größe der anwendungsbezogenen Feststoffe werden die Zündversuche gemäß den Prüfspezifikationen für kleine heiße Bauteile nach IEC 60079-0 Abschnitt 5.3.3 (Temperatur kleiner Bauteile für elektrische Geräte der Gruppe I oder Gruppe II) und 26.5.3 (Zündprüfung kleiner Bauteile für Gruppe I und Gruppe II) durchgeführt [4].

Für die Durchführung der Zündversuche war es erforderlich den bestehenden Versuchsaufbau für die Erwärmungsmessungen (siehe Kapitel 3.4) zu modifizieren und zu erweitern. Der modifizierte Versuchsaufbau wurde erweitert durch eine Gemischaufbereitung und einem Zündgefäß. Des Weiteren wurde die Probenhalterung für die Bedingungen der Zündversuche neu konstruiert. Die HF-Signalerzeugung und das Temperaturmesssystem wurden in den Versuchsaufbau integriert. Notwendige Anpassungen werden im Folgenden beschrieben.

Die Zündversuche werden mit Gemischen aus Diethylether-Luft (Temperaturklasse T4) und Schwefelkohlenstoff-Luft (Temperaturklasse T6) durchgeführt. Dabei werden unterschiedliche Prozentsätze der einzelnen Gemische verwendet, beginnend im stöchiometrischen Konzentrationsbereich der jeweiligen Gemische. Darüber hinaus werden die Zündversuche mit einer konstanten HF-Strahlung mit Ausgangsleistungen bis maximal 3,3 W bei 92 GHz durchgeführt.

5.1 Versuchsaufbau für Zündversuche in Anlehnung an kleine heiße Bauteile

Der Versuchsaufbau für die Zündversuche besteht aus drei Hauptkomponenten:

1. Vorbereitung und Analyse der explosionsfähigen Gas-Luft-Atmosphäre
2. Erzeugung des HF-Signals
3. Zündgefäß mit dem Messobjekt und der Linsenhornantenne

Der grundlegende Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 5.1 dargestellt. Des Weiteren ist in Abbildung 5.2 der experimentelle Versuchsaufbau zum Zeitpunkt einer Zündung zu sehen. Zur Erläuterung der einzelnen Komponenten wurden als Hilfestellung die Nummern 1 bis 9 in der Abbildung 5.2 eingefügt.

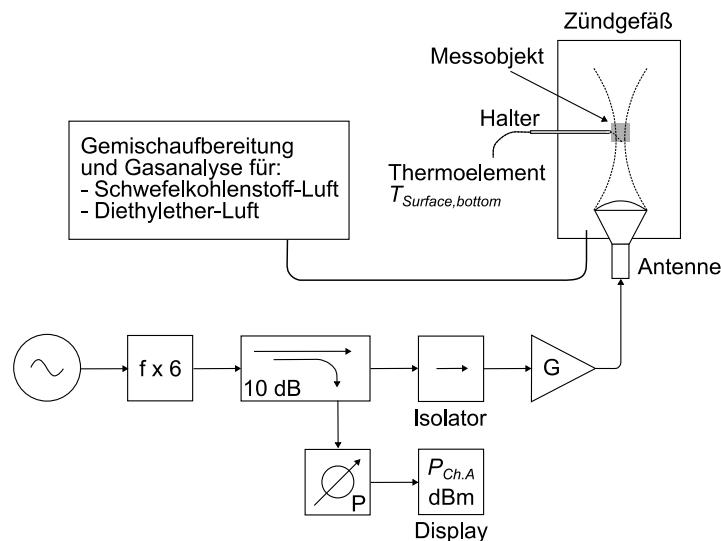


Abbildung 5.1: Schematischer Versuchsaufbau für Zündversuche mit HF-Strahlungserzeugung (vgl. [32])

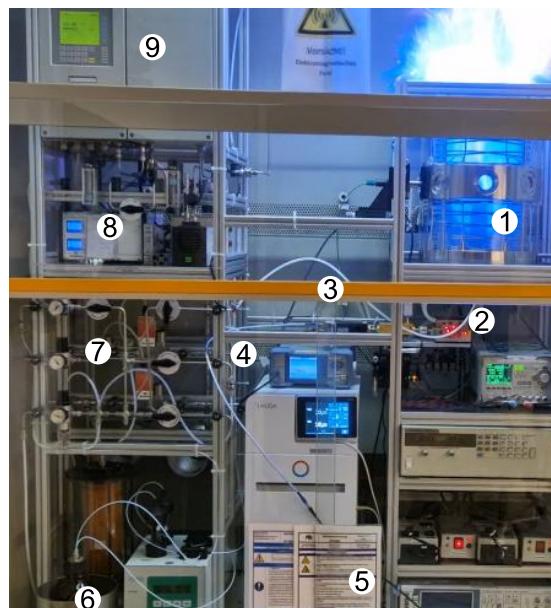


Abbildung 5.2: Experimenteller Versuchsaufbau zum Zeitpunkt einer Zündung

Die explosionsfähige Gas-Luft-Atmosphäre wird mit der Standardmethode erzeugt, die aus einem Massendurchflussregler (8), einer Chemikalienpumpe (6) und einem Verdampfer (7) sowie der Gasanalyse mittels Oximeter (9) besteht. Das erzeugte Gas-Luft-Gemisch wird dann durch ein Rohrsystem (hinter (7)) erhitzt und in ein vorgeheiztes Zündgefäß (12 Liter Volumen) (1) geleitet. Für die hier durchgeführten Zündversuche werden Schwefelkohlenstoff für die Temperaturklasse T6 und Diethylether für T4 gemäß IEC 60079-0 (2017) Abschnitt 26.5.3 verwendet [4].

Das HF-Signal wird wie in Kapitel 3.4.1 beschrieben mittels eines Leistungsverstärkers (2) erzeugt. Die hierfür benötigten Komponenten sind mit den Nummern (3) Vervielfacher, (4) Leistungsmeter und (5) Signalgenerator gekennzeichnet. Hierbei wurde die Erzeugung des HF-Signals durch das Zündgefäß bedingt angepasst. Zusätzlich wurde

der Versuchsaufbau durch eine Wasserkühlung (unterhalb von (4)) erweitert. Aufgrund der hohen Ausgangsleistung des Verstärkers und der daraus resultierenden Eigenerwärmung des Verstärkers ist es notwendig, diesen mit einem Wasserkühlsystem auf mindestens 24 °C abzukühlen. Andernfalls würde die Ausgangsleistung des Verstärkers mit zunehmender Eigenerwärmung abnehmen.

Im Vergleich zu den Erwärmungsmessungen konnte durch die Regelung der Eigenerwärmung des HF-Verstärkers die maximale Ausgangsleistung von 2 W auf 3,3 W bei 92 GHz erhöht werden.

Aufgrund des Versuchsaufbaus für die Zündversuche kann die Ausgangsleistung der HPA nicht gleichzeitig mit den Zündversuchen gemessen werden. Aus diesem Grund wurde die an der Antenne anliegende Leistung zusätzlich zur eingestellten Eingangsleistung des HPA bestimmt. Der Aufbau zur Messung der Ausgangsleistung am Leistungsverstärker ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

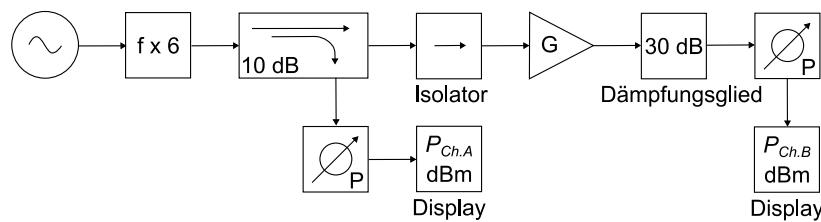


Abbildung 5.3: Versuchsaufbau für Zündversuche mit HF-Strahlungserzeugung (vgl. [32])

Mittels eines Dämpfungsglieds und eines Richtkopplers wird die Ausgangsleistung $P_{Ch.B}$ angezeigt. Unter Berücksichtigung der spezifischen Dämpfungen des Dämpfungsglieds $A_{Attenuator}$ und des Hohlleiters $A_{Waveguide}$ lässt sich über (5.1) die am Antenneneingang anliegende Leistung P_{out} [dBm] bestimmen.

$$P_{out}[\text{dBm}] = P_{Ch.B}[\text{dBm}] + A_{Attenuator} + A_{Waveguide} \quad (5.1)$$

Die gemessenen Dämpfungen des Dämpfungsglieds und des Hohlleiters sind in (5.2) angegeben.

$$P_{out}[\text{dBm}] = P_{Ch.B}[\text{dBm}] + 29,45 - 0,94 \quad (5.2)$$

Die Leistung P_{out} wird gemäß (5.3) von dBm in Watt umgerechnet.

$$P_{out}[\text{W}] = \frac{10^{P_{out}[\text{dBm}]/10}}{1000} \quad (5.3)$$

Eine Übersicht über die hier betrachteten Eingangsleistungen an der Antenne in Abhängigkeit von den am Verstärker eingestellten Eingangsleistungen $P_{Ch.A}$ ist in Tabelle 5.1 zu sehen.

Die maximale Ausgangsleistung des Verstärkers von 4 W wird nicht erreicht. Der Grund dafür könnten die Dämpfungsverluste während der HF-Signalerzeugung sowie die Eigenerwärmung des Verstärkers sein. Somit ist für die Zündversuche eine maximale Ausgangsleistung von $P_{out} = 3,3$ W bei 92 GHz möglich. Die Leistungswerte von

$P_{out} = 1,9 \text{ W}$ und $P_{out} = 1,6 \text{ W}$ ergeben sich aus den Einstellungsmöglichkeiten der Eingangsleistung des HPA sowie den bereits durchgeführten Erwärmungsmessungen ([30], [33]).

Tabelle 5.1: Übersicht über die betrachteten Leistungen der HF-Strahlung am Antennen-eingang für die Zündversuche (vgl. [32])

Eingestellte Eingangsleistung am Leistungsverstärker $P_{Ch.A}$ in dBm	Gemessene Ausgangsleistung des Leistungsverstärkers $P_{Ch.B}$ in dBm	Leistung am Antenneneingang P_{out} in dBm	Leistung am Antenneneingang P_{out} in W
10,75	6,67	35,18	3,3
8,01	4,18	32,69	1,9
7,54	3,57	32,08	1,6

5.2 Messobjekt und Temperaturmessung

Das Messobjekt ist ein Materialwürfel (PEEK ESD101) mit hoher Absorptionskapazität und einer Kantenlänge von 5 mm x 5 mm x 5 mm ([30], [33]). Diese Größe des Messobjekts entspricht den Spezifikationen für kleine heiße Bauteile gemäß IEC 60079-0 (2017), Abschnitt 5.3.3 [4]). Während der Zündversuche wird die Oberflächentemperatur des Messobjekts mithilfe eines Thermoelements (Typ K, Durchmesser 0,003 Zoll, Omega Engineering Ltd.) gemessen. Dazu wird das Thermoelement in ein diagonales Bohrloch mit einem Durchmesser von 0,4 mm im Absorber eingeführt. Dieses Messobjekt mit Thermoelement wird seitlich mit Kaptonband an einem federnd gelagerten Halter aus PTFE befestigt und anschließend über eine Durchführung in das Zündgefäß eingesetzt. Der Halter für das Messobjekt ist so konstruiert, dass das Messobjekt in drei Achsen justiert werden kann. Dadurch kann der Absorber im Fokus der Antenne positioniert werden. Darüber hinaus wird das Thermoelement auf die Oberfläche des Messobjekts ausgerichtet. Auf Grundlage früherer Untersuchungen ([30], [33]) wurde festgestellt, dass das Thermoelement nicht auf die HF-Strahlung reagiert. Zum Auslesen des Thermoelements wird ein A/D-Wandler (National Instruments (NI) TB-9212) verwendet, der bis zu acht Thermoelemente gleichzeitig auslesen kann. Dieses Modul ist über eine PC-Schnittstelle (NI cDAQ-9174) mit einem Computer verbunden, auf dem die Steuerungssoftware LabView läuft. Zusätzlich zur Oberflächentemperatur überwacht dieses System auch die Temperaturen des Leistungsverstärkers, des Gasgemisches, des Gefäßes und in einem Abstand von 100 mm über dem Messobjekt.

Zudem kann der Halter gedreht werden, um die Oberflächentemperaturen an verschiedenen Positionen des Messobjekts zu bestimmen. So können die Oberflächentemperaturen an der Oberseite $T_{Surface,top}$ oder der Unterseite $T_{Surface,bottom}$ des Messwürfels gemessen werden. Die Positionierung des Thermoelements in Abhängigkeit vom Fokus der Antenne ist in Abbildung 5.4 a) und b) dargestellt.

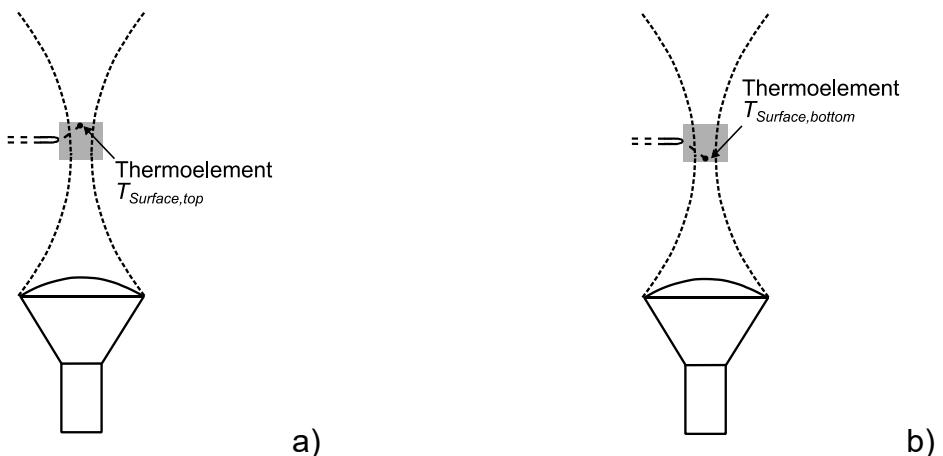


Abbildung 5.4: a) Position des Thermoelements auf der Oberseite der Messobjektoberfläche
b) Position des Thermoelements auf der Unterseite der Messobjektoberfläche
(vgl. [32])

Für die Untersuchung der maximalen Oberflächentemperaturen des Messobjekts in Abhängigkeit von den zwei Positionen des Thermoelements und der hier betrachteten HF-Strahlungsleistung wurden Temperaturmessungen in Luft durchgeführt. Dabei wurden die Temperaturen von $T_{Surface,bottom}$ und $T_{Surface,top}$ bei den Leistungswerten $P_{out} = 3,3$ W, 1,9 W und 1,6 W gemessen. Die Ergebnisse der maximal möglichen Temperaturen aufgrund der Absorption der HF-Strahlung sind in Tabelle 5.2 angegeben.

Tabelle 5.2: Oberflächentemperatur des Messobjekts in Abhängigkeit von der Position des Thermoelements und der Leistung der HF-Strahlung in Luft (vgl. [32])

P_{out} in W	$T_{Surface,bottom}$ in °C	$T_{Surface,top}$ in °C
3,3	500	256
1,9	292	198
1,6	265	181

Es besteht ein signifikanter Temperaturunterschied zwischen der direkt fokussierten Unterseite des Absorbers und der gegenüberliegenden Oberseite. Vergleicht man die an der Oberseite des Messobjekts gemessenen Oberflächentemperaturen (siehe Abbildung 5.4 a) mit den Ergebnissen der Kerntemperaturen aus den Erwärmungsmessungen (siehe Abbildung 3.10), so stimmen diese mit einer Abweichung von ± 15 °C überein. Dies bedeutet, dass die ungefähre Kerntemperatur des Absorbermaterials aus der Oberflächentemperatur abgeleitet werden kann.

5.3 Versuchsdurchführung

Um das günstigste Gas-Luft-Gemisch für eine Zündung in Abhängigkeit von der Leistung der HF-Strahlung zu bestimmen, werden Zündversuche im stöchiometrischen Konzentrationsbereich der Gemische durchgeführt. Dazu werden Untersuchungen zu den direkten und indirekten Zündungseigenschaften unter verschiedenen Parametern der Leistung und den Mischungsverhältnissen von Schwefelkohlenstoff-Luft- und Diet-

hylether-Luft-Gemischen durchgeführt. Die Versuche beginnen jeweils mit den Gemischkonzentrationen, die als am günstigsten für eine Zündung bekannt sind. Anschließend wird die Leistung der HF-Strahlung variiert, um die Leistung zu ermitteln, bei der keine Zündung mehr auftritt. Danach werden die Volumenprozente der Gasgemische geändert, und die Leistung der HF-Strahlung wird erneut variiert.

Für Schwefelkohlenstoff-Luft-Gemische beginnen die Versuche mit einem Volumenanteil von 1,8 %, gemäß den Angaben von [34]. Für Diethylether-Luft-Gemische mit einem Volumenanteil von 23 %, basierend auf den Ergebnissen von [35]. Dieser Volumenanteil entspricht den empfohlenen Werten im Bereich von 22,5 % bis 23,5 % gemäß der Norm IEC 60079-0 (2017), Abschnitt 26.5.3 [4], für Zündversuche kleiner heißer Bauteile.

Zusätzlich werden bei jedem Zündversuch und jeder Parameterkombination abwechselnd die Oberflächentemperaturen an der Unterseite und der Oberseite des Messobjekts gemessen (siehe Abbildung 5.4 a) und b)). Tritt eine Zündung auf, wird die Zündungstemperatur $T_{Ignition,bottom}$ oder $T_{Ignition,top}$ mittels des Thermoelements im Messobjekt ermittelt.

Neben den Oberflächentemperaturen wird für jeden Versuch die Zündverzugszeit $t_{Ignition\ delay}$ ermittelt. Diese wird wie folgt definiert: Die Zündverzugszeit beginnt mit der Erwärmung des Absorbers (Start der HF-Strahlung) und endet zum Zeitpunkt der Zündung. Diese Zündverzugszeit dient als Indikator zur Bewertung der Zündungseffizienz der jeweiligen Mischungsverhältnisse in Abhängigkeit von der eingestellten Leistung der HF-Strahlung.

Ein weiterer Versuchspараметer ist die Abbruchtemperatur $T_{Surface,cut-off}$. Dieser Parameter dient dem Schutz des Versuchsaufbaus, bestehend aus dem Messobjekt mit Thermoelement sowie der Antenne. Beobachtungen zeigten, dass das Messobjekt während der Versuchsdauer zerstört werden kann, wenn die maximal mögliche Oberflächentemperatur des Absorbers bei der maximalen Leistung von 3,3 W erreicht wird (siehe Tabelle 5.2). Dies ist beispielhaft in Abbildung 5.5 dargestellt.



Abbildung 5.5: Zerstörtes Messobjekt

Daher werden die Zündversuche bei einer Leistung von 3,3 W abgebrochen, wenn die Oberflächentemperatur auf der Unter- oder Oberseite 250 °C erreicht und keine Zündung erfolgt.

5.3.1 Ergebnisse für Schwefelkohlenstoff-Luft-Gemische

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Zündversuche mit einem Schwefelkohlenstoff-Luft-Gemisch in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung der HF-Strahlung dargestellt. Tabelle 5.3 gibt die Gemischkonzentrationen und Leistungen an, bei denen Zündungen aufgetreten sind. Zusätzlich wird die definierte Zündverzugszeit angegeben, falls eine Zündung erfolgte. Dabei handelt es sich um die jeweils maximal bestimmte Zündverzugszeit $t_{\text{Ignition delay, max}}$.

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Zündversuche für Schwefelkohlenstoff-Luft-Gemische (vgl. [32])

Vol. % Schwefelkoh- lenstoff in Luft	1	1,5	1,8	2	2,5	3	3,5	5	6,5	8
$P_{\text{out}} = 3,3 \text{ W}$	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X
$t_{\text{Ignition delay, max}}$	-	47 s	40 s	26 s	29 s	32 s	27 s	26 s	35 s	40 s
$P_{\text{out}} = 1,9 \text{ W}$	-	X	X	X	-	-	-	-	-	-
$t_{\text{Ignition delay, max}}$	-	287 s	257 s	204 s	-	-	-	-	-	-
$P_{\text{out}} = 1,6 \text{ W}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

“X”: Zündung; “X”: kalte Flammen Zündung; “-”: keine Zündung

Tabelle 5.3 zeigt, dass Zündungen bei einer Leistung von $P_{\text{out}} = 3,3 \text{ W}$ und Gemischkonzentrationen von 1,5 % bis 8 % Schwefelkohlenstoff in Luft auftraten. Bei den hier durchgeföhrten 22 Versuchen erfolgte jeweils eine Zündung des Gemisches. Bei einem Volumenanteil von 1 % konnten bei 8 Versuchen keine Zündung erzielt werden. Aufgrund des beobachteten Anstiegs der maximalen Zündverzugszeit $t_{\text{Ignition delay, max}}$ von 26 s bei einer Gemischkonzentration von 2 % auf 40 s bei 8 % sowie der damit einhergehenden Abnahme der Zündungseffizienz des Gasgemischs wurden die Zündversuche bei einem Volumenanteil von 8 % abgebrochen. Diese Verringerung der Zündungseffizienz entspricht bekannten Literaturangaben ([34], [35]). Laut [35] ist bei kleinen heißen Bauteilen keine Zündung bei einem Volumenanteil von mehr als 9,6 % Schwefelkohlenstoff in Luft möglich.

Bei einer reduzierten Leistung von $P_{\text{out}} = 1,9 \text{ W}$ konnten Zündungen bei Gemischkonzentrationen von 1,5 %, 1,8 % und 2,0 % festgestellt werden. Diese Zündungen sind sogenannte Kaltflammenreaktionen [35]. Dabei führt die freigesetzte Wärme zu einem abrupten Anstieg der Oberflächentemperatur, wodurch eine Kaltflammenzündung ausgelöst werden kann. Aufgrund dieses Temperaturanstiegs wurde das Gasgemisch in einem Konzentrationsbereich von 1,5 % bis 2,0 % entzündet. Bei einer Reduktion der eingestrahlten Leistung von 3,3 W auf 1,9 W in das Messobjekt konnten Zündungen oberhalb eines Volumenanteils von 2,5 % nicht mehr festgestellt werden. Ebenso wurde keine weitere Kaltflammenreaktion beobachtet. Wie bei den Zündversuchen mit einer Leistung von 3,3 W konnten auch bei einem Volumenanteil von 1 % keine Zündungen erzielt werden. Bei den durchgeföhrten 20 Zündversuchen für $P_{\text{out}} = 1,9 \text{ W}$ konnten 6 Zündungen beobachtet werden. Zudem wurden im Konzentrationsbereich von 1 % bis 8 % Schwefelkohlenstoff in Luft und einer Leistung der HF-Strahlung von 1,6 W bei 20 Versuchen keine Zündungen festgestellt.

Ein abnehmendes und zunehmendes Verhalten der Zündverzugszeit kann sowohl bei $P_{\text{out}} = 3,3 \text{ W}$ und bei $P_{\text{out}} = 1,9 \text{ W}$ beobachtet werden. Dies deutet darauf hin, dass die

günstigste Gemischkonzentration für eine Zündung 2 % Schwefelkohlenstoff in Luft beträgt. Abweichungen vom Literaturwert von 1,8 % Schwefelkohlenstoff in Luft für kleine heiße Bauteile als günstigsten Zündgemischkonzentration [34] können durch verschiedene Einflussparameter verursacht werden, z. B. Eigenschaften und Position des Messobjekts sowie Konvektions- und Strömungsbedingungen.

Abbildung 5.6 gibt eine weitere Darstellung der Ergebnisse. Diese zeigt die maximal gemessenen Zündtemperaturen $T_{Ignition}$ an der Unter- und Oberseite des Messobjekts in Abhängigkeit von den Gemischkonzentrationen.

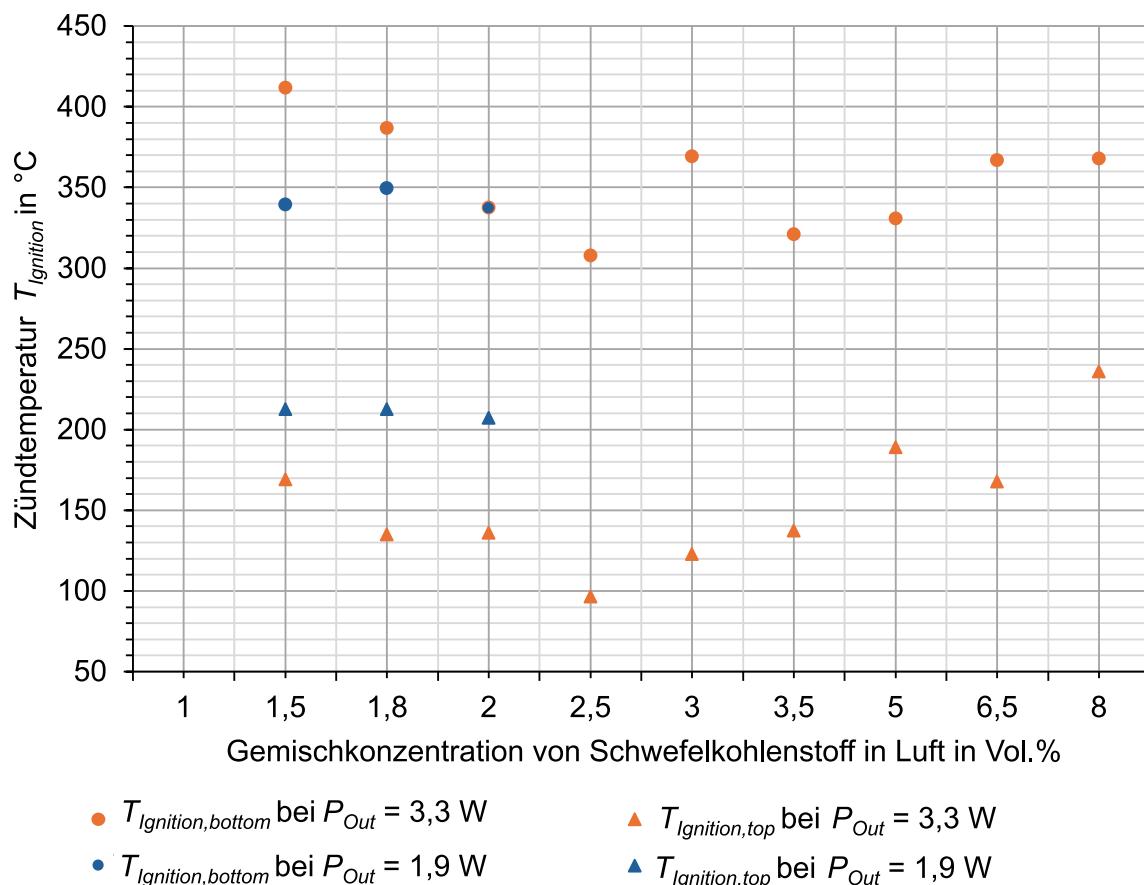


Abbildung 5.6: Oberflächentemperaturen des Messobjekts zum Zeitpunkt der Zündung in Abhängigkeit von der Position des Thermoelements und der Leistung der HF-Strahlung (vgl. [32])

Bei einer Gemischkonzentration von 2 % ist erkennbar, dass die gemessenen Temperaturen an der Unterseite des Messobjekts $T_{Ignition, bottom} = 337 \text{ °C}$ bei den Leistungen von 3,3 W und 1,9 W gleich sind. Zudem sind bei einer Leistung von 1,9 W die Zündungstemperaturen an der Unterseite des Messobjekts annähernd gleich. Ein ähnliches Verhalten kann auch bei den Oberflächentemperaturen an der Oberseite des Messobjekts $T_{Ignition, top}$ beobachtet werden, hier liegen die Zündungstemperaturen zwischen 207 °C und 212 °C.

Im Vergleich dazu weisen die gemessenen Zündungstemperaturen bei einer Leistung von 3,3 W sowohl an der Unter- als auch an der Oberseite des Messobjekts Abweichungen auf. Die maximal gemessene Zündtemperatur von $T_{Ignition, bottom} = 412 \text{ °C}$ wurde bei einem Volumenanteil von 1,5 % und die minimale Zündtemperatur von $T_{Ignition, bottom} = 308 \text{ °C}$ bei einem Volumenanteil von 2,5 % an der Unterseite des Messob-

jets gemessen. Diese Temperaturabweichungen in Abhängigkeit der Gemischkonzentration stimmen nicht mit der erwarteten Zündkurve überein. Basierend auf Zündversuche für kleine heiße Bauteile mit Schwefelkohlenstoff-Luft-Gemischen wird erwartet, dass die Zündtemperatur $T_{Ignition}$ mit steigendem Volumenanteil ansteigt ([34], [35]). Ein möglicher Einflussfaktor für dieses abweichende Verhalten der Zündtemperatur kann die Leistung der HF-Strahlung von 3,3 W und die damit verbundene Erwärmung des Messobjekts sein. Bei $P_{out} = 3,3$ W erwärmt sich das Absorbermaterial des Messobjekts schneller als im Vergleich zur Bestrahlung mit einer Leistung von 1,9 W. Das Erwärmungsverhalten des Absorbers in Abhängigkeit von der Leistung der HF-Strahlung wird durch die maximale Zündverzugszeit (siehe Tabelle 5.3) verdeutlicht. Zudem gibt es bei einer reduzierten Leistung von 1,9 W keine Abweichung in der Zündtemperatur. Dass die Zündtemperaturen bei $P_{out} = 1,9$ W keinen merklichen Temperaturanstieg aufweisen, kann auf den betrachteten Bereich zwischen 1,5 % und 2,0 % der Gemischkonzentrationen zurückgeführt werden.

Anhand der Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei einer Leistung der HF-Strahlung von $P_{out} = 1,6$ W für Schwefelkohlenstoff-Luft-Gemische keine Zündungen auftraten. Damit stellt die resultierende Oberflächentemperatur des Messobjekts aufgrund der Bestrahlung mit hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung keine Zündquelle für die hier betrachteten Versuchspараметer dar. Es sollte jedoch beachtet werden, dass dies ein ermittelter Grenzwert für die Ausgangsleistung der HF-Strahlung ist, ohne die Berücksichtigung relevanter Messunsicherheiten und eines geeigneten Sicherheitsfaktors.

5.3.2 Ergebnisse für Diethylether-Luft-Gemische

Die Ergebnisse der Zündversuche mit Diethylether-Luft-Gemischen werden im Folgenden in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung der HF-Strahlung dargestellt. Die Gemischkonzentrationen und Leistungen, bei denen Zündungen auftraten, sind in Tabelle 5.4 angegeben. Zudem wird die definierte Zündverzugszeit angegeben, falls eine Zündung stattfand. Dabei handelt es sich um die jeweils maximal bestimmte Zündverzugszeit. Zum Schutz des Versuchsaufbaus wird hier zusätzlich die Abbruchtemperatur $T_{Surface,cut-off}$ für die Leistung von 3,3 W berücksichtigt.

Tabelle 5.4: Ergebnisse der Zündversuche für Diethylether-Luft-Gemische (vgl. [32])

Vol. % Diethylether in Luft	2,5	3,4	6	9	12	15	18	23	24	30
$P_{out} = 3,3$ W mit $T_{Surface,cut-off}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$P_{out} = 3,3$ W ohne $T_{Surface,cut-off}$					X			X		
$t_{Ignition\ delay,max}$					73 s			52 s		
$P_{out} = 1,9$ W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

“X”: Zündung; “-”: keine Zündung

Unter Verwendung der Abbruchtemperatur konnte bei 20 durchgeführten Zündversuchen für $P_{out} = 3,3$ W im Konzentrationsbereich von 2,5 % bis 30 % Diethylether in Luft keine Zündung beobachtet werden (Tabelle 5.4). Aufgrund der niedrigen Zündtemperatur von Diethylether sollten jedoch Zündungen ohne Einschränkungen aufgrund von

$T_{Surface, cut-off} = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ möglich sein, zumindest bei der günstigsten Zündgemischkonzentration von 23 % Diethylether in Luft ([4], [35]). Dies konnte bestätigt werden durch vier Zündversuche ohne Berücksichtigung der Abbruchtemperatur bei einer Gemischkonzentration von 23 % und zusätzlich bei 12 %. Bei der empfohlenen Konzentration von 23 % Diethylether in Luft konnten Zündungen bei einer Zündtemperatur von 290 °C und einer maximalen Zündverzugszeit von 52 s erreicht werden. Bei einer Gemischkonzentration von 12 % zeigten die Zündversuche Zündungen bei einer Zündtemperatur von 490 °C und einer $t_{Ignition\ delay, max} = 72 \text{ s}$. Dieser Anstieg der Zündverzugszeit deutet auf die erwartete Verringerung der Zündeffizienz des Gasgemischs hin. Es sollte beachtet werden, dass die Ergebnisse der Zündversuche nur durch die Zerstörung des Messobjekts bei einer Leistung von 3,3 W ohne Berücksichtigung der Abbruchtemperatur erzielt werden konnten.

Für die reduzierte Leistung von $P_{out} = 1,9 \text{ W}$ konnte in einem Konzentrationsbereich von 2,5 % bis 30 % Diethylether in Luft bei insgesamt 30 Versuchen keine Zündung erzielt werden. Ebenso konnten keine Kaltflammenreaktionen [35] beobachtet werden. Daher wurden bei der Leistung der HF-Strahlung von $P_{out} = 1,6 \text{ W}$ keine weiteren Zündversuche durchgeführt.

Anhand der Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei einer Leistung der HF-Strahlung von $P_{out} = 1,9 \text{ W}$ für Diethylether-Luft-Gemische keine Zündungen auftraten. Damit stellt die resultierende Oberflächentemperatur des Messobjekts aufgrund der Bestrahlung mit hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung keine Zündquelle für die hier betrachteten Testparameter dar. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass es sich hierbei um einen ermittelten Grenzwert für die Ausgangsleistung der HF-Strahlung handelt, ohne die Berücksichtigung relevanter Messunsicherheiten und eines geeigneten Sicherheitsfaktors.

6 Messunsicherheitsbetrachtung und sicherheitstechnischer Grenzwert

Ziel der Messunsicherheitsbetrachtung ist es einen sicherheitstechnischen Grenzwert für HF-Strahlung zu ermitteln. Hierbei fließen hauptsächlich die Ergebnisse der Zündversuche (Kapitel 5) und die gewonnenen Erkenntnisse der Erwärmungsmessungen (Kapitel 3.4) ein.

6.1 Einflussgrößen und Modellgleichung

Ein Ursache-Wirkungs-Diagramm ermöglicht es, das Ergebnis einer Fragestellung präzise zu formulieren und die Hauptursachen sowie deren Einflussgrößen anschaulich darzustellen. Nach der Identifikation der relevanten Einflussgrößen wird deren Bedeutung hinsichtlich der Zielerreichung analysiert. In Abbildung 6.1 wird das Ursache-Wirkungs-Diagramm für das Ziel, einen sicherheitstechnischen Grenzwert für HF-Strahlung (Frequenz, Leistung) zu erhalten, dargestellt. Die dort markierten Einflussgrößen sind nach ihrer Signifikanz geordnet.

Dabei wurden sechs Hauptursachen identifiziert: Leistungsmessung, Temperaturmessung, Messobjekt, Messbedingungen, Experimentator und Messstrategie. Diese Hauptursachen setzen sich aus den zugehörigen Einflussgrößen zusammen, die durch die horizontalen Pfeile auf die jeweiligen Hauptursachen verweisen. Die Einflussgrößen werden auf Basis der Erkenntnisse dieser Forschungsfrage in drei Kategorien eingeteilt:

- **Keine signifikanten Einflussgrößen:** Einflussgrößen, die keinen signifikanten Einfluss auf die Messunsicherheit haben, werden als nicht relevant eingestuft und durch schwarze Pfeile gekennzeichnet. Ein Beispiel hierfür sind die Einflussgrößen der Hauptursache Experimentator. Faktoren wie Erfahrung, Fähigkeiten und Handhabung des Aufbaus können durch Einarbeitung und Schulungen kontrolliert werden und sind daher als nicht relevant anzusehen.
- **Keine signifikanten Einflussgrößen, für festgelegte Bedingungen:** Einflussgrößen, die bei Einhaltung bestimmter festgelegter Bedingungen nicht in die Betrachtung der Messunsicherheit einfließen müssen, werden durch blaue Pfeile markiert. Die Fokussierung der Linsen-Horn-Antenne, der T-Drift des Leistungsverstärkers, die Gemischkonzentration, die Vortemperierung des Versuchsgefäßes und die Temperaturmessung (Zündgefäß, Verstärker) gehören zu diesen Kategorien.
- **Signifikante Größen, Berücksichtigung in Messunsicherheitsbetrachtung:** Einflussgrößen mit einem roten Pfeil, die einen signifikanten Einfluss auf die Messunsicherheit haben, müssen zwingend in die Modellgleichung einbezogen werden. Dazu zählen der Einstellungsbereich $P_{Ch,A}$ des Leistungsverstärkers, die gemessenen Temperaturen ($T_{Ignition,top}$, $T_{Ignition,bottom}$, $T_{Surface,top}$, $T_{Surface,bottom}$), die Absorptionsfähigkeit, die Form und die Größe des Messobjekts sowie die Anzahl der Messungen.

Durch diese Analyse können die kritischen Einflussgrößen zur Bestimmung der Messunsicherheitsbeiträge gezielt identifiziert werden.

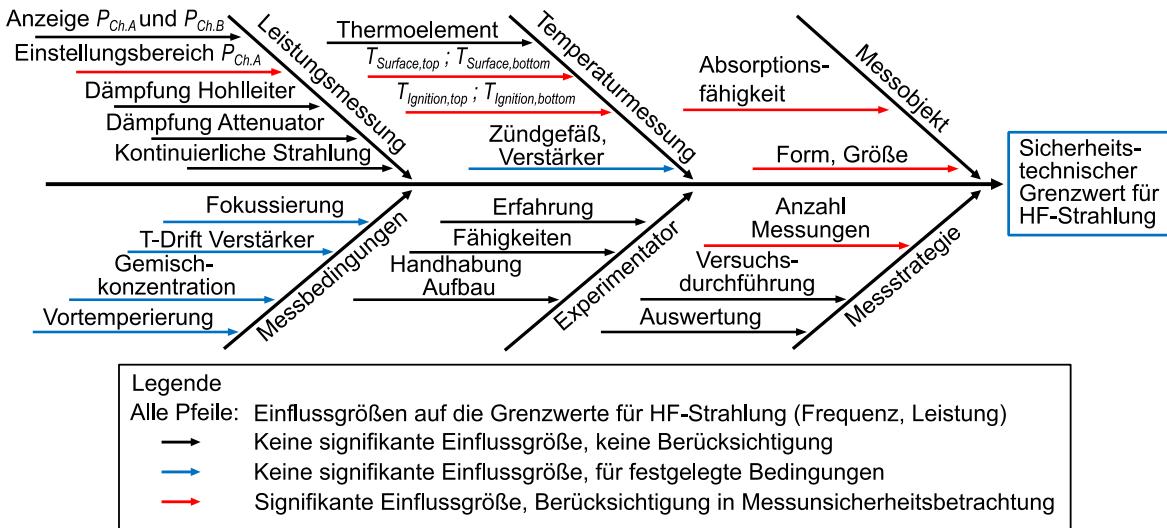


Abbildung 6.1: Ursache-Wirkungs-Diagramm mit Einflussgrößen für die Messunsicherheitsbetrachtung

Aus den signifikanten Einflussgrößen wird eine Modellgleichung aufgestellt, um den sicherheitstechnischen Grenzwert für HF-Strahlung zu ermitteln. Hierfür erfolgt eine Unterteilung der Größen in quantifizierbare Einflüsse (Δ) und nicht quantifizierbare Einflüsse (δ) und werden entsprechend den jeweiligen Symbolen gekennzeichnet.

- Leistungsmessung: Einstellungsbereich $P_{Ch,A}$ des Leistungsverstärkers ($\Delta P_{Ch,A}$).
- Temperaturmessung: Oberflächentemperatur $T_{Surface,top}; T_{Surface,bottom}$ ($\delta T_{Surface}$), Zündtemperatur $T_{Ignition,top}; T_{Ignition,bottom}$ ($\delta T_{Ignition}$)).
- Messobjekt: Absorptionsfähigkeit ($\delta \alpha_{Material}$), Größe und Form ($\delta A_{Messobjekt}$)
- Messstrategie: Anzahl der Messungen (Δn)

Zur Veranschaulichung werden die signifikanten Einflussgrößen im schematischen Versuchsaufbau (Abbildung 5.1) ergänzt und in Abbildung 6.2 dargestellt.

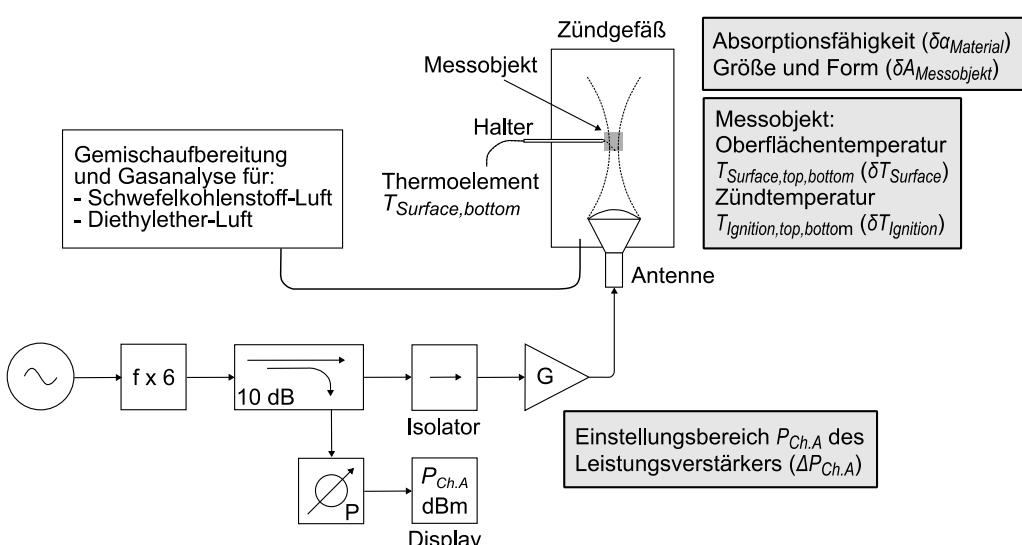


Abbildung 6.2: Signifikante Einflussgrößen auf den sicherheitstechnischen Grenzwert für HF-Strahlung anhand des schematischen Versuchsaufbaus

Die folgenden Einflussgrößen (Abbildung 6.1, blaue Pfeile) sind in der Modellgleichung nicht zu berücksichtigen, wenn diese für festgelegte Bedingungen eingehalten werden.

Dies bedeutet, dass die Messbedingungen und Temperaturmessungen während der Versuche konstant überprüft werden:

- Leistungsverstärker: Regelung und Überwachung der Temperatur des Leistungsverstärkers und dessen Temperatur-Drifts während der Versuche durch eine Wasserkühlung
- Zündgefäß: Einstellung und Überprüfung der jeweiligen Gemischkonzentrationen und die Messung der Temperaturen während der Versuche.
- Messobjektposition: Überprüfung der Fokussierung der Linsen-Horn Antenne auf das Messobjekt.

Die aufgestellte Modellgleichung ist der Gleichung (6.1) zu entnehmen.

$$P_{out_MU} = P_{out}[W] \cdot \Delta P_{Ch.A} \cdot \delta \alpha_{Material} \cdot \delta A_{Messobjekt} \cdot \delta T_{Surface} \cdot \delta T_{Ignition} \cdot \Delta n \quad (6.1)$$

Anhand der aufgestellten Gleichung wird mittels des GUM-Verfahrens „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ [27] das Ergebnis der Messunsicherheit über die Einflussgrößen und deren Unsicherheitsbeiträge durch die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung bestimmt. Die Berechnung erfolgt über die Software GUM Workbench Pro.

Hierüber ist es möglich, die erweiterte Messunsicherheit mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ und einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % (normalverteilt) anzugeben.

Zur Berechnung werden den Einflussgrößen die entsprechenden Typen, Verteilungen und Unsicherheitsbeiträge zugewiesen. Dies entspricht für die Leistung am Antennen Ausgang P_{out} [W] (nach (5.3)) eine Typ-A Unsicherheit und wird über die Anzahl der Versuche berücksichtigt. Die weiteren Größen fließen über Typ-B Unsicherheiten in die Modellgleichung ein. Somit werden durch $\Delta P_{Ch.A}$ die Einstellungsgrenzen zwischen 1,9 W und 1,6 W am Eingang des Leistungsverstärkers über eine Rechteckverteilung berücksichtigt. Des Weiteren wird die Anzahl der Messungen Δn für jede Parameterkombination der Zündversuche (siehe 5.3) mittels eines Unsicherheitsbeitrags von 30 % (Erfahrungswert) in die Messunsicherheitsbetrachtung einbezogen. Die Absorptionskapazität (ca. 90 %) des eingesetzte Absorbermaterial PEEK ESD101 als Messobjekt wird über $\delta \alpha_{Material}$ berücksichtigt. Zusätzlich werden die geringen fertigungs- und versuchsbedingten Abweichungen im Bereich von 5 % in Größe und Form des Messobjekts $\delta A_{Messobjekt}$ sowie die Temperaturabweichungen von $\delta T_{Surface}$ und $\delta T_{Ignition}$ im Bereich von 2 % mit betrachtet.

Basierend auf den jeweiligen Unsicherheitsbeiträgen wird das Endergebnis für die Messunsicherheitsbetrachtung in der folgenden Form (6.2) angegeben. Zusätzlich erfolgt die Angabe und Überprüfung der Überdeckungswahrscheinlichkeit und des Erweiterungsfaktors k .

$$P_{out_MU} = y \pm U \quad (6.2)$$

6.2 Ergebnis der Messunsicherheitsbetrachtung und sicherheitstechnischer Grenzwert für HF-Strahlung

Anhand der Zündversuche in Anlehnung an die Zündversuche zu kleinen heißen Bau- teilen mit Schwefelkohlenstoff-Luft Gemischen (Temperaturklasse T6) und Diethyl- ether-Luft Gemischen (Temperaturklasse T4) sowie dem verwendeten „worst-case“- Absorber konnte ermittelt werden, dass für eine kontinuierliche Antennenausgangsleis- tung von:

- $P_{out} = 1,6 \text{ W}$ bei 92 GHz für Schwefelkohlenstoff-Luft Gemische (T6) und
- $P_{out} = 1,9 \text{ W}$ bei 92 GHz für Diethylether-Luft Gemische (T4)

keine Zündungen auftreten (siehe Kapitel 5.3.1 und 5.3.2).

Mit Bezug auf diesen experimentellen Grenzwert ergibt sich unter Anwendung des GUM-Verfahrens, der Modellgleichung (6.1) und den genannten Unsicherheitsbeiträ- gen die folgenden Ergebnisse der Messunsicherheitsbetrachtung (6.3) für Schwefel- kohlenstoff-Luft Gemische (T6):

$$P_{out_MU;T6} = 1,61 \text{ W} \pm 0,71 \text{ W} \quad (6.3)$$

und (6.4) für Diethylether-Luft Gemische (T4):

$$P_{out_MU;T4} = 1,92 \text{ W} \pm 0,84 \text{ W} \quad (6.4)$$

Mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ und einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % (normalverteilt).

Auf Grundlage von sicherheitstechnischen Aspekten sind die Antennenausgangsleis- tungen $P_{out} = 1,6 \text{ W}$ und $P_{out} = 1,9 \text{ W}$ um die jeweiligen erweiterten Messunsicherheit $U = 0,71 \text{ W}$ beziehungsweise $U = 0,84 \text{ W}$ zu reduzieren. Zusätzlich zur Berücksichti- gung der erweiterten Messunsicherheit wird ein Sicherheitsfaktor von 10 % beauf- schlagt. Dies führt bei Schwefelkohlenstoff-Luft Gemischen (T6) zu einer maximalen Antennenausgangsleistung von 800 mW bei 92 GHz und bei Diethylether-Luft Gemi- schen (T4) von 950 mW bei 92 GHz. Folglich ergibt sich ein sicherheitstechnischer Grenzwert für eine kontinuierliche HF-Strahlung von $P_{Grenzwert} = 800 \text{ mW}$ bei 92 GHz für eine maximale Antennenausgangsleistung unabhängig der Temperaturklasse.

7 Zusammenfassung

In diesem Forschungsvorhaben wurde die Zündquellsicherheit bei HF-Strahlung über die gültigen Grenzwerte der internationalen Norm IEC 60079-0, IEC 60079-14 der europäischen Norm DIN EN 1127-1 sowie der nationalen technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 723 hinaus untersucht. Hierzu erfolgte im ersten Schritt eine Betrachtung und Bewertung der potentiellen Zündmechanismen, die bei hochfrequenter HF-Strahlung auftreten können. In Zuge dessen konnte festgestellt werden, dass der Mechanismus dielektrische Erwärmung eine potentielle Zündquelle darstellt. Die Mechanismen Induktion und Funkenentladung sowie ohmsche Verluste, Gasentladungen oder die Anregung von Atomen und Molekülen konnten als Zündquelle ausgeschlossen werden.

Bei der dielektrischen Erwärmung wird HF-Strahlung absorbiert und in Wärme umgewandelt. Hierdurch kann es zu einer heißen und damit potentiell zündfähigen Oberfläche kommen. Basierend auf dem Effekt der dielektrischen Erwärmung erfolgten theoretische Betrachtungen, Erwärmungsmessungen von Absorbermaterialien, kalorimetrische Messungen an Radarantennen sowie unterstützende Simulationsrechnungen. Zur Ermittlung eines sicherheitstechnischen Grenzwerts für die HF-Strahlung wurden anhand der Erkenntnisse der Erwärmungsversuche, Zündversuche in verschiedenen Gas-Luft-Gemischen sowie eine Messunsicherheitsbetrachtung durchgeführt.

Erwärmungsmessungen und Simulation an dielektrischen Materialien

Bei den Erwärmungsmessungen wurde der „worst-case“ Fall für die Bestrahlung potentieller Absorber mit HF-Strahlung durch Radarsensoren oder ähnlicher Geräte rekonstruiert und die maximale Temperaturerhöhung in Abhängigkeit der Strahlungsleistung für diesen Fall ermittelt. Die Versuche wurden bei einer Frequenz von 92 GHz mit HF-Strahlungsleistungen von 0,1 W bis 2,3 W und einer fokussierenden Linsenhornantenne durchgeführt. Dabei wurde das Absorbermaterial sowie die Größe und die Geometrie der Messobjekte variiert. Es konnten Kerntemperaturerhöhungen durch die Absorption der HF-Strahlung von bis zu 253 K im Messobjekt (PEEK ESD101; Kantenlänge 5 mm x 5 mm x 5 mm) festgestellt werden. Die Untersuchungen zum Einfluss der Geometrie und Größe des Absorbers zeigte, dass die bestrahlte Oberflächengeometrie (rechteckig oder rund) bei gleicher Größe keinen signifikanten Einfluss auf die Kerntemperaturerhöhung aufweist. Bei Variation der Absorbergröße kommt es zu einer deutlichen Verringerung der Kerntemperatur mit Zunahme der Größe.

Mit Hilfe des Simulationsmodells konnten die Erwärmungsversuche an einem Absorbermaterial nachgebildet und anhand der experimentellen Ergebnisse für eine Leistung bis 2 W bei 92 GHz der HF-Strahlung verifiziert werden. Folglich ist durch das Simulationsmodell eine Abschätzung der Materialerwärmung für Frequenzen oberhalb von 92 GHz und einer konstanten Leistung von 2 W möglich. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass mit steigender Frequenz die Temperaturerhöhung zunimmt. Im Vergleich zu einer Frequenz von 92 GHz ist bei 260 GHz mit einer zusätzlichen Temperaturerhöhung von 65 K zu rechnen.

Die Ergebnisse der Erwärmungsmessung zeigen eine deutlich sichtbare Zündgefahr bei dielektrischen Materialien, mit hoher Absorptionsfähigkeit und geringer Größe.

Kalorimetrische Messungen und Simulationen an Radarantennen

Zur Klärung, ob die Erwärmung der Antenne selbst eine mögliche Zündquelle darstellt, wurde die Eigenerwärmung einer Radarantenne bei 170 GHz untersucht. Hierfür erfolgten Erwärmungsmessungen in einem HF-Mikrokalorimeter. Als Ergebnis dieser Messungen konnte eine Erwärmung um 10 mK mit einer kontinuierlichen HF-Leistung von 0,3 mW erreicht werden. Unter der Annahme, dass sich die Erwärmung durch die eingestrahlte HF-Leistung linear verhält, ergibt sich bei einer kontinuierlichen eingespeisten HF-Leistung von 2 W eine Erwärmung von 66,67 K. Allerdings ist die Einspeisung eines kontinuierlichen HF-Signals bei 170 GHz mit 2 W kein realistischer Betriebsfall für einen Radarsensor. Die tatsächliche Leistung liegt deutlich darunter, und es wird sich nicht um ein kontinuierliches Signal handeln.

Zusätzlich zu den kalorimetrischen Messungen wurde ein Simulationsmodell der Radarantenne ohne Berücksichtigung von Einflüssen durch Konvektion und Wärmestrahlung erstellt. Mit Hilfe dieses Simulationsmodells wurde die Eigenerwärmung der Radarantenne bei den Frequenzen 170 GHz und 250 GHz, jeweils mit einer Strahlungsleistung von 1,5 mW untersucht. Bei 170 GHz beträgt die maximale Temperaturerhöhung 230 mK und für 250 GHz ist eine maximale Temperaturerhöhung von 250 mK festzustellen.

Hinsichtlich der Ergebnisse der kalorimetrischen Messungen und der Simulationen ist die Eigenerwärmung der Radarantenne als möglich Zündquelle auszuschließen.

Zündversuche mittels HF-Strahlung

Basierend auf den Erkenntnissen der Erwärmungsmessungen mit Bezug auf die ermittelten Kerntemperaturen in Abhängigkeit der Messobjektgröße wurden die Zündversuche in Anlehnung an die Prüfspezifikationen für kleine heiße Bauteile nach IEC 60079-0 Abschnitt 5.3.3 (Temperatur kleiner Bauteile für elektrische Geräte der Gruppe I oder Gruppe II) und 26.5.3 (Zündprüfung kleiner Bauteile für Gruppe I und Gruppe II) durchgeführt.

Die Zündversuche erfolgten in Gemischen aus Diethylether-Luft (Temperaturklasse T4) und Schwefelkohlenstoff-Luft (Temperaturklasse T6) verschiedener Konzentrationsbereiche. Des Weiteren wurde während der Zündversuche das Messobjekt (PEEK ESD101; Kantenlänge 5 mm x 5 mm x 5 mm) mit einer HF-Strahlung mit Ausgangsleistungen bis maximal 3,3 W bei 92 GHz kontinuierlich durch eine Linsenhornantenne bestrahlt. Die Erhöhung der möglichen Ausgangsleistung von 2,3 W auf 3,3 W erfolgte durch eine Optimierung des Versuchsaufbaus mittels eines Wasserkühlsystems.

Anhand von 124 durchgeführten Zündversuchen und 32 beobachtete Zündungen wurde ermittelt, dass bei einer Antennenausgangsleistung von $P_{out} = 1,6$ W für Schwefelkohlenstoff-Luft-Gemische und für Diethylether-Luft-Gemische bei $P_{out} = 1,9$ W keine Zündungen auftreten. Damit stellen die resultierenden heißen Oberflächen des Messobjekts aufgrund der Bestrahlung mit hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung keine Zündquelle dar. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass es sich hierbei um einen ermittelten Grenzwert für die Ausgangsleistung der HF-Strahlung handelt, ohne die Berücksichtigung relevanter Messunsicherheitsbeiträge und eines geeigneten Sicherheitsfaktors.

Messunsicherheitsbetrachtung und sicherheitstechnischer Grenzwert für HF-Strahlung

Bei der Durchführung der Messunsicherheitsbetrachtung und der Bestimmung des sicherheitstechnischen Grenzwertes für die Zündquellsicherheit bei HF-Strahlung fließen die Ergebnisse der Zündversuche und der Erwärmungsmessungen ein.

Anhand der Zündversuche wurde festgestellt, dass bei einer kontinuierlichen Antennenausgangsleistung von 1,6 W bei 92 GHz für Schwefelkohlenstoff-Luft Gemische und von 1,9 W bei 92 GHz für Diethylether-Luft Gemische keine Zündungen auftreten. Mit Bezug auf diese experimentellen Grenzwerte folgt durch Anwendung des GUM-Verfahrens, der Modellgleichung und den Unsicherheitsbeiträgen eine HF-Strahlungsleistung von $1,6 \text{ W} \pm 0,71 \text{ W}$ und $1,9 \pm 0,84 \text{ W}$. Auf Grundlage von sicherheitstechnischen Aspekten ist die Antennenausgangsleistung, um die erweiterte Messunsicherheit zu reduzieren.

Die sich hieraus ergebende Leistung wird zusätzlich durch einen Sicherheitsfaktor beaufschlagt. Dieses Vorgehen führt zu maximalen Antennenausgangsleistungen von 800 mW bei 92 GHz für Schwefelkohlenstoff-Luft Gemische und von 950 mW bei 92 GHz für Diethylether-Luft Gemische. Folglich ergibt sich ein sicherheitstechnischer Grenzwert für eine kontinuierliche HF-Strahlung von $P_{\text{Grenzwert}} = 800 \text{ mW}$ bei 92 GHz für eine maximale Antennenausgangsleistung unabhängig der Temperaturklasse.

Der in diesem Forschungsvorhaben ermittelte Grenzwert für eine Zündquellsicherheit bei HF-Strahlung liegt über den zurzeit gültigen Leistungs- und Frequenzgrenzwerten.

8 Schlussfolgerungen

Gegenstand der Untersuchung war die Zündquellsicherheit bei HF-Strahlung im Frequenzbereich 60 GHz bis 330 GHz in explosionsfähigen Atmosphären. Sie stützt sich sowohl auf Simulationen (Abschnitt 4) als auch auf Erwärmungs- und Zündversuche (Abschnitte 5 und 6).

Betrachtet wurden alle in DIN EN 1127-1 bzw. IEC 60079-14 aufgeführten Zündquellen, die Eigenerwärmung einer Radarantenne und die dielektrische Erwärmung eines Messobjekts unter worst-case Bedingungen. Als einzige mögliche wirksame Zündquelle wurde die dielektrische Erwärmung des Messobjekts identifiziert. Die Beurteilung der potentiellen Zündquellen bei HF-Strahlung ist Kapitel 2.1.3 zu entnehmen und wird zusammenfassend in Tabelle 8.1 aufgeführt.

Tabelle 8.1: Beurteilung potentieller Zündquellen bei HF-Strahlung

Potentielle Zündquellen	Bemerkung
Induktion und Funkenentladung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine zusätzlichen Anforderungen durch dieses Forschungsvorhaben (Begründung siehe Kapitel 2.1.3), abgedeckt durch bestehende Zündschutzarten ▪ CLC/TR50427: Vorschriften und Vorgehensweisen für Maßnahmen zur Vermeidung von zündfähigen Funken
Induktion und ohmsche Verluste	Kein Bestandteil dieses Forschungsvorhabens
Dielektrische Erwärmung	Zündquelle Bestandteil dieses Forschungsvorhabens
Gasentladung	Aufgrund der hohen benötigten Strahlungsleistungen bei geringen Drücken, wird dieser Effekt in diesem Forschungsvorhaben nicht weiter untersucht und als nicht praxisrelevant für die Füllstandsmessung eingestuft
Anregung von Atomen und Molekülen	Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens unbedenklich im Sinne des Explosionsschutzes

Das Gesamtergebnis lautet: Sowohl durch die typische Eigenerwärmung einer Radarantenne im Frequenzbereich von 60 GHz bis 330 GHz als auch durch deren emittierte Strahlung mit $P \leq 800 \text{ mW}$ und deren vollständiger Umwandlung in Wärmeenergie fokussiert auf ein Zielobjekt ist die Zündung eines zündfähigen Gemisches auf Basis der hier vorgestellten Simulations- und Versuchsergebnisse nicht zu erwarten. Auch die in

DIN EN 1127-1 bzw. IEC 60079-14 aufgeführten Zündquellen führen zu keiner Zündung von explosionsfähigen Atmosphären in diesem Frequenzbereich. Daher ist bei einer kontinuierlichen Ausgangsleistung von $P \leq 800$ mW ein Betrieb in explosionsfähigen Atmosphären unbedenklich. Gepulste Signale bis 800 mW sind ebenfalls als unbedenklich für einen Betrieb in explosionsfähigen Atmosphären einzustufen. Dies gilt auch unter Berücksichtigung der Messunsicherheit und der Sicherheitsfaktoren.

Zusätzlich fällt dieser neu vorgeschlagene Grenzwert in die regulatorische Lücke zwischen 60 GHz und 30 THz (siehe Tabelle 8.2). Die Leistung von $P \leq 800$ mW für Geräte der Temperaturklasse T6 stimmt gut mit den Grenzwerten von 6 W und 2 W bis 60 GHz für Geräte der Gruppe I bzw. Gruppe II der IEC 60079-0 [4] überein. Oberhalb von 30 THz lässt sich der ermittelte Grenzwert am besten mit den in IEC 60079-28 [7], Abschnitt 5.2.2.1, angegebenen Grenzwerten für Dauerstrichstrahlung vergleichen, die für Geräte der Temperaturklasse T1 bis T4 und den Gruppen I und II gelten. Hier ist ein Grenzwert von 200 mW für eine bestrahlte Probe mit einer Oberflächengröße, die mit den in den hier durchgeführten Versuchen verwendeten Proben vergleichbar ist, sowie ein restriktiverer Grenzwert von 15 mW für die abgestrahlte Leistung angegeben, der unabhängig von der Temperaturklasse und der Oberflächengröße ist.

Tabelle 8.2: Übersicht Grenzwerte von Strahlungsleistungen in Abhängigkeit der Frequenz

Strahlungsleistung	Frequenz	Einsatzbereich	Bemerkung
6 W und 2 W	≤ 60 GHz	Gruppe I, Gruppe II	IEC 60079-0
200 mW	≥ 30 THz	Temperaturklasse T1 - T4; Gruppen I und II; Fläche ≥ 8 mm ²	IEC 60079-28
15 mW		Unabhängig von Temperaturklasse und Fläche	
≤ 800 mW	60 GHz - 330 GHz	Temperaturklasse T1 - T6; Gruppen I und II; Fläche ≥ 25 mm ²	Ergebnis des Forschungsvorhaben

9 Umsetzungs- und Verwertungsplan

Um die Erkenntnisse zur Zündquellsicherheit bei HF-Strahlung und die hieraus resultierenden sicherheitstechnischen Schlussfolgerungen der Öffentlichkeit zugänglich zu machen, ist ein Open-Access Journal bei der Advances in Radio Science (ARS) 2025 geplant. Zusätzlich sind weitere Beiträge in einschlägigen Journals und technischen Zeitschriften angedacht. Während des Projektes erfolgten bereits Veröffentlichungen über erzielte Forschungserkenntnisse in Rahmen von Vorträgen, Posterpräsentationen sowie schriftlichen Ausarbeitungen als Konferenzbeiträge im Bereich Explosionsschutz und Hochfrequenztechnik. Hierzu zählt das International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE) und die Kleinheubacher Tagung.

In Absprache mit Fachexperten des Explosionsschutzes und der Hochfrequenztechnik, ist eine Einarbeitung der Erkenntnisse in die nationale technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 723, darüber hinaus in die europäische Norm DIN EN 1127-1 und in die internationale Norm IEC 60079-0 sowie IEC 60079-14 anzustreben.

10 Literaturverzeichnis

- [1] *Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz – Teil 1: Grundlagen und Methodik*, DIN EN 1127-1:2019.
- [2] *Gefährliche explosionsfähige Gemische – Vermeidung der Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Gemische*, Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Rep. TRGS 723, 2019.
- [3] *Explosive atmospheres - Part 14: Electrical installation design, selection and installation of equipment, including initial inspection*, IEC 60079-14:2024, Aug. 2024.
- [4] *Explosive Atmospheres - Part 0: Equipment - General Requirements*, IEC 60079-0.
- [5] *IEEE Standard for Rectangular Metallic Waveguides and Their Interfaces for Frequencies of 110 GHz and Above— Part 1: Frequency Bands and Waveguide Dimensions*, IEEE 1785.1-2012, Mrz. 2013.
- [6] *Hollow metallic waveguides - Part 2: Relevant specifications for ordinary rectangular waveguides*, IEC 60153-2:2016, Mai. 2016.
- [7] *Explosive atmospheres - Part 28: Protection of equipment and transmission systems using optical radiation*, IEC 60079-28, Mai. 2015.
- [8] *Assessment of Inadvertent Ignition of Flammable Atmospheres by Radio-Frequency Radiation – Guide*, CLC/TR 50427:2004 E, CENELEC - European Committee for Electrotechnical Standardization, 2004.
- [9] *Explosionsfähige Atmosphären – Teil 36: Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären – Grundlagen und Anforderungen*, DIN EN ISO 80079-36.
- [10] Michael Esslinger, "Untersuchung zur Zündung explosionsfähiger Atmosphären durch Absorption von Laserstrahlung in kleinen Partikeln" 2007.
- [11] Lars Hendrik Simon, "Zündwirksamkeit von Ultraschall in explosionsfähigen Atmosphären," Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2014.
- [12] Snaborn C. Brown, "High-Frequency Gas Discharge Breakdown" Research Laboratory of Electronics - Massachusetts Institute of Technology, Techreport, Rep. 195, 1951.
- [13] M. V. Ammosov, N. B. Delone und V. P. Krainov, "Tunnel Ionization of Complex Atoms and of Atomic Ions in an Alternating Electromagnetic Field" *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, Jg. 91, 1986.
- [14] G. Brumme, "Laserinduzierter Gasdurchbruch" Technische Hochschule Darmstadt, 1977. [Online]. Verfügbar unter: <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/2ff88d23-8cea-4391-92a2-b0f42e863428>
- [15] A. D. MacDonald, *Microwave Breakdown in Gases* (Wiley Series in Plasma Physics). John Wiley & Sons, Inc, 1966.
- [16] W. E. Scharfman, W. C. Taylor und T. Morita, "Research Study of Microwave Breakdown of Air at High Altitudes" Stanford Research Institute, Rep. AFCRL-62-732, 1962. [Online]. Verfügbar unter: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0287507>
- [17] Paul Flowers, Klaus Theopold, Richard Langley, Edward J. Neth und William R. Robinson, *Chemistry: Atoms First 2e*. Houston, Texas: OpenStax, Rice University, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://openstax.org/details/books/chemistry-atoms-first-2e>

- [18] Stefan Essmann, "Experimentelle Untersuchung der Zündung durch elektrostatische Entladungen geringer Energie" Karlsruher Institut für Technologie, 2018.
- [19] Hermann Haken und Hans-Christoph Wolf, *Molekülphysik und Quantenchemie: Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen*. Springer, 2006.
- [20] Bernhard Schrader, *Infrared And Raman Spectroscopy*. VCH, 1995.
- [21] David M. Pozar, *Microwave Engineering*. John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [22] A. C. Metaxas und R. J. Meredith, *Industrial Microwave Heating* (IEEE Press Power Systems Engineering Series). P. Peregrinus, 1983.
- [23] Victrex plc, *VICTREX PEEK 450G*.
- [24] A. Kazemipour et al., "Design and Calibration of a Compact Quasi-Optical System for Material Characterization in Millimeter/Submillimeter Wave Domain" *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Jg. 64, Nr. 6, S. 1438–1445, 2015, doi: 10.1109/TIM.2014.2376115.
- [25] ERAVAMT. "SAQ-903017-10-S1: W-Band Spot-Focusing Lens Antenna, 1.7" Focal Length." Datenblatt. [Online.] Verfügbar: <https://sftp.eravant.com/content/datasheets/SAQ-903017-10-S1.pdf>
- [26] National Instruments, *NI 9212 and TB-9212*.
- [27] Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1), "Evaluation of Measurement Data — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement," Joint Committee for Guides in Metrology, Rep. JCGM 100:2008, 2008.
- [28] FLIR Systems, Inc, *Technical Data FLIR T10xx Series*.
- [29] 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BlmSchV), 2013.
- [30] Patrick Walkemeyer, Martin Thedens, Michael Beyer und Christian Damm, Hg., *Using RF Measurement Techniques to Evaluate Ignition Hazards due to Dielectric Heating in Explosive Atmospheres*, 2022.
- [31] Kern, *RIWETA Materialdatenbank*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kern.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=1701&lng=2>
- [32] C. Schierding, F. Gellersen, M. Hau, K. Kuhlmann, M. Thedens und M. Beyer, Hg., *Ignition tests in explosive atmospheres using absorption of High-Frequency Electromagnetic radiation based on tests of small hot components*. Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE 2024), 2024, doi: 10.5281/zenodo.12621001.
- [33] Walkemeyer, P., M. Thedens, M. Beyer und C. Damm, Hg., *Investigation of ignition hazards due to the absorption of high-frequency electromagnetic radiation by solids, gases and vapours*, 2022.
- [34] N. P. Setchkin, "Self-Ignition Temperatures of Combustible Liquids" *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Jg. 1954, Vol. 53, Jul. 1954, Art. Nr. Research Paper 2516.
- [35] Markworth, D., Schebsdat, F., *Zündverhalten kleiner heißer Bauteile in Explosionsfähiger Atmosphäre* (PTB-W-25), 1985.

11 Veröffentlichungen aus dem Projekt

Im Folgenden sind die Veröffentlichungen zur Thematik in Form von Konferenzbeiträgen, Zeitschriftenartikeln und betreute studentische Arbeiten aufgeführt:

Konferenzbeiträge:

- Schierding, C., Gellersen, F., Hau, M., Kuhlmann, K., Thedens, M., Beyer, M. (2024): *Ignition tests in explosive atmospheres using absorption of High-Frequency Electromagnetic radiation based on tests of small hot components*, Proceedings of the 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE 2024), Neapel, 10-14, June, 2024, Italy, DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.12621001>.

Konferenzbeiträge ohne schriftliche Quelle:

- Walkemeyer, P., M. Thedens, M. Beyer und Damm, C. (2022): *Using RF Measurement Techniques to Evaluate Ignition Hazards due to Dielectric Heating in Explosive Atmospheres* [Vortrag], Kleinheubacher Tagung 2022, 27-29, September, 2022, Miltenberg, Deutschland.
- Walkemeyer, P., Thedens, M., Beyer, M. und Damm, C (2022): *Investigation of ignition hazards due to the absorption of high-frequency electromagnetic radiation by solids, gases and vapours* [Poster], 14th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions; ISHPMIE, Braunschweig, 11-15, July, 2022, Germany.
- Gellersen, F., Schierding, C., Kuhlmann, K. Beyer, M. (2024): *Ignition tests using electromagnetic waves in explosive atmospheres* [Vortrag ohne schriftliche Quelle], Kleinheubacher Tagung 2024, 24-26, September, 20244, Miltenberg, Deutschland.

Zeitschriftenartikel:

- [unveröffentlicht] Gellersen, F., Schierding, C., Kuhlmann, K. Beyer, M. (2025): *Ignition Tests using Electromagnetic Waves in Explosive Atmospheres*, Open-Access Journal bei Advances in Radio Science (ARS), <https://www.advances-in-radio-science.net/>

Betreute studentische Arbeit:

Knoll, Phillip (2023): *Simulation von dielektrischer Erwärmung zur Gefahrenabschätzung bei Einsatz von hochfrequenter Strahlung in explosionsfähigen Atmosphären*. Studienarbeit der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften - Hochschule Braunschweig/Wolfenbüttel (Fakultät für Elektrotechnik) und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Erstprüfer: Herr Prof. Dr.-Ing. Matthias Hampe, Zweitprüfer: Herr Patrick Walkemeyer, M.Sc.

Bilderverzeichnis

Abbildung 1.1: Vorgehensweise zu den einzelnen Schwerpunkten dieser Arbeit.....	8
Abbildung 2.1: Explosionsdreieck	9
Abbildung 2.2: Beispiele für leitfähige, schleifenartige Strukturen.....	12
Abbildung 2.3: Ausbreitung einer Welle im verlustbehafteten Medium	16
Abbildung 2.4: Gaußscher Strahl	21
Abbildung 3.1: Quasioptischer Messaufbau zur Messung der Materialparameter ...	24
Abbildung 3.2: Versuchsaufbau zur Messung der Antennencharakteristik	26
Abbildung 3.3: Messergebnisse der Antennencharakteristik bei 92 GHz.....	26
Abbildung 3.4: Versuchsaufbau zur Erzeugung der HF-Strahlung.....	27
Abbildung 3.5: Temperaturmessung	28
Abbildung 3.6: Antenne und Probenhalterung	31
Abbildung 3.7: HF-Kabine mit Vorraum und Absorberwürfel hinter der Antenne	31
Abbildung 3.8: Abstände zwischen Antenne und Probe	33
Abbildung 3.9: Zeitlicher Verlauf der gemessenen absolut Temperaturen.....	33
Abbildung 3.10: Messergebnisse der Erwärmungsversuche bei 92 GHz.....	34
Abbildung 3.11: Radarantenne für die kalorimetrische Messung	35
Abbildung 3.12: Antennen symmetrisch	35
Abbildung 3.13: Mikrokalorimeter-Gefäß	35
Abbildung 3.14: Ergebnis der Erwärmungsmessung.....	36
Abbildung 3.15: Ergebnis der Erwärmungsmessung.....	37
Abbildung 4.1: Simulationsergebnisse für den Gaußschen Strahl bei 92 GHz	39
Abbildung 4.2: Simulationsergebnisse für PEEK	40
Abbildung 4.3: Simulierte Temperaturverteilung einer bestrahlten Probe	41
Abbildung 4.4: Temperaturverteilung der Radarantenne	41
Abbildung 5.1: Schematischer Versuchsaufbau für Zündversuche.....	43
Abbildung 5.2: Experimenteller Versuchsaufbau zum Zeitpunkt einer Zündung.....	43
Abbildung 5.3: Versuchsaufbau für Zündversuche mit HF-Strahlungserzeugung....	44
Abbildung 5.4: a) Position des Thermoelements.....	46
Abbildung 5.5: Zerstörtes Messobjekt.....	47
Abbildung 5.6: Oberflächentemperaturen des Messobjekts.....	49
Abbildung 6.1: Ursache-Wirkungs-Diagramm mit Einflussgrößen	53
Abbildung 6.2: Signifikante Einflussgrößen.....	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Grenzwerte für strahlungsemittierende Geräte	10
Tabelle 2.2: Potentielle Zündmechanismen bei HF-Strahlung.....	11
Tabelle 2.3: Bedeutung der S-Parameter	17
Tabelle 3.1: Messwerte aus der Materialcharakterisierung bei 92 GHz.....	25
Tabelle 3.2: Messfehler und Unsicherheiten der FLIR Wärmebildkamera.....	30
Tabelle 4.1: Relevante Materialparameter von PEEK	38
Tabelle 5.1: Übersicht über die betrachteten Leistungen der HF-Strahlung	45
Tabelle 5.2: Oberflächentemperatur des Messobjekts	46
Tabelle 5.3: Ergebnisse der Zündversuche für Schwefelkohlenstoff-Luft-Gemische.	48
Tabelle 5.4: Ergebnisse der Zündversuche für Diethylether-Luft-Gemische	50
Tabelle 8.1: Beurteilung potentieller Zündquellen bei HF-Strahlung	59
Tabelle 8.2: Übersicht Grenzwerte von Strahlungsleistungen in Abhängigkeit der Frequenz	60
Tabelle A.1: Mögliche Zündquellen nach DIN EN 1127-1 [1] und TRGS 723 [2].....	67
Tabelle B.1: Bezeichnung, Hersteller, Bezugsquellen verwendeter Materialien	68

A Mögliche Zündquellen

Tabelle A.1: Mögliche Zündquellen nach DIN EN 1127-1 [1] und TRGS 723 [2]

Mögliche Zündquellen		Bemerkung
1	Heiße Oberflächen	
2	Flammen, heiße Gase	einschließlich heißer Partikel
3	Mechanische erzeugte Funken	z. B. Reib-, Schlag- und Abtragvorgänge
4	Elektrische Funken	z. B. beim Öffnen und Schließen
5	Elektrische Streuströme und kathodischer Korrosionsschutz	auch durch magnetische Induktion
6	Statische Elektrizität	
7	Blitzschlag	
8	Elektromagnetische Wellen	10 kHz bis 300 GHz, Hochfrequenz
9	Elektromagnetische Wellen	300 GHz bis 3 PHz, THz-Strahlung
10	Ionisierende Strahlung	Alpha- und Betastrahlung, Gamma- und Röntgenstrahlung (> 3 PHz)
11	Ultraschall	
12	Adiabatische Kompression und Stoßwellen	
13	Exotherme Reaktionen, einschließlich Selbstentzündung von Stäuben	

B Materialien

Tabelle B.1: Bezeichnungen, Hersteller, Bezugsquellen verwendeter Materialien

ESD-Materialien	Hersteller	Bezugsquelle
PE1000	unbekannt	Bestand PTB
PE UHMW ESD	item Industrietechnik GmbH	item Industrietechnik GmbH
TivarEco	Mitsubishi Chemical Group	W. Max Wirth GmbH
ST6000	unbekannt	Bestand PTB
ESD-Mat. Nr. 1	unbekannt	Bestand PTB
ESD-Mat. Nr. 2	unbekannt	Bestand PTB
Carbon Mide	unbekannt	Bestand PTB
PEEK ESD101	Victrex plc.	POLYTRON GmbH
PEEK CA30	Victrex plc.	POLYTRON GmbH
Murflohr+Kohle	Murtfeldt Kunststoffe GmbH	Murtfeldt Kunststoffe GmbH
Kunststoffe	Hersteller	Bezugsquelle
PTFE	unbekannt	Bestand PTB
PVC-Hart	unbekannt	Bestand PTB
Acryl	unbekannt	Bestand PTB
Polypropylen	unbekannt	Bestand PTB
PEEK	Victrex plc.	Bestand E+H
ESD-Schäume	Hersteller	Bezugsquelle
ESD-Schaumstoff	W. Warmbier GmbH	Conrad Electronic
HF-Absorber	MDL Technologies Ltd. (vorher: ETS-Lindgren)	Bestand PTB



Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt,
das nationale Metrologieinstitut, ist eine
wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde
im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für
Wirtschaft und Energie.



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Nationales Metrologieinstitut
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: (0531) 592-93 21
Fax: (0531) 592-30 08
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de