

**Ein Beitrag zur
Brandentdeckung durch Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich des
elektromagnetischen Spektrums**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor - Ingenieurs

genehmigte Dissertation

von

Thorsten Kempka

aus

Gladbeck

Referent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Kaiser
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Klaus Solbach
Tag der mündlichen Prüfung: 6. April 2006

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Bildverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VIII
Einleitung	1
1 Physikalische Grundlagen	3
1.1 Wärmestrahlung	4
1.2 Wellenausbreitung im Freiraum	10
1.3 Dämpfung von elektromagnetischen Wellen durch Aerosole	13
1.4 Dämpfung von elektromagnetischen Wellen durch Materie	15
2 Mess-System	18
2.1 Aufbau des Mess-Systems	18
2.2 Kalibration	21
2.3 Temperaturauflösung	26
2.4 Ablauf der Messungen	32
2.5 Steuerung des Mess-Systems	37
2.6 Zusammenfassung	39
3 Messergebnisse und Auswertung	41
3.1 Testfeuer	41
3.2 Messaufbau	43
3.3 Frequenzbereich 26 - 40 GHz	45

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	<i>II</i>
3.3.1 Testfeuer 1	45
3.3.2 Testfeuer 2	55
3.3.3 Testfeuer 2neu	61
3.3.4 Testfeuer 3	65
3.3.5 Testfeuer 4	69
3.3.6 Testfeuer 5	73
3.3.7 Testfeuer 6	80
3.3.8 Testfeuer 7	85
3.3.9 Zusammenfassung	89
3.4 Frequenzbereich 18 - 26 GHz	91
3.5 Frequenzbereich 12 - 18 GHz	98
3.6 Frequenzbereich 2 - 12 GHz	100
3.7 Zusammenfassung	102
4 Anwendungsbeispiel	104
Zusammenfassung	113
Literaturverzeichnis	115
A Rauschbetrachtungen an linearen Zweitoren	121
B Streuparameterdarstellung von Zweitoren	123
C Formelverzeichnis	125

Bildverzeichnis

1.1	Modell zur Brandentdeckung durch Wärmestrahlung	4
1.2	Spektrale Strahlstärke $S_{\text{BB}}(f, T, 1 \text{ m}^2)$ eines schwarzen Körpers	7
1.3	Qualitative Darstellung der Emissionsgrade von Feststoffen und Gasen	9
1.4	Feuerszenario mit Empfänger	11
1.5	Dämpfung der spektralen Strahlstärke $S_{\text{F}}(f, T_{\text{F}}, A_{\text{F}})$ eines Feuers durch einen Festkörper	16
2.1	Blockdiagramm des Mess-Systems	19
2.2	Mess-System	21
2.3	Temperatur T_{KL} der Kalibrierlast während der Aufheizphase	22
2.4	Aufbau und Rauschersatzschaltbild der Kalibrierlast	23
2.5	Rauschmaß $F_{\text{LNA, dB}}$ eines verwendeten Vorverstärkers	27
2.6	Strahlungsverteilung im Feuerfall	29
2.7	Fernfeldbedingung für eine punktförmigen Quelle	32
2.8	Messablauf	33
2.9	Zeitlicher Messablauf	34
2.10	Idealisiertes Modell mit beispielhaften Signalverläufen für den Fall $T_{\text{a}} = 2 \tau$	35
2.11	Betrag der Teilspektren der Übertragungsfunktion $H_{\text{MS}}(f)$	37
2.12	Graphische Datenauswertung	38
2.13	Datenformat innerhalb des Mess-Systems	39
3.1	Schematische Darstellung des Messaufbaus	43
3.2	Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Fläche des Testfeuer TF1	46

3.3	Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF1 der Messbereiche zwischen 37.55 – 37.95 GHz	47
3.4	Gemessene Leistung $p_M(f_c, t)$ eines TF1 der Messbereiche zwischen 37.55 – 37.95 GHz	47
3.5	Startleistung $p_M(f_c, t_0)$ und Maximalleistung $p_M(f_c, t_m)$ eines TF1	49
3.6	Prozentualer Anstieg $A_p(f_c)$ der Leistung der Wärmestrahlung eines TF1	50
3.7	Empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF1 der Messbereiche 36.55 GHz und 36.65 GHz	51
3.8	Empfangene Leistung $p_R(30.15 \text{ GHz}, t)$ eines TF1	52
3.9	Empfangene Leistung $p_R(30.15 \text{ GHz}, t)$ eines TF1 in der Anfangsphase	53
3.10	Äquivalente Temperatur $T_R(30.15 \text{ GHz}, t)$ eines TF1	54
3.11	Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Fläche des Testfeuers TF2	55
3.12	Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF2 der Messbereiche zwischen 27.05 – 27.45 GHz	56
3.13	Startleistung $p_M(f_c, t_0)$ und Maximalleistung $p_M(f_c, t_m)$ eines TF2	56
3.14	Prozentualer Anstieg $A_p(f_c)$ der Leistung der Wärmestrahlung eines TF2	57
3.15	Empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF2 der Messbereiche 34.55 GHz und 34.65 GHz	58
3.16	Empfangene Leistung $p_R(31.75 \text{ GHz}, t)$ eines TF2	59
3.17	Normierte Ionisationskammer- (MIC), Durchlicht- (Mirex) und Gasmesswerte (CO und CO ₂) eines TF2	60
3.18	Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF2 der Messbereiche zwischen 27.05 – 27.45 GHz hinter einer Deckenplatte	61
3.19	Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF2neu der Messbereiche zwischen 32.35 – 32.75 GHz	62
3.20	Prozentualer Anstieg $A_p(f_c)$ der Leistung der Wärmestrahlung eines TF2neu	63
3.21	Empfangene Leistung $p_R(37.05 \text{ GHz}, t)$ eines TF2neu	64
3.22	Normierte Ionisationskammer- (MIC), Durchlicht- (Mirex) und Gasmesswerte (CO und CO ₂) eines TF2neu	64

3.23	Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Fläche des Testfeuers TF3	65
3.24	Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF3 der Messbereiche zwischen 33.55 – 33.95 GHz	66
3.25	Prozentualer Anstieg $A_p(f_c)$ der Leistung der Wärmestrahlung eines TF3	67
3.26	Empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF3 der Messbereiche 39.15 GHz und 39.25 GHz	68
3.27	Empfangene Leistung $p_R(26.65 \text{ GHz}, t)$ eines TF3	69
3.28	Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF4 der Messbereiche zwischen 36.35 – 36.75 GHz	70
3.29	Prozentualer Anstieg $A_p(f_c)$ der Leistung der Wärmestrahlung eines TF4	71
3.30	Empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF4 der Messbereiche 30.65 GHz und 30.75 GHz	71
3.31	Empfangene Leistung $p_R(39.75 \text{ GHz}, t)$ eines TF4	72
3.32	Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Fläche des Testfeuers TF5	73
3.33	Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF5 der Messbereiche zwischen 34.15 – 34.55 GHz	74
3.34	Empfangene Leistung $p_R(33.55 \text{ GHz}, t)$ eines TF5	75
3.35	Empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF5 der Messbereiche 31.45 GHz und 31.55 GHz	76
3.36	Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF5a der Messbereiche zwischen 28.45 – 28.85 GHz	77
3.37	Empfangene Leistung $p_R(28.85 \text{ GHz}, t)$ eines TF5a	77
3.38	Empfangene Leistung $p_R(36.85 \text{ GHz}, t)$ eines TF5a	78
3.39	Empfangene Leistung $p_R(36.85 \text{ GHz}, t)$ eines TF5a außerhalb des Brandorts (mit Reflektionen)	79
3.40	Empfangene Leistung $p_R(36.85 \text{ GHz}, t)$ eines TF5a außerhalb des Brandorts (ohne Reflektionen)	79
3.41	Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Fläche des Testfeuers TF6	80

3.42	Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF6 der Messbereiche zwischen 30.85 – 31.25 GHz	81
3.43	Prozentualer Anstieg $A_p(f_c)$ der Leistung der Wärmestrahlung eines TF6	82
3.44	Empfangene Leistung $p_R(29.35 \text{ GHz}, t)$ eines TF6	82
3.45	Empfangene Leistung $p_R(34.45 \text{ GHz}, t)$ der Wärmestrahlung der Flammen eines TF6	84
3.46	Empfangene Leistung $p_R(34.45 \text{ GHz}, t)$ der Flammen eines TF6 außerhalb des Brandorts (ohne Reflektionen)	84
3.47	Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Fläche des Testfeuers TF7	85
3.48	Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF7 der Messbereiche zwischen 35.35 – 35.75 GHz	86
3.49	Empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF7 für die Messbereiche 36.45 GHz, 36.55 GHz und 36.65 GHz	87
3.50	Empfangene Leistung $p_R(32.45 \text{ GHz}, t)$ eines TF7	88
3.51	Empfangene Leistung $p_R(31.05 \text{ GHz}, t)$ der Flammen eines TF7	89
3.52	Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Fläche der Testfeuer TF7 (links) und TF2 (rechts)	92
3.53	Betrag S_{11} des Streuparameters der zweiten Antenne des Frequenzbereiches 18 – 26 GHz	95
3.54	Startleistung $p_M(f_c, t_0)$ und Maximalleistung $p_M(f_c, t_m)$ eines TF1	96
3.55	Empfangene Leistung $p_R(20.95 \text{ GHz}, t)$ eines TF6	97
3.56	Startleistung $p_M(f_c, t_0)$ und Maximalleistung $p_M(f_c, t_m)$ eines TF1	98
3.57	Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF5 der Messbereiche zwischen 17.45 – 17.85 GHz	99
3.58	Gemessene Leistung $p_M(11.55 \text{ GHz}, t)$ des Absorbersversuches	101
3.59	Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ der Wärmestrahlung eines Absorbers mit unterschiedlicher Temperatur der Messbereiche zwischen 7.45 – 7.85 GHz	101
4.1	Schwelbrand auf einem Kohlenförderband	104

4.2	Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Braunkohleschicht	105
4.3	Empfangene Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ eines Braunkohleschwelbrandes auf dem nachgebildeten Förderband	106
4.4	Empfangene Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ eines Braunkohleschwelbrandes auf dem nachgebildeten Förderband (Vergrößerungen)	107
4.5	Empfangene Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ eines Braunkohleschwelbrandes auf dem nachgebauten Förderband mit unterschiedlichen Drehzahlen	108
4.6	Empfangene Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ eines Braunkohleschwelbrandes mit zwischenzeitlicher Abdeckung	110
4.7	Empfangene Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ des abgedeckten Braunkohleschwelbrandes über der Schichtdicke x	111
A.1	Rauschendes Zweitor	121
B.1	Zweitor zur Definition der Größen	123

Tabellenverzeichnis

1.1	Typische Emissionsgrade $w_{\varepsilon}(f, T)$	6
2.1	Temperaturauflösung ΔT_{O} und Leistungsauflösung Δp_{O} des Mess-Systems . . .	28
2.2	Fernfeldbedingung in allen Frequenzbereichen des Mess-Systems	31
3.1	Eigenschaften der Testbrände	42
3.2	Füllfaktoren $w_{\text{F}}(f)$ der Testfeuer in den verschiedenen Frequenzbereichen . . .	44
3.3	Datenblatt der Hornantenne des Frequenzbereiches 18 – 26 GHz	92
3.4	Füllfaktoren $w_{\text{F}}(f)$ der Testfeuer im Frequenzbereich 18 – 26 GHz	93
3.5	Datenblatt der zweiten Hornantenne des Frequenzbereiches 18 – 26 GHz	94
3.6	Füllfaktoren $w_{\text{F}}(f)$ der Testfeuer im Frequenzbereich 12 – 18 GHz	98

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter im Fachgebiet Nachrichtentechnische Systeme der Fakultät für Ingenieurwissenschaften an der Universität Duisburg-Essen.

Ich danke meinem langjährigen Betreuer Prof. Dr.-Ing. Thomas Kaiser für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Darüber hinaus gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Klaus Solbach, Leiter des Fachgebiets Hochfrequenztechnik, für die Übernahme des Korreferats, sowie dem gesamten Fachgebiet Hochfrequenztechnik für die Unterstützung dieser Arbeit. Insbesondere danke ich Herrn Rolf Küppers für seine Hilfe beim Aufbau des Mess-Systems.

Ferner danke ich allen Mitarbeiter(innen) des Fachgebiets Nachrichtentechnische Systeme, der Institutsleitung sowie der Leitung der Gruppe Brandentdeckung für die fachliche Unterstützung und den freundschaftlichen Umgang.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie für ihre Unterstützung während des Studiums und der Promotion.

Duisburg, im April 2006

Einleitung

In der automatischen Brandentdeckung werden heutzutage hauptsächlich Rauchmelder eingesetzt, die nach dem Streulichtprinzip arbeiten. Diese Melder basieren auf dem folgenden Prinzip: Licht – meist im Infrarotbereich – wird in ein Messvolumen, die Messkammer, ausgesandt. Im Falle eines Brandes gelangen entstehende Rauchpartikel in die Messkammer und streuen dort das einfallende Licht. Überschreitet die Intensität dieses Streulichts eine gewisse Schwelle, löst der Rauchmelder einen Alarm aus. Melder nach diesem Prinzip arbeiten zuverlässig und sind in der Herstellung sehr preiswert.

Sichtbares Licht ist eine besondere Form elektromagnetischer Strahlung mit Wellenlängen λ im Bereich von ca. 400 nm bis 750 nm. Der angrenzende Wellenlängenbereich von ungefähr $750 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1 \text{ mm}$ wird dem Infrarotlicht zugeordnet. Im Verlauf dieser Arbeit wird untersucht, ob elektromagnetische Strahlung mit anderen Wellenlängen λ zur Branddetektion genutzt werden kann. Dabei wird speziell der Bereich der Mikro- bzw. Millimeterwellen betrachtet, dessen Wellenlängen im Bereich $1 \text{ mm} \leq \lambda \leq 30 \text{ cm}$ variieren. Die Wellen dieses Bereiches werden häufig durch ihre Frequenz f charakterisiert, die zwischen 1 GHz und 300 GHz liegt.

Elektromagnetische Wellen dieses Frequenzbereiches, im Folgenden kurz Mikrowellen genannt, haben den Vorteil, dass sie eine geringere Dämpfung als elektromagnetische Wellen im Infrarotbereich erfahren, wenn sie in Materie eindringen bzw. Materie durchdringen. Daher könnte eine Detektion von Bränden durch Wände hindurch oder eine Lokalisierung eines Brandherdes innerhalb eines Müllbunkers möglich werden. Wie später gezeigt wird, weisen Mikrowellen allerdings den Nachteil auf, dass die Leistung der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich sehr viel geringer ist, als es im Infrarotbereich der Fall ist, wo bekanntlich der Hauptteil der Leistung der Wärmestrahlung emittiert wird.

Die Frage, ob eine Brandentdeckung anhand der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich

trotzdem möglich ist, wird im Folgenden anhand der abgestrahlten Leistung genormter Testbrände untersucht. Dazu werden die *physikalischen Grundlagen* zur Wärmestrahlung im ersten Kapitel dieser Arbeit dargestellt. Das zweite Kapitel befasst sich mit dem *Mess-System*, das zur Messung der Wärmestrahlung aufgebaut wurde und stellt dessen grundlegenden Eigenschaften dar. Innerhalb des dritten Kapitels werden die *Messergebnisse* von europaweit genormten Testbränden dargestellt und diskutiert. Zum Abschluss wird die automatische Branddetektion mithilfe des Prinzips der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich für ein *Anwendungsbeispiel* – die Überwachung eines Kohletransportbandes – betrachtet.

Kapitel 1

Physikalische Grundlagen

Die Idee, die hinter der Nutzung der Wärmestrahlung von Feuern zur Detektion von Bränden steht, ist sehr einfach. Jeder Körper emittiert aufgrund seiner physikalischen Temperatur T elektromagnetische Wellen. Die Leistung p dieser Wellen ist mit der Temperatur T und der strahlenden Oberfläche A des Körpers verknüpft. Je heißer der betrachtete Körper ist, desto größer ist die emittierte Leistung, wobei der genaue Zusammenhang zwischen Temperatur, Oberfläche und Leistung später erläutert wird. Eine Messung der Leistung p der emittierten Wellen erlaubt daher auf die Temperatur T des Körpers zurückzuschließen. Im Allgemeinen ist die Temperatur T_F von Feuern größer als die umgebende Raumtemperatur, und somit ist die emittierte Feuerleistung ein Maß, das zur Branddetektion eingesetzt werden kann.

Bild 1.1 stellt das beschriebene Szenario dar. Ein Feuer emittiert elektromagnetische Wellen mit der Leistung $p_F(f, T_F, A_F)$, die sowohl von der Feuertemperatur T_F und der strahlenden Feueroberfläche A_F als auch von der beobachteten Frequenz f der Wellen abhängt. Feuer sind dynamische Prozesse, d. h. die Temperatur T_F und die Oberfläche A_F hängen von der Zeit t ab. Die Zeitabhängigkeit von T_F und A_F wird aber aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht explizit angegeben. Die Verwendung des Kleinbuchstaben p für die Leistungen soll – wie in der Elektrotechnik üblich – die Änderung der Leistungen über der Zeit andeuten.

Ein Empfänger misst nun die Leistung $p_R(f, t)$ und entscheidet dann, ob eine Brandsituation vorliegt oder nicht. Die Zeitabhängigkeit der empfangenen Leistung $p_R(f, t)$ wird explizit angegeben um zu verdeutlichen, dass im Folgenden der Verlauf von $p_R(f, t)$ als Funktion von Zeit und Frequenz gemessen wird.

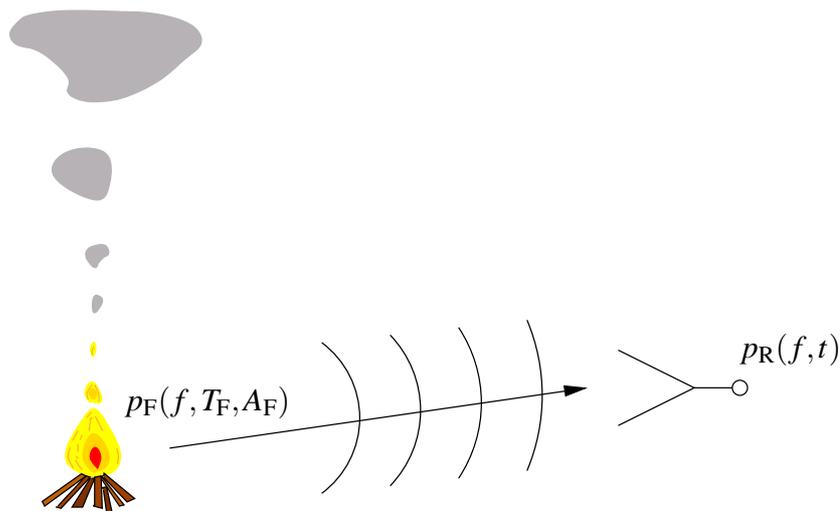


Bild 1.1: Modell zur Brandentdeckung durch Wärmestrahlung

Anwendungsbeispiele, die dieses einfache Konzept bereits im Infrarotbereich nutzen, sind u. a. Infrarot-Kameras oder Flammenmelder. Die Beschreibung eines Flammenmelders, der die spektralen Eigenschaften von Bränden ausnutzt, ist in [46] zu finden. Dieses Beispiel zeigt, dass spektrale Informationen der Wärmestrahlung nützlich sind, um eine Detektion von Bränden mit deutlich verbesserten Alarm- als auch Fehlalarmeigenschaften zu ermöglichen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll die Feuerleistung $p_F(f, T_F, A_F)$ für viele verschiedene Frequenzen f innerhalb des Mikrowellenbereiches zu messen.

Die physikalischen Phänomene, die die Grundlage für das vorgestellte Konzept bilden, werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Dazu zählt die *Wärmestrahlung* von Körpern, die *Wellenausbreitung im Freiraum*, die *Dämpfung von elektromagnetischen Wellen* durch *Aerosole* und die Dämpfung von elektromagnetischen Wellen durch *Materie*.

1.1 Wärmestrahlung

Die Beschreibung der Wärmestrahlung setzt eine konsequente Nomenklatur voraus. Da dieses Phänomen sowohl aus physikalischer als auch elektrotechnischer Sicht betrachtet werden kann, ergeben sich Konflikte in der Notation. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass die Begriffe und Abkürzungen in der Literatur uneinheitlich verwendet werden. Daher ist es notwendig die verwendeten Begriffe und Formelzeichen vorab zu definieren. Die DIN-Norm [8]

„Wärmeübertragung durch Strahlung“ dient dabei als Grundlage, obwohl die Norm das Folgende implizit für uninteressant erklärt. Da heißt es unter dem Stichwort Wärmestrahlung: „Aus wärmetechnischer Sicht interessiert der Wellenlängenbereich zwischen $0.1 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$.“ Deshalb und wegen des Konflikts zwischen Physik und Elektrotechnik erscheint es notwendig eine teilweise Abwandlung der genormten Formelzeichen durchzuführen.

Im Allgemeinen beschreibt der *Strahlungsfluss* bzw. die *Strahlleistung* p einen in Form von elektromagnetischen Wellen emittierten, übertragenen oder absorbierten Wärmestrom. Abweichend von der DIN-Norm wird das Formelzeichen p benutzt, um anzudeuten, dass es sich aus elektrotechnischer Sicht um eine zeitabhängige Leistung handelt.

Die *Strahlstärke* I beschreibt den auf den Raumwinkel Ω , in Richtung der Flächennormalen, bezogenen Wärmestrom, d. h.

$$I = \frac{\partial p}{\partial \Omega}.$$

Die Ableitung der Strahlstärke I nach der Frequenz f wird *spektrale Strahlstärke* S genannt, und es gilt:

$$S = \frac{\partial I}{\partial f} = \frac{\partial^2 p}{\partial \Omega \partial f}.$$

Diese grundlegenden Definitionen werden zur Beschreibung der Wärmestrahlung verwendet, deren Zusammenhänge aus der Literatur [13, 15, 22, 30, 37, 43, 51, 55, 58] bekannt sind. Danach ergibt sich die spektrale Strahlstärke $S_{\text{RB}}(f, T, A)$ der Wärmestrahlung eines *realen Körpers* aus der Ableitung der Strahlstärke $I_{\text{RB}}(f, T, A)$ des realen Körpers nach der Frequenz:

$$S_{\text{RB}}(f, T, A) = \frac{\partial}{\partial f} I_{\text{RB}}(f, T, A). \quad (1.1)$$

Die spektrale Strahlstärke $S_{\text{RB}}(f, T, A)$ des realen Körpers ist über den *Emissionsgrad* $w_{\varepsilon}(f, T)$ mit der spektralen Strahlstärke $S_{\text{BB}}(f, T, A)$ des *schwarzen Körpers* verknüpft, und es gilt:

$$S_{\text{RB}}(f, T, A) = w_{\varepsilon}(f, T) \cdot S_{\text{BB}}(f, T, A). \quad (1.2)$$

Der Emissionsgrad $w_{\varepsilon}(f, T)$ ist ein Parameter, der die Strahlungseigenschaften des betrachteten Körpers beschreibt. $w_{\varepsilon}(f, T)$ hängt vom atomaren Aufbau des Körpers ab. Der atomare Aufbau kann sich mit der Temperatur T des Körpers ändern und verursacht zudem eine Frequenzabhängigkeit des Emissionsgrades $w_{\varepsilon}(f, T)$, wobei für alle Frequenzen f gilt:

$$0 \leq w_{\varepsilon}(f, T) \leq 1 \quad \forall \quad f,$$

d. h. die Leistung $p_{\text{RB}}(f, T, A)$ der Wärmestrahlung eines realen Körpers ist immer kleiner oder gleich der Leistung $p_{\text{BB}}(f, T, A)$ der Wärmestrahlung des schwarzen Körpers. Der genaue Wert des Emissionsgrades $w_{\varepsilon}(f, T)$ lässt sich insbesondere für brennende Körper nur sehr schwer bestimmen, da sich während des Feuers der atomare Aufbau ändert. Folglich ist $w_{\varepsilon}(f, T)$ vom Verbrennungsprozess abhängig und ändert sich mit der Zeit. Aus Gründen der Überschaubarkeit wird diese Zeitabhängigkeit hier nicht explizit angegeben.

Beispielhaft sind in Tabelle 1.1 einige Werte des Emissionsgrades $w_{\varepsilon}(f, T)$ ausgewählter Materialien dargestellt. Diese Werte gelten für eine Temperatur von $T = 300\text{ K}$ und senkrecht einfallende Millimeterwellen ($30\text{ GHz} \leq f \leq 300\text{ GHz}$).

Material	$w_{\varepsilon}(f, 300\text{ K})$	Material	$w_{\varepsilon}(f, 300\text{ K})$
Sand	0.90	glattes Gestein	0.75
Asphalt	0.84	Beton	0.80
Wasser	0.45	dichte Vegetation	0.94

Tabelle 1.1: Typische Emissionsgrade $w_{\varepsilon}(f, 300\text{ K})$ für $30\text{ GHz} \leq f \leq 300\text{ GHz}$ (aus [1])

Der *schwarze Körper* oder *schwarze Strahler* ist ein theoretisches Modell für einen Körper, der bei allen Frequenzen f innere Energie abstrahlt. Die spektrale Strahlstärke $S_{\text{BB}}(f, T, A)$ der Wärmestrahlung des schwarzen Körpers ist durch das PLANCKsche Strahlungsgesetz gegeben:

$$S_{\text{BB}}(f, T, A) = \frac{\partial I_{\text{BB}}(f, T, A)}{\partial f} = \frac{2hA f^3}{c_0^2 \left[\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1 \right]}, \quad (1.3)$$

mit dem PLANCKschen Wirkungsquantum h , der BOLTZMANN Konstanten k , der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 , der Oberfläche A des schwarzen Körpers, der Temperatur T des schwarzen Körpers sowie der Frequenz f . Die spektrale Strahlstärke $S_{\text{BB}}(f, T, A)$ ist ein Maß für die Leistung $p_{\text{BB}}(f, T, A)$, die pro Raumwinkel Ω und pro Frequenz f von einem schwarzen Körper mit der Oberfläche A und der Temperatur T emittiert wird.

Bild 1.2 stellt die spektrale Strahlstärke $S_{\text{BB}}(f, T, A)$ eines schwarzen Körpers mit der Oberfläche $A = 1\text{ m}^2$ für unterschiedliche Temperaturen T dar. Die größte spektrale Strahlstärke $S_{\text{BB}}(f, T, A)$ wird im nahen Infrarot bzw. im Bereich des sichtbaren Lichts abgestrahlt. Mit steigender Temperatur T steigt auch die spektrale Strahlstärke $S_{\text{BB}}(f, T, A)$, und das Maximum von

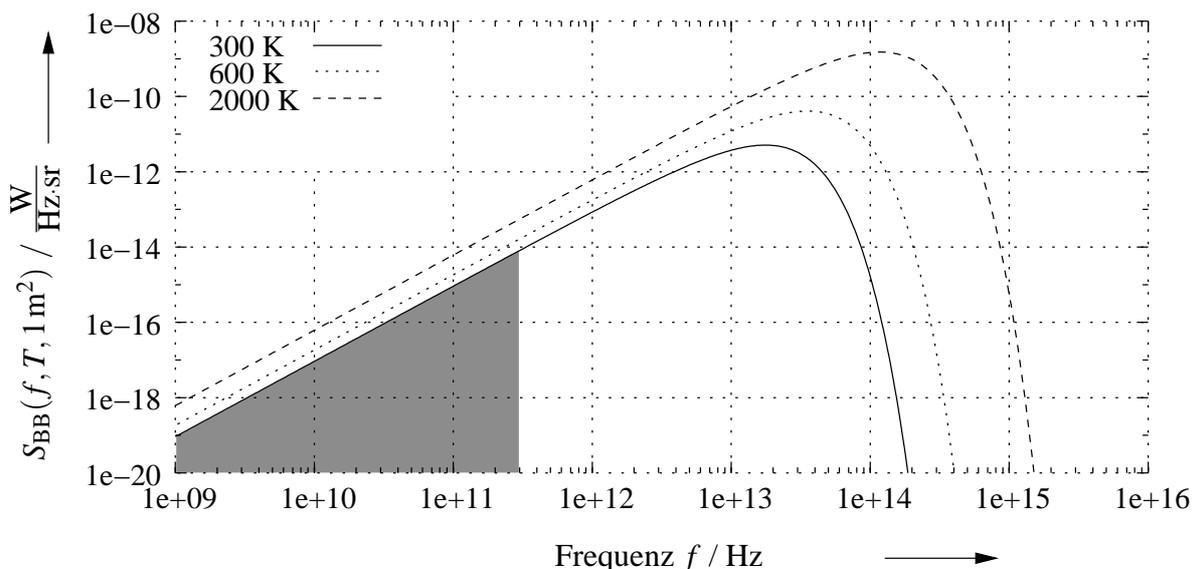


Bild 1.2: Spektrale Strahlstärke $S_{BB}(f, T, 1 \text{ m}^2)$ eines schwarzen Körpers

$S_{BB}(f, T, A)$ verschiebt sich zu höheren Frequenzen f hin. Dieser Effekt lässt sich in der Natur beobachten, wo beispielsweise heiße Metalle ihre Farbe von rotglühend nach weißglühend verändern, wenn sich ihre Temperatur T erhöht. Dieses Phänomen wird durch das WIENSche Verschiebungsgesetz beschrieben. Im Bereich von 1 GHz bis 300 GHz, der durch die schattierte Fläche markiert ist, ist die spektrale Strahlstärke $S_{BB}(f, T, A)$ deutlich geringer. Das PLANCKsche Strahlungsgesetz kann durch das RAYLEIGH-JEANS-Gesetz approximiert werden, falls die Bedingung $hf \ll kT$ erfüllt ist, und es lautet:

$$S_{RJ}(f, T, A) = \frac{\partial I_{RJ}(f, T, A)}{\partial f} = \frac{2AkT f^2}{c_0^2} \Rightarrow I_{RJ}(f, T, A) = \int \frac{2AkT f^2}{c_0^2} \partial f. \quad (1.4)$$

Das RAYLEIGH-JEANS-Gesetz wurde um 1895 von JEANS abgeleitet, bevor PLANCK sein Strahlungsgesetz vorstellte. Es führt zu der bekannten *Ultraviolett-Katastrophe*, da es eine sehr große spektrale Strahlstärke $S_{RJ}(f, T, A)$ im ultravioletten Bereich des elektromagnetischen Spektrums vorhersagt. Für Frequenzen f bis zu 300 GHz liefert es aber Ergebnisse mit einer Abweichung kleiner als 3 % zum PLANCKschen Strahlungsgesetz [51]. Zudem bietet das RAYLEIGH-JEANS-Gesetz die Möglichkeit einer geschlossenen Lösung durch Integration. Wird ein Frequenzband mit der Mittenfrequenz f_c und der Bandbreite Δf betrachtet, ergibt sich die folgende Strahlstärke $I_{RJ}(f_c, \Delta f, T, A)$ nach RAYLEIGH-JEANS-Approximation:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{RJ}}(f_c, \Delta f, T, A) &= I_{\text{RJ}}(f, T, A) \Big|_{f_c - \frac{\Delta f}{2}}^{f_c + \frac{\Delta f}{2}} \\
 &= \frac{2AkT}{3c_0^2} \left[3f_c^2 \Delta f + \frac{1}{4} \Delta f^3 \right] \stackrel{\Delta f \ll \sqrt{12} f_c}{\approx} \frac{2AkT}{c_0^2} f_c^2 \Delta f.
 \end{aligned}$$

Für einen schwarzen Körper mit der Oberfläche $A = 0.5 \text{ m}^2$ und der Temperatur $T = 1000 \text{ K}$ ergibt sich in einem Frequenzband mit der Mittenfrequenz $f_c = 11 \text{ GHz}$ und der Bandbreite $\Delta f = 100 \text{ MHz}$ eine Strahlstärke pro Einheitsraumwinkel von $I_{\text{RJ}}(f, T, A) = 1.86 \text{ nW/sr}$ bzw. -57.3 dBm/sr . Es ist technisch möglich, Leistungen in dieser Größenordnung zu detektieren.

Die Strahlstärke $I_{\text{RB}}(f, T, A)$ der Wärmestrahlung eines realen Körpers berechnet sich mit den Gleichungen (1.1) und (1.2) allgemein zu:

$$I_{\text{RB}}(f, T, A) = \int w_\varepsilon(f, T) S_{\text{BB}}(f, T, A) \partial f.$$

Mit der Approximation $S_{\text{BB}}(f, T, A) \approx S_{\text{RJ}}(f, T, A)$ und Gleichung (1.4) kann die Strahlstärke eines Feuers durch

$$I_{\text{F}}(f, T_{\text{F}}, A_{\text{F}}) = \int w_\varepsilon(f, T_{\text{F}}) \frac{2A_{\text{F}}kT_{\text{F}}}{c_0^2} f^2 \text{d}f = \frac{2A_{\text{F}}kT_{\text{F}}}{c_0^2} \int w_\varepsilon(f, T_{\text{F}}) f^2 \text{d}f \quad (1.5)$$

berechnet werden. Wird ein Frequenzband mit der Mittenfrequenz f_c und der Bandbreite Δf betrachtet und vorausgesetzt, dass der Emissionsgrad $w_\varepsilon(f, T_{\text{F}})$ sich innerhalb dieses Bandes nicht ändert, kann die Approximation

$$I_{\text{F}}(f_c, \Delta f, T_{\text{F}}, A_{\text{F}}) = I_{\text{F}}(f, T_{\text{F}}, A_{\text{F}}) \Big|_{f_c - \frac{\Delta f}{2}}^{f_c + \frac{\Delta f}{2}} \approx w_\varepsilon(f_c, T_{\text{F}}) \frac{2A_{\text{F}}kT_{\text{F}}}{c_0^2} f_c^2 \Delta f \quad (1.6)$$

verwendet werden. Die Strahlstärke $I_{\text{F}}(f_c, \Delta f, T_{\text{F}}, A_{\text{F}})$ innerhalb eines Frequenzbandes ist also proportional zum Quadrat f_c^2 der Bandmittenfrequenz und der Bandbreite Δf .

Die emittierte Leistung $p_{\text{F}}(f, T_{\text{F}}, A_{\text{F}})$ des Feuers, also die in den gesamten Raum abgestrahlte Leistung, ergibt sich unter der Voraussetzung omnidirektionaler Abstrahlung durch Multiplikation der Strahlstärke $I_{\text{F}}(f, T_{\text{F}}, A_{\text{F}})$ mit 4π .

Der Emissionsgrad $w_\varepsilon(f, T_{\text{F}})$ hängt für reale Feuer vom Brandmaterial und dem Verlauf des Verbrennungsprozesses ab und ist daher nicht bekannt. Aber aus quantenmechanischer Sicht lässt sich der schwarze Körper als Körper definieren, in dem alle *quantenmechanischen Energiezustände* erlaubt sind, und somit ergibt sich der Emissionsgrad $w_\varepsilon(f, T_{\text{F}})$ des schwarzen

Körpers für alle Frequenzen zu eins. Der Emissionsgrad $w_\varepsilon(f, T_F)$ eines realen Körpers beschreibt also die erlaubten quantenmechanischen Zustände innerhalb des realen Körpers.

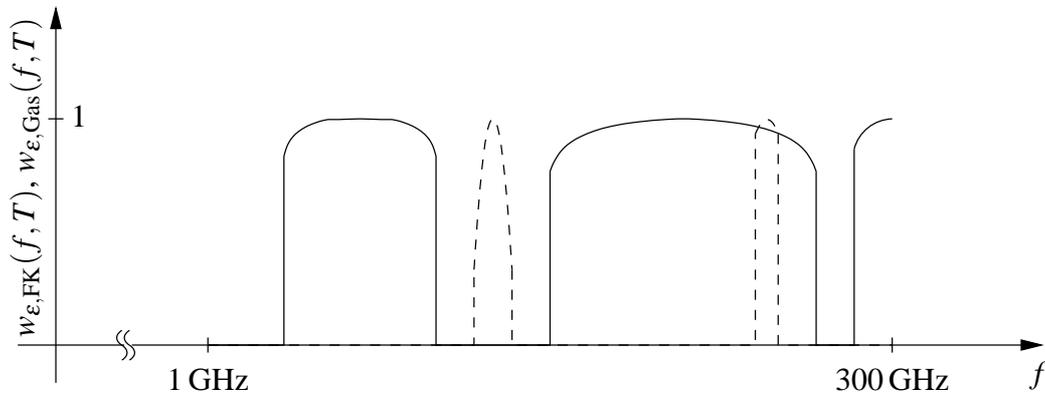


Bild 1.3: Qualitative Darstellung der Emissionsgrade von Feststoffen $w_{\varepsilon, \text{FK}}(f, T)$ (durchgezogen) und Gasen $w_{\varepsilon, \text{Gas}}(f, T)$ (gestrichelt)

In Feststoffen ist die Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen sehr groß, daher bilden die erlaubten Energiezustände breite, nahezu *kontinuierliche Frequenzbänder* in denen die Festkörper Wärmeenergie abstrahlen. Bei Flüssigkeiten und insbesondere bei Gasen ist die Wechselwirkung der Elementarteilchen deutlich geringer, so dass sich schmalere Bänder, bis hin zu einzelnen *diskreten Emissionsfrequenzen*, ergeben. Bild 1.3 stellt qualitativ die unterschiedlichen Emissionsgrade für Feststoffe $w_{\varepsilon, \text{FK}}(f, T)$ und Gase $w_{\varepsilon, \text{Gas}}(f, T)$ dar. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass brennende Feststoffe leichter detektierbar sind als brennende Gase, bei denen die genauen Emissionsfrequenzen bekannt sein müssen. Andersherum ist die spektrale Unterscheidungsmöglichkeit für Festkörper schlechter als für Gase.

Metalle weisen unter den Festkörpern eine Besonderheit auf. Sie emittieren keine Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich. Das heißt ihr atomarer Aufbau führt zu einem Emissionsgrad $w_\varepsilon(f, T)$ von null im Bereich der Mikrowellen. Dies gilt für Temperaturen T , die keine grundlegenden Veränderungen im atomaren Aufbau der Metalle bewirken. Beispielsweise emittiert eine Kochplatte mit einer Temperatur von $T = 600^\circ\text{C}$ keine Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich. Es wird nur die Wärmestrahlung aus der Umgebung der Kochplatte reflektiert und deren Leistung entspricht in den meisten Fällen der Raumtemperatur.

Die Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich wird aus Sicht der Quantenphysik durch die

Änderung des *Rotationszustandes eines Moleküls* hervorgerufen. Die unterschiedlichen Rotationszustände besitzen eine Energiedifferenz ΔE zwischen $1 \cdot 10^{-4}$ eV und $5 \cdot 10^{-2}$ eV bzw. zwischen $1.6 \cdot 10^{-23}$ Js und $8 \cdot 10^{-21}$ Js [51]. ΔE ist über die sog. BOHRsche Frequenzbedingung [13]

$$f = \frac{\Delta E}{h}$$

mit der Frequenz f verknüpft. Folglich ergeben sich Emissionsfrequenzen zwischen 24 GHz und 12 THz.

Mit den gemachten Bemerkungen, abgeleiteten Formeln bzw. Approximationen zur Berechnung der Strahlstärke $I_{RB}(f, T, A)$ der Wärmestrahlung von realen Körpern, insbesondere von Feuern $I_F(f, T_F, A_F)$, wird dieser Abschnitt beendet. Der nächste Abschnitt befasst sich mit der Wellenausbreitung elektromagnetischer Wellen, um die am Empfänger ankommende Leistung $p_R(f, t)$ zu bestimmen.

1.2 Wellenausbreitung im Freiraum

Dieser Abschnitt behandelt die theoretischen Grundlagen zur Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen, die beispielsweise durch die Wärmestrahlung von Körpern entstehen. Dazu wird zunächst nur die *Freiraumausbreitung* betrachtet, d. h. Materie zwischen Sender und Empfänger wird nicht berücksichtigt. Diese Materie streut oder dämpft die elektromagnetischen Wellen zusätzlich zu der hier beschriebenen Wellenausbreitung. Die Streuung bzw. Dämpfung von elektromagnetischen Wellen durch Materie ist Inhalt der Abschnitte 1.3 bzw. 1.4.

Bild 1.4 zeigt ein typisches Feuerszenario. In einem Raum brennt es, und ein Feuer emittiert elektromagnetische Wellen mit der spektralen Strahlstärke $S_F(f, T_F, A_F)$ pro Einheitsraumwinkel $\Omega = 1$ *omnidirektional* in den Raum. Eine Antenne, die durch ihre *effektive Antennenwirkfläche* A_e beschrieben wird, befindet sich im Abstand d zum Feuer. An der Antenne wird kontinuierlich die Strahlleistung $p_R(f, t)$ innerhalb verschiedener Frequenzbereiche gemessen.

Die zeit- und frequenzabhängige Strahlleistung $p_R(f, t)$, die von der Antenne empfangen wird, berechnet sich aus der spektralen Strahlstärke $S_F(f, T_F, A_F)$ des Feuers, und es gilt:

$$p_R(f, t) = \int_{\Omega_A} \int S_F(f, T_F, A_F) \partial\Omega \partial f,$$

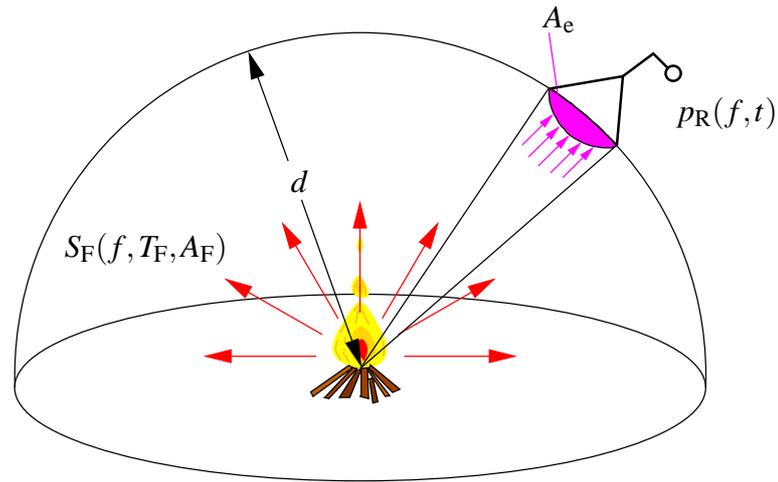


Bild 1.4: Feuerszenario mit Empfänger

mit dem Raumwinkel Ω_A , unter dem die Antenne die spektrale Strahlstärke des Feuers empfängt. Die Zeitabhängigkeit der empfangenen Leistung $p_R(f, t)$ kommt durch die veränderliche Temperatur T_F bzw. strahlende Oberfläche A_F des Feuers zustande. Mit Gleichung (1.4) und der Approximation $S_F(f, T_F, A_F) \approx w_\varepsilon(f, T_F) S_{RJ}(f, T_F, A_F)$ ergibt sich:

$$p_R(f, t) = \int \int_{\Omega_A} w_\varepsilon(f, T_F) \frac{2A_F k T_F f^2}{c_0^2} \partial\Omega \partial f.$$

In erster Näherung wird die spektrale Strahlstärke $S_F(f, T_F, A_F)$ über der Antennenfläche als konstant angenommen, daher vereinfacht sich die Berechnung der Empfangsleistung wie folgt:

$$p_R(f, t) = \int w_\varepsilon(f, T_F) \frac{2A_F k T_F f^2}{c_0^2} \Omega_A \partial f.$$

Der Raumwinkel Ω_A , unter dem die Antenne die spektrale Strahlstärke $S_F(f, T_F, A_F)$ empfängt, ergibt sich zu

$$\Omega_A = \frac{A_e}{d^2},$$

und damit gilt für die empfangene Strahlleistung:

$$p_R(f, t) = \int w_\varepsilon(f, T_F) \frac{2A_F k T_F f^2}{c_0^2} \frac{A_e}{d^2} \partial f.$$

Die effektive Antennenwirkfläche A_e oder auch Antennenapertur ist ein Antennenparameter. Für eine gegebene Antennen geometrie ist A_e von der Frequenz f abhängig, und es gilt [36], [59]:

$$A_e(f) = \frac{\lambda_0^2}{4\pi} G(f), \quad (1.7)$$

wobei die Wellenlänge λ_0 über die Lichtgeschwindigkeit c_0 mit der Frequenz f verknüpft ist: $c_0 = \lambda_0 \cdot f$. Der *Antennengewinn* $G(f)$ beschreibt die Richtwirkung der Antenne. Er bestimmt sich aus dem Verhältnis zwischen der aus der Hauptstrahlrichtung empfangenen Leistung zu der Leistung, die eine omnidirektionale Antenne aus derselben Richtung empfangen würde. Beim Bau vieler Antennen wird angestrebt, dass die Antenne innerhalb ihres Arbeitsbereiches einen nahezu konstanten Gewinn $G(f)$ aufweist, allerdings bleibt sowohl der Gewinn $G(f)$ als auch die effektiven Antennenwirkfläche $A_e(f)$ frequenzabhängig. Damit ergibt sich schließlich:

$$p_R(f, t) = \frac{2A_F k T_F}{c_0^2 d^2} \int A_e(f) w_\varepsilon(f, T_F) f^2 \partial f \quad \text{bzw.} \quad (1.8)$$

$$p_R(f, t) = \frac{A_F k T_F}{2\pi d^2} \int G(f) w_\varepsilon(f, T_F) \partial f. \quad (1.9)$$

Für ein Frequenzband mit der Mittenfrequenz f_c und der Bandbreite Δf lassen sich die Integrale geschlossen lösen. Mit den Annahmen, dass die effektive Antennenwirkfläche $A_e(f)$ und der Emissionsgrad $w_\varepsilon(f, T_F)$ innerhalb des Frequenzbandes konstant sind und die Bedingung $\Delta f \ll \sqrt{12} f_c$ erfüllt ist, ergibt sich die empfangene Leistung zu:

$$p_R(f_c, \Delta f, t) = p_R(f, t) \Big|_{f_c - \frac{\Delta f}{2}}^{f_c + \frac{\Delta f}{2}} = \frac{2A_F k T_F}{c_0^2 d^2} A_e(f_c) w_\varepsilon(f_c, T_F) f_c^2 \Delta f \quad \text{bzw.} \quad (1.10)$$

$$p_R(f_c, \Delta f, t) = \frac{A_F k T_F}{2\pi d^2} w_\varepsilon(f_c, T_F) G(f_c) \Delta f. \quad (1.11)$$

Nach Gleichung (1.10) hängt die empfangene Leistung $p_R(f_c, \Delta f, t)$ unter anderem von der effektiven Antennenwirkfläche $A_e(f_c)$, dem Quadrat f_c^2 der Mittenfrequenz und der Bandbreite Δf des Messbandes ab. Die Abhängigkeit der Leistung $p_R(f_c, \Delta f, t)$ vom Quadrat der Mittenfrequenz geht scheinbar verloren, wenn der Gewinn $G(f_c)$ zur Beschreibung der Antennen verwendet wird. Die zur Erreichung eines bestimmten Gewinns benötigte effektive Antennenwirkfläche ist aber antiproportional zum Quadrat der Mittenfrequenz (Gleichung (1.7)), so dass durch die Erhöhung von f_c^2 eine Reduktion von $A_e(f_c)$ und damit eine Reduktion der Antennengröße bei gleichem Gewinn möglich wird.

Die in einem Frequenzband empfangene Leistung $p_R(f_c, \Delta f, t)$ hängt laut Gleichung (1.11) unter anderem von der Bandbreite Δf des Messbandes und dem Antennengewinn $G(f_c)$ ab. Diese beiden Größen sind aber von besonderer Bedeutung, da sie die einzig veränderbaren Größen innerhalb eines Mess-Systems darstellen. Alle anderen Größen werden durch die gegebenen physikalischen Verhältnisse bestimmt und sind nicht durch das Mess-System beeinflusst.

bar. Um viel Leistung $p_R(f_c, \Delta f, t)$ zu empfangen, sollte das Mess-System mit großer Messbandbreite Δf arbeiten und die eingesetzten Antennen einen großen Gewinn $G(f_c)$ aufweisen. Die Vergrößerung der Messbandbreite Δf bewirkt allerdings eine Reduktion des spektralen Auflösungsvermögens des Mess-Systems.

Mit den in diesem Abschnitt angegebenen Formeln kann die empfangene Leistung $p_R(f, t)$ der Wärmestrahlung von Feuern aus der spektralen Strahlstärke $S_F(f, T_F, A_F)$ abgeschätzt werden. Der Effekt der Antennen auf $p_R(f, t)$ wurde dabei in erster Näherung in Betracht gezogen. Eine genauere Abschätzung der empfangenen Leistung $p_R(f, t)$ ist möglich, wenn das richtungsabhängige Verhalten der Antennen betrachtet wird. Dies setzt aber die Kenntnis der richtungsabhängigen empfangenen Leistung $p_{R,G}(f, t, \theta, \phi)$ an der Antenne voraus, wobei θ und ϕ den Elevations- bzw. Azimutwinkel innerhalb des Raumes angeben und folglich die Empfangsrichtung charakterisieren.

Bislang wurde die Dämpfung der Wärmestrahlung durch Materie zwischen Sender und Empfänger vernachlässigt. Beide Phänomene bewirken eine Reduktion der empfangenen Leistung $p_R(f, t)$. Daher befassen sich die beiden nächsten Abschnitte mit diesen Themen.

1.3 Dämpfung von elektromagnetischen Wellen durch Aerosole

Dieser Abschnitt behandelt die Dämpfung elektromagnetischer Wellen durch *Aerosole*. Aerosole sind Gemische aus *Gasen* und *Feststoffen*. Aerosole spielen in der automatischen Brandentdeckung eine wichtige Rolle, denn der bei den meisten Feuern entstehende Rauch ist ein Aerosol, dessen Partikel hauptsächlich aus Kohlenstoff und Wasser bestehen. Die Brandaerosole werden heutzutage vorwiegend zur Detektion von Feuern genutzt, wie das Beispiel der Streulichtrauchmelder aus der Einleitung zeigt, wobei die Rauchmelder eventuell durch Temperatur- und/oder Gassensoren ergänzt werden.

MIE veröffentlichte im Jahre 1908 eine Theorie zur Streuung von elektromagnetischen Wellen durch Partikel. Diese Theorie behandelt sowohl die Streuung als auch die Absorption durch die Aerosolpartikel. In Abhängigkeit des Verhältnisses aus mittlerem Partikeldurchmesser d_p der Aerosole zur Wellenlänge λ der elektromagnetischen Wellen lassen sich drei Bereiche un-

terscheiden. Ist der Partikeldurchmesser d_p viel kleiner als die Wellenlänge λ , liegt RAYLEIGH-Streuung vor. Die Dämpfung aufgrund von RAYLEIGH-Streuung ist sehr gering. Die blaue Farbe des Himmels und die rote Farbe der auf- bzw. untergehenden Sonne sind Beispiele für RAYLEIGH-Streuung.

Der eigentliche MIE-Bereich wird durch annähernd gleiche Größen von d_p und λ gekennzeichnet. Die Dämpfung im MIE-Bereich ist deutlich größer als im RAYLEIGH-Bereich. Beispiele für MIE-Streuung ist die Streuung von sichtbarem Licht durch Nebel und die vorher beschriebene Rauchdetektion durch Streulichtmelder.

Im optischen Bereich ist der Partikeldurchmesser d_p viel größer als die Wellenlänge λ . Hier können Verfahren der Strahlenoptik, wie das SNELLSche Brechungsgesetz, zur Beschreibung der Streuung eingesetzt werden.

Messungen der Partikelgrößenverteilung von Bränden (siehe [49]) ergeben, dass der Partikeldurchmesser d_p Werte im Intervall zwischen 4.2 nm und 7.5 μm annimmt. Der Mikrowellen- bzw. Millimeterwellenbereich reicht bis zu 300 GHz, was einer Wellenlänge λ von 1 mm entspricht. Daraus ergibt sich ein maximales Verhältnis von Partikeldurchmesser zu Wellenlänge von

$$\left(\frac{d_p}{\lambda}\right)_{\max} = 0.0075.$$

Aus der Literatur (z. B. [37], [26]) ist bekannt, dass für Verhältnisse von d_p/λ kleiner oder gleich 0.1 RAYLEIGH-Streuung angenommen werden kann. Daraus folgt, dass die RAYLEIGH-Streuung zur Beschreibung der Dämpfung der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich durch Brandaerosole gerechtfertigt ist. Dies hat zwei Konsequenzen. Erstens, RAYLEIGH-Streuung ist ein linearer Effekt, d. h. die Frequenz f der Wärmestrahlung ändert sich nicht, und zweitens, die resultierende Dämpfung ist sehr gering. Bei vom Militär durchgeführten Messungen [29] konnte keine Dämpfung durch typischen Rauch bei den Frequenzen 35 GHz, 94 GHz und 140 GHz nachgewiesen werden. Laut [28] liegt die Dämpfung durch Nebel für Frequenzen bis 100 GHz in der Größenordnung von 0.001 dB/m. Durch einen Vergleich mit dem Infrarotbereich, wo die Dämpfung durch Nebel unterhalb der Dämpfung durch Rauch liegt, ist zu erwarten, dass die Dämpfung der Mikrowellen durch Rauch kleiner als 0.001 dB/m ist. Deshalb kann der Einfluss des Rauches auf die empfangene Leistung $p_R(f, t)$ der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich vernachlässigt werden. Dies ist für die Messung der Wärmestrahlung von

Vorteil, allerdings wird dadurch die Rauchdetektion im Mikrowellenbereich deutlich schwieriger als im Infrarotbereich.

Besitzen die Aerosolkomponenten ein *permanentes* elektrisches oder magnetisches *Moment*, kann es außerdem zu *Resonanzeffekten* zwischen diesen und den einfallenden elektromagnetischen Wellen kommen, die eine größere Dämpfung der Wellen hervorrufen als die RAYLEIGH-Streuung. Aus der Fernerkundung [51] ist beispielsweise bekannt, dass Sauerstoff, der ein magnetisches Moment besitzt, in einem Bereich um 60 GHz mehrere Absorptionsfrequenzen und bei 118.8 GHz eine einzelne Absorptionsfrequenz besitzt. Wasser besitzt ein elektrisches Dipolmoment, das zu Resonanzen bei 22.2 GHz und 183.3 GHz führt. Die Resonanzeffekte beider Stoffe führen zu Dämpfungen in einer Größenordnung von ca. 0.01 dB/m. Kohlenmonoxid ist ein typisches Brandgas, das Resonanzfrequenzen bei 115.3 GHz und bei 230.5 GHz [41] besitzt. Resonanzfrequenzen von Kohlenwasserstoffen und anderen Substanzen, die bei Bränden entstehen, sind ebenfalls bekannt und tabelliert [38, 41]. Diese Resonanzen könnten mittels Dämpfungsmessungen an Rauch ebenfalls zur Detektion von Bränden eingesetzt werden. Die Untersuchung dieser Phänomene, die einer Rauchdetektion im Mikrowellenbereich entspricht, ist aber nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Der nächste Abschnitt beschreibt stattdessen die Dämpfung von elektromagnetischen Wellen durch Materie, die als Sonderfall der MIE-Theorie für sehr große Partikeldurchmesser aufgefasst werden kann.

1.4 Dämpfung von elektromagnetischen Wellen durch Materie

Zur Beschreibung der Dämpfung von elektromagnetischen Wellen durch Festkörper wird angenommen, dass sich zwischen dem Brand und der Empfangsantenne ein Festkörper (FK) der Dicke x befindet, der sowohl die spektrale Strahlstärke $S_F(f, T_F, A_F)$ des Feuers dämpft als auch aufgrund seiner eigenen Temperatur T_{FK} die spektrale Strahlstärke $S_{FK}(f, T_{FK}, A_{FK})$ besitzt. Bild 1.5 stellt dieses Szenario dar. Mit dem frequenzabhängigen *Absorptionskoeffizienten* $w_\alpha(f)$ ergibt sich die resultierende spektrale Strahlstärke $S(f, T_F, A_F, T_{FK}, A_{FK})$ dann zu [30]:

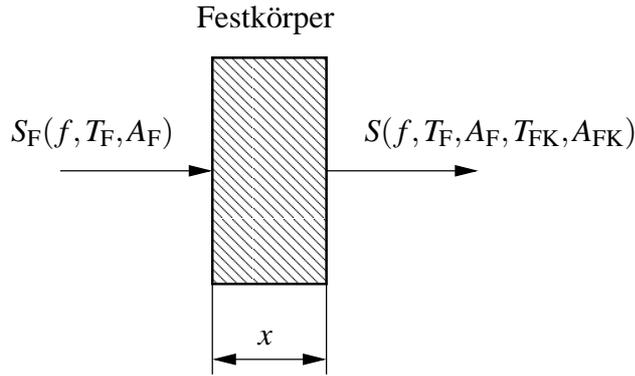


Bild 1.5: Dämpfung der spektralen Strahlstärke $S_F(f, T_F, A_F)$ eines Feuers durch einen Festkörper

$$\begin{aligned} S(f, T_F, A_F, T_{FK}, A_{FK}) &= S_F(f, T_F, A_F) \cdot \exp(-w_\alpha(f) \cdot x) + \\ &= + S_{FK}(f, T_{FK}, A_{FK}) \cdot [1 - \exp(-w_\alpha(f) \cdot x)]. \end{aligned}$$

Die empfangene Strahlleistung $p_R(f, t)$ ergibt sich durch Integration der spektralen Strahlstärke $S(f, T_F, A_F, T_{FK}, A_{FK})$ wie folgt:

$$p_R(f, t) = \int_{\Omega_A} S(f, T_F, A_F, T_{FK}, A_{FK}) \partial f \partial \Omega.$$

In einem Frequenzband mit der Mittenfrequenz f_c und der Bandbreite Δf ergibt sich die empfangene Leistung $p_R(f_c, \Delta f, t)$ unter den Annahmen, dass der Absorptionskoeffizient $w_\alpha(f)$, der Emissionsgrad $w_{\varepsilon, F}(f, T_F)$ des Feuers und der Emissionsgrad $w_{\varepsilon, FK}(f, T_{FK})$ des Festkörpers innerhalb des Frequenzbandes konstant sind, zu:

$$\begin{aligned} p_R(f_c, \Delta f, t) &= p_R(f, t) \Big|_{f=f_c - \frac{\Delta f}{2}}^{f=f_c + \frac{\Delta f}{2}} \\ &= p_{R, F}(f_c, \Delta f, t) \cdot \exp(-w_\alpha(f_c) \cdot x) + \\ &\quad + p_{R, FK}(f_c, \Delta f, t) \cdot [1 - \exp(-w_\alpha(f_c) \cdot x)]. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Die empfangene Leistung $p_R(f_c, \Delta f, t)$ setzt sich aus der gedämpften empfangenen Leistung $p_{R, F}(f_c, \Delta f, t)$ des Feuers und der empfangenen Leistung $p_{R, FK}(f_c, \Delta f, t)$ des Festkörpers zusammen. Die empfangenen Leistungen $p_{R, F}(f_c, \Delta f, t)$ und $p_{R, FK}(f_c, \Delta f, t)$ lassen sich über Gleichung 1.11 bestimmen, und es gilt:

$$p_{R, F}(f_c, \Delta f, t) = \frac{A_{FK} k T_F}{2 \pi d_F^2} w_{\varepsilon, F}(f_c, T_F) G(f_c) \Delta f \quad \text{bzw.}$$

$$p_{R,FK}(f_c, \Delta f, t) = \frac{A_{FK} k T_{FK}}{2 \pi d_{FK}^2} w_{\varepsilon,FK}(f_c, T_{FK}) G(f_c) \Delta f.$$

Die Dämpfung von $p_{R,F}(f_c, \Delta f, t)$ hängt von der Dicke x des Festkörpers und dessen Absorptionskoeffizienten $w_\alpha(f)$ ab. Es ergeben sich zwei Sonderfälle. Die empfangene Leistung $p_R(f_c, \Delta f, t)$ ist gleich der empfangenen Leistung $p_{R,F}(f_c, \Delta f, t)$ des Feuers, wenn das Produkt $w_\alpha(f) \cdot x$ gleich null ist. Der andere Grenzfall ergibt sich, wenn $w_\alpha(f) \cdot x$ gegen unendlich strebt. Dann wird die empfangene Leistung $p_{R,F}(f_c, \Delta f, t)$ des Feuers komplett vom Festkörper absorbiert, und folglich ist die resultierende empfangene Leistung gleich der empfangenen Leistung des Festkörpers, $p_R(f_c, \Delta f, t) = p_{R,FK}(f_c, \Delta f, t)$.

Prinzipiell ist eine Brandentdeckung durch Festkörper – wie z. B. Wände – aber möglich, wengleich auch durch die zusätzliche Dämpfung weniger erfolgversprechend. Der Absorptionskoeffizient $w_\alpha(f)$ ist in der Regel bei niedrigeren Frequenzen kleiner als bei hohen Frequenzen. Daher ist innerhalb des elektromagnetischen Spektrums der Mikrowellenbereich zur Branddetektion durch Hindernisse tendenziell besser geeignet als der Infrarotbereich oder als der Bereich des sichtbaren Lichts. Dies lässt sich anschaulich verdeutlichen. Im optischen Bereich ist es unmöglich durch ein dickes Papier oder gar eine Wand zu schauen. Folglich wird die Wärmestrahlung in diesem Bereich bereits durch sehr dünne Hindernisse fast vollständig absorbiert. Mobiltelefone funktionieren aber auch in fensterlosen Räumen, also durch Wände und Türen hindurch. Zur Übertragung der Telefongespräche werden Mikrowellen verwendet, deren Frequenz f je nach Mobilfunknetz bei etwa 900 MHz (D-Netz), etwa 1800 MHz (E-Netz) bzw. etwa 2000 MHz (UMTS) liegt. Dieses einfache Beispiel zeigt, dass eine automatische Brandentdeckung durch Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich möglicherweise auch durch Wände funktionieren kann.

Die Detektion von Bränden, die durch Hindernisse verdeckt sind, wird hier aber nicht weiter thematisiert. Stattdessen wird die generelle Eignung der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich zur Brandentdeckung geprüft. Dazu wird die emittierte Leistung von genormten Testfeuern gemessen. Das für diesen Zweck aufgebaute Mess-System wird im nächsten Kapitel beschrieben.

Kapitel 2

Mess-System

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau und die Funktionsweise des Mess-Systems, das zur Messung der emittierten Leistung $p_F(f, T_F, A_F)$ der Wärmestrahlung von Feuern eingesetzt wird. Ausgehend vom *Aufbau des Mess-Systems* wird die *Kalibration* erklärt, die *Temperaturauflösung* ΔT_O abgeschätzt und der *Messablauf* erläutert.

2.1 Aufbau des Mess-Systems

Bei dem eingesetzten Mess-System handelt es sich um ein *Superheterodyn-Empfänger*, d. h. die empfangenen Leistungen $p_R(f, t)$ innerhalb der verschiedenen Frequenzbereiche werden auf eine gemeinsame Zwischenfrequenz gemischt und dort weiter verarbeitet. Das Mess-System deckt den Frequenzbereich von 2 GHz bis 40 GHz ab. Ein Vorteil des Superheterodynprinzips besteht darin, dass der messbare Frequenzbereich modular erweiterbar ist.

Bild 2.1 stellt das Blockschaltbild des Mess-Systems dar. Auf der linken Seite sind die vier Antennen zu erkennen, die insgesamt den Bereich $2 \text{ GHz} \leq f \leq 40 \text{ GHz}$ bzw. $7.5 \text{ mm} \leq \lambda \leq 15 \text{ cm}$ abdecken. Im Frequenzbereich 2 – 12 GHz wird eine sog. *Double Ridge Horn Antenna* eingesetzt. Der Antennengewinn $G(f)$ dieser Antenne ist frequenzabhängig und schwankt zwischen 9 dB und 14 dB. Die Antennen für die Bereiche 12 – 18 GHz, 18 – 26 GHz und 26 – 40 GHz sind sog. *Standard Gain Horn Antennas*, also Standardgewinn-Hornantennen. Der Gewinn $G(f)$ dieser Antennen ist innerhalb ihres Arbeitsbereiches nahezu konstant und beträgt etwa 20 dB im Frequenzbereich 12 – 18 GHz, 15 dB im Frequenzbereich 18 – 26 GHz und 25 dB im Frequenzbereich 26 – 40 GHz. Die Antennen sind so eingebaut, dass sie ver-

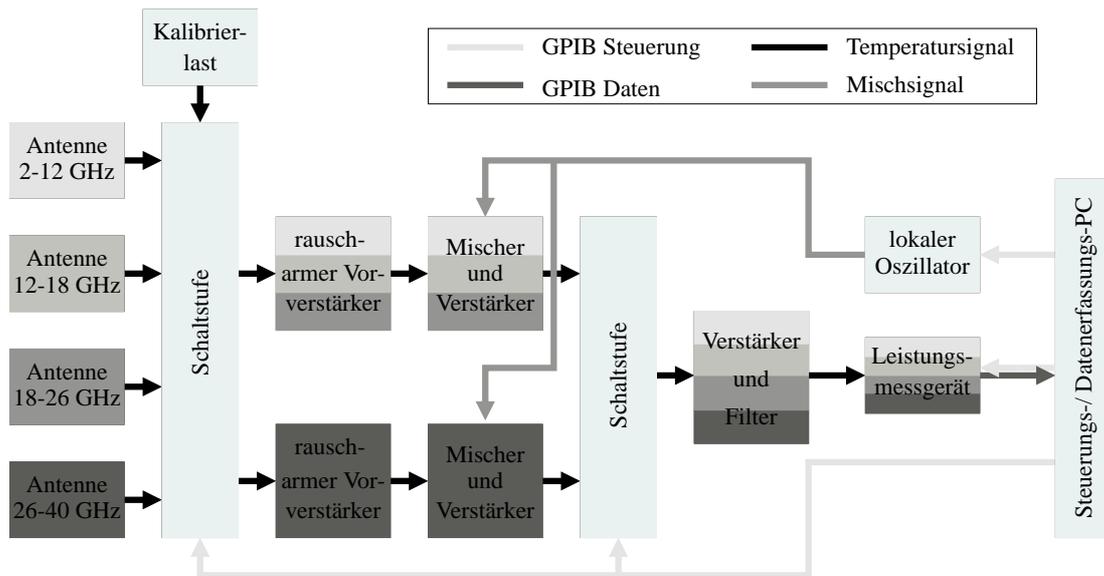


Bild 2.1: Blockdiagramm des Mess-Systems

tikal polarisierte elektromagnetische Wellen empfangen. Verbrennungsprozesse weisen einen zufälligen Charakter auf, daher sind die emittierten elektromagnetischen Wellen unpolarisiert [51]. Wird die Leistung unpolarisierter Wellen mit linear polarisierten Antennen gemessen, ergibt sich unabhängig von der Polarisationsrichtung (horizontal oder vertikal) der Antenne im Mittel eine Leistung $p_{R,F}(f,t)$, die nur der Hälfte der maximal empfangbaren Leistung des Feuers $p_{R,F_{\max}}(f,t)$ entspricht [30]. Die Orientierung der Antennen hat keinen Einfluss auf die gemessene Leistung.

Eine erste Schaltstufe folgt den Antennen. Diese schaltet das Signal von einer der Antennen oder der *Kalibrierlast* (engl.: *Hot Load*) auf die *rauscharmen Vorverstärker*. Die Kalibrierlast besteht aus einem Kupferblock in den $50\ \Omega$ Widerstände eingelassen sind. Sie wird auf eine Temperatur von etwa $100\ ^\circ\text{C}$ geheizt und ermöglicht etwaige Verstärkungsschwankungen des Mess-Systems auszukalibrieren. Abschnitt 2.2 beschreibt die dazu notwendigen Schritte ausführlich.

Die rauscharmen Vorverstärker (engl.: *Low Noise Amplifier, LNA*) verstärken das anliegende Signal. Sie haben ein Verstärkungsmaß $G_{\text{dB,LNA}}$ von 30 dB und ein Rauschmaß $F_{\text{dB,LNA}}$ kleiner 3 dB im gesamten Frequenzbereich. Die Vorverstärker sind entscheidend für die Temperaturauflösung ΔT_0 des gesamten Mess-Systems, die in Abschnitt 2.3 abgeschätzt wird.

Anschließend werden die Signale mit *Mischern* in die *Zwischenfrequenzlage* gemischt. Da-

zu werden Einseitenbandmischer verwendet, um Störungen zu unterdrücken, die durch Signalanteile bei der Spiegelfrequenz entstehen. Ein *lokaler Oszillator* erzeugt dazu ein Trägerfrequenzsignal, das ebenfalls an die Mischer geschaltet wird. Der lokale Oszillator muss folglich Trägerfrequenzsignale im Frequenzbereich zwischen 2 GHz und 40 GHz erzeugen.

In der Zwischenfrequenzlage, bei $f_{IF} = 150\text{ MHz}$, werden die Signale um 30 dB verstärkt. Eine zweite Schaltstufe schaltet das Mess-Signal auf einen weiteren *Verstärker*, der ebenfalls eine Verstärkung des Signals um 30 dB bewirkt. Um eine *definierte Messbandbreite* Δf zu gewährleisten, wird das Signal anschließend gefiltert. Ein BUTTERWORTH-Bandpass 5. Ordnung mit einer Bandbreite von $\Delta f = 100\text{ MHz}$ wird dazu verwendet. Schließlich misst ein in Laboren gebräuchliches *Leistungsmessgerät* die gemessene Leistung $p_M(f, t)$ dieses Signals. Bei den durchgeführten Feuermessungen hatte die Leistung $p_M(f, t)$ einen Wert von ca. 1 mW bzw. 0 dBm. Damit ergab sich eine Leistung von ca. $1\ \mu\text{W}$ (-30 dBm) vor dem letzten Verstärker, eine Leistung von ca. 1 nW (-60 dBm) vor den Mischern und eine Leistung von ca. 1 pW (-90 dBm) vor den rauscharmen Vorverstärkern.

Ein *Steuerungs- und Datenerfassungs-PC* ist ebenso Bestandteil des Mess-Systems. Dieser steuert die Schaltstufen, den lokalen Oszillator und das Leistungsmessgerät mittels *GPIB* (engl.: *General Purpose Interface Bus*). Dieser Bus ist aus dem *HPIB* (engl.: *Hewlett Packard Interface Bus*) abgeleitet und von der IEEE (engl.: *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*) als Standard 488.2 genormt. Dieser Bus wurde zur Steuerung von Messgeräten entworfen. Er ermöglicht die Einstellung und das Auslesen der Daten des Leistungsmessgeräts. Die ausgelesenen Daten liegen bereits in digitaler Form vor und werden auf dem PC zur weiteren Verarbeitung bzw. Auswertung gespeichert.

Den realen Aufbau des Mess-Systems zeigen die Fotos von Bild 2.2. Auf dem linken Foto ist das gesamte System abgebildet. Das Leistungsmessgerät und der lokale Oszillator befinden sich im hinteren Teil des Aufbaus. Der lokale Oszillator, der den meisten Raum innerhalb des Systems einnimmt, befindet sich auf der linken Seite. Im vorderen Teil befinden sich die Antennen, Schalter, Mischer und Verstärker. Dieser Teil ist auf dem rechten Foto vergrößert abgebildet. Das System ist 1.30 m tief, 70 cm breit und 30 cm hoch. Es hat ein *Metallgehäuse* – dessen Deckel auf den Fotos nicht abgebildet ist – um die Geräte und Bauteile vor Schmutz zu schützen. Zu diesem Zweck wird zudem mittels Druckluft ein *Überdruck* innerhalb des Systems erzeugt.

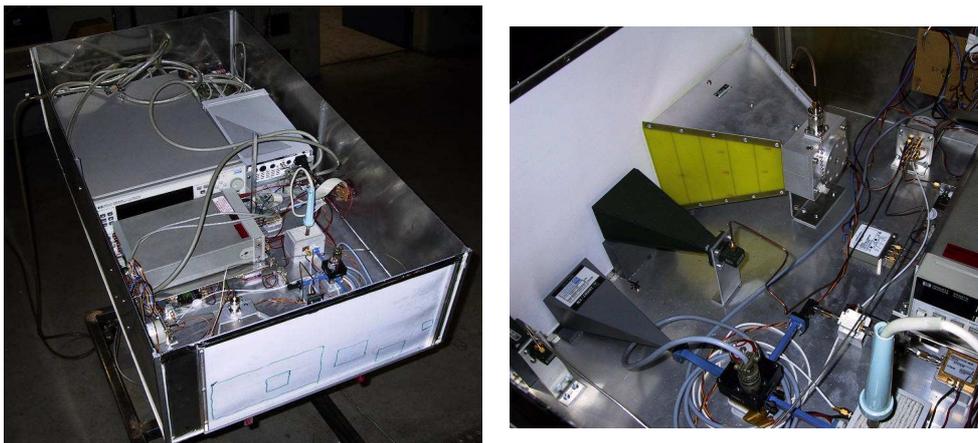


Bild 2.2: Mess-System

Das Metallgehäuse reflektiert die zu messende Wärmestrahlung, deshalb ist vor den Antennen ein Bereich ausgespart, der mit einer 1 mm dünnen *Teflonplatte* abgedeckt ist. Die Teflonplatte dämpft die empfangene Leistung $p_{R,F}(f,t)$ des Feuers im genutzten Frequenzintervall kaum, sodass die Wärmestrahlung durch die Teflonplatte hindurch gemessen werden kann. Die resultierende Dämpfung ergibt sich aus dem Szenario, das in Abschnitt 1.4 beschrieben wurde. Laut [40] ist der Absorptionskoeffizient $w_\alpha(f)$ für Teflon unterhalb von 500 GHz kleiner als 0.1 cm^{-1} . Damit ergibt sich die empfangene Leistung $p_R(f,t)$ zu:

$$\begin{aligned} p_R(f,t) &= p_{R,F}(f,t) \cdot \exp(-w_\alpha(f) \cdot x) + p_{R,FK}(f,t) \cdot [1 - \exp(-w_\alpha(f) \cdot x)] \\ &= p_{R,F}(f,t) \cdot 0.99 + p_{R,FK}(f,t) \cdot 0.01 \approx p_{R,F}(f,t). \end{aligned}$$

Das Mess-System ist auf ein rollbares *Gestell* montiert, das außerdem die Höhen- und Neigungswinkelverstellung des Mess-Systems erlaubt.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die wichtigsten technischen Details des Mess-Systems, dazu zählt die notwendige Kalibration und die Temperaturauflösung ΔT_O des Mess-Systems. Die Darstellung des Messablaufs schließt dieses Kapitels ab.

2.2 Kalibration

Dieser Abschnitt beschreibt die Kalibration des Mess-Systems. Die Kalibration des Mess-Systems ist notwendig um etwaige *Schwankungen der Gesamtverstärkung* $G_{MS}(f)$ des Sys-

tems kompensieren zu können.

Zu diesem Zweck wird die bekannte Leistung $p_{\text{KL}}(f, t)$ der Kalibrierlast zwischenzeitlich an den Eingang des Mess-Systems geschaltet. $p_{\text{KL}}(f, t)$ entspricht der *thermischen Rauschleistung* eines Widerstandes mit bekannter Temperatur T_{KL} . Die Kalibrierlast besteht aus zwei Abschlusswiderständen, einer für den Frequenzbereich 2 – 26 GHz und der andere für den Bereich 26 – 40 GHz. Beide Widerstände sind in ein Kupferblock eingelassen, der durch einen LötKolben geheizt wird. Die Regelung des LötKolbens regelt so auch die Temperatur des Kupferblocks. Um die Schwankungen der Temperatur des Kupferblocks im aufgeheizten Zustand zu reduzieren, wurde ein Kupferblock mit großer Masse, verglichen mit der Masse der Widerstände, verwendet. Daher ergibt sich eine Aufheizdauer von ca. 2 Stunden.

Bild 2.3 stellt die Temperatur T_{KL} der Kalibrierlast während der Aufheizphase dar. Die Temperaturkurve gleicht der Sprungantwort eines linearen Systems 1. Ordnung.

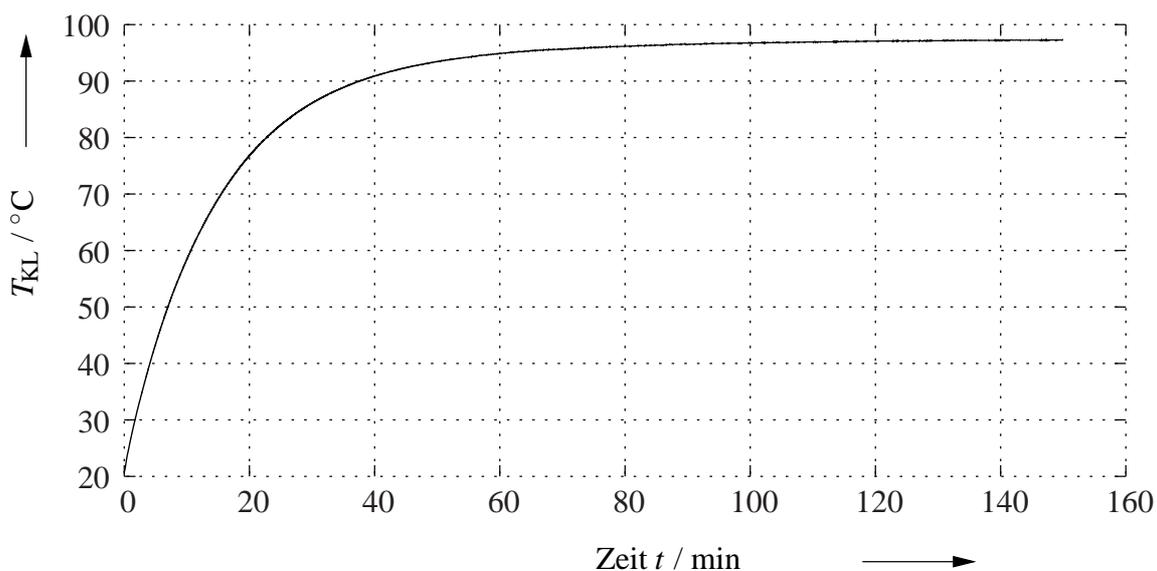


Bild 2.3: Temperatur T_{KL} der Kalibrierlast während der Aufheizphase

Nach ca. 90 Minuten schwankt die Temperatur T_{KL} innerhalb von 20 Minuten um 0.5°C . Nach 120 Minuten beträgt die Schwankung innerhalb des gleichen Zeitraums nur noch 0.2°C .

Die Leistung $p_{\text{KL}}(f, t)$, die von der Kalibrierlast emittiert wird, kann folgendermaßen bestimmt werden.

Bei der Kalibrierlast handelt es sich um einen rauschenden Widerstand R_{R} am Ende einer

verlustlos angenommenen Leitung, die den reellen Wellenwiderstand R_L besitzt. Der rauschende Widerstand R_R wird durch eine Rauschspannungsquelle $u_R(t)$ und einen nichtrauschenden Widerstand $R = R_R$ gleichen Werts modelliert. An der Leitung liegt die verfügbare Spannung $u_{KL}(t)$ der Kalibrierlast an. Bild 2.4 zeigt den Aufbau der Kalibrierlast sowie das Rauschersatzschaltbild.

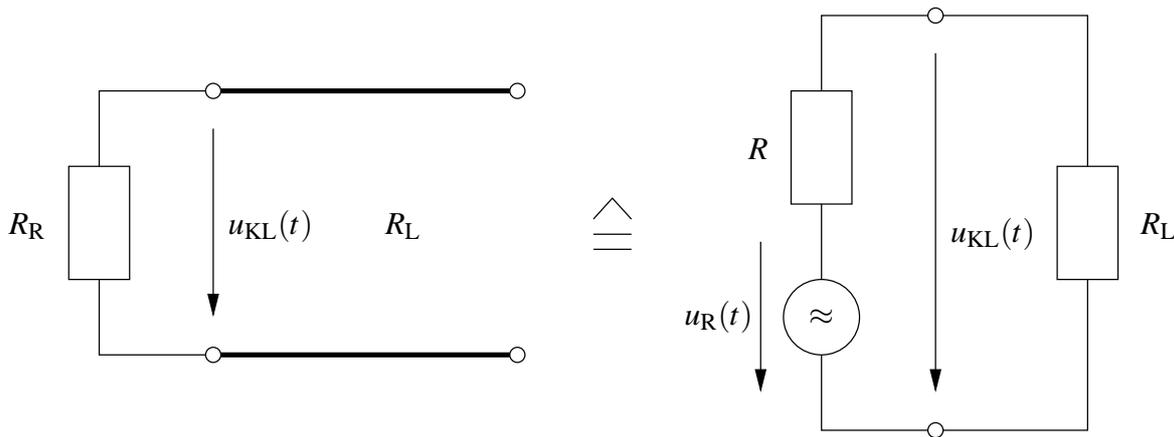


Bild 2.4: Aufbau (links) und Rauschersatzschaltbild (rechts) der Kalibrierlast

Die Leistungsdichte $S_{u_R u_R}(f)$ der Rauschspannungsquelle ist für Frequenzen $f < 1$ THz nahezu konstant und kann durch [34]:

$$S_{u_R u_R}(f) \approx 2 R k T_{KL}$$

beschrieben werden. Der quadratische Mittelwert der Rauschspannung $m_{u_R}^{(2)}$ für ein Frequenzband mit der Bandbreite Δf , der ein Maß für die Rauschleistung des Widerstandes innerhalb des Frequenzbandes ist, ergibt sich zu:

$$m_{u_R}^{(2)} = 4 R k T_{KL} \Delta f.$$

Aus der Spannungsteilerregel lässt sich daraus die verfügbare Rauschleistung $p_{KL}(f, t)$ der Kalibrierlast bestimmen. Es gilt:

$$p_{KL}(f, t) = 4 \frac{R_L R}{(R_L + R)^2} k T_{KL} \Delta f.$$

Der Abschlusswiderstand ist an die Leitung angepasst, daher gilt $R = R_L$, und folglich ergibt sich die verfügbare Leistung $p_{KL}(f, t)$ zu:

$$p_{KL}(f, t) = k T_{KL} \Delta f. \quad (2.1)$$

Die Leistung $p_{\text{KL}}(f, t)$ der Kalibrierlast ist im Gegensatz zur Leistung der Wärmestrahlung eines realen Körpers $p_{\text{RB}}(f, T, A)$ nicht mehr von der Frequenz f abhängig, sondern nur noch von der beobachteten Bandbreite Δf sowie der Temperatur der Kalibrierlast.

Die verfügbare thermische Rauschleistung $p(f, t)$ eines allgemeinen Widerstandes ergibt sich entsprechend, und es gilt: $p(f, t) = k T \Delta f$. In der Radiometrie wird diese Gleichung zur Definition der *äquivalenten Temperatur* $T = \frac{p(f, t)}{k \Delta f}$ verwendet (siehe z.B. [30]). Die Beschreibung der empfangenen Leistung $p_{\text{R}}(f, t)$ eines beliebigen Körpers durch die äquivalente Temperatur hat den Vorteil, dass die äquivalente Temperatur im Gegensatz zu $p_{\text{R}}(f, t)$ unabhängig von der Bandbreite des Mess-Systems ist.

Laut [51] beschreibt Gleichung 2.1 ebenfalls den Zusammenhang zwischen der physikalischen Temperatur T_{BB} und der emittierten Leistung $p_{\text{BB}}(f, T_{\text{BB}}, A_{\text{BB}})$ eines schwarzen Körpers im Mikrowellenbereich. Dies ist aber nicht verwunderlich, da ein Abschlusswiderstand in der Hochfrequenztechnik so aufgebaut ist, dass er näherungsweise die gesamte einfallende Strahlung absorbiert, was wiederum der Definition des schwarzen Körpers entspricht. Unter Vernachlässigung des Emissionsgrades $w_{\varepsilon}(f, T)$ kann die äquivalente Temperatur auch zur Abschätzung der physikalischen Temperatur eines realen Körpers verwendet werden. Eine solche Abschätzung ist allerdings nur für die Leistung der Wärmestrahlung sinnvoll, denn die äquivalente Temperatur einer typischen Sendeleistung von Endgeräten des Mobilfunks (1 W bei einer Bandbreite von 200 kHz im D-Netz) liegt z. B. in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{17}$ K und ist damit als Abschätzung der physikalischen Temperatur der Mobilstation offensichtlich ungeeignet.

Wird die Kalibrierlast auf den Eingang der Empfängerstruktur geschaltet, führt das zu einer gemessenen Leistung $p_{\text{M, KL}}(f, t)$ von

$$p_{\text{M, KL}}(f, t) = G_{\text{MS}}(f) \cdot p_{\text{KL}}(f, t) = G_{\text{MS}}(f) \cdot k T_{\text{KL}} \Delta f,$$

mit der Gesamtverstärkung $G_{\text{MS}}(f)$ des Mess-Systems, der BOLTZMANN-Konstanten k und der Bandbreite Δf . Durch Messung der Temperatur T_{KL} der Kalibrierlast kann die Gesamtverstärkung $G_{\text{MS}}(f)$ des Mess-Systems bestimmt werden, und es gilt:

$$G_{\text{MS}}(f) = \frac{p_{\text{M, KL}}(f, t)}{k T_{\text{KL}} \Delta f}, \quad (2.2)$$

wobei alle Größen auf der rechten Seite der Gleichung (2.2) bekannt sind.

Wird eine der Antennen an den Eingang des Mess-Systems geschaltet, ergibt sich die gemessene Leistung $p_M(f, t)$ zu

$$p_M(f, t) = G_{MS}(f) \cdot p_R(f, t). \quad (2.3)$$

Die empfangene Leistung $p_R(f, t)$ kann mit Gleichung (2.2) aus der gemessenen Leistung $p_M(f, t)$ berechnet werden, und es gilt:

$$p_R(f, t) = \frac{p_M(f, t)}{G_{MS}(f)} = \frac{p_M(f, t) k T_{KL} \Delta f}{p_{M, KL}(f, t)}. \quad (2.4)$$

Die Gesamtverstärkung $G_{MS}(f)$ hängt von der Frequenz f ab, da beispielsweise die Vorverstärker frequenzabhängig sind. Die Kalibrierung muss daher für jedes einzelne Messband der Bandbreite $\Delta f = 100 \text{ MHz}$ durchgeführt werden.

Diese Methode ermöglicht die Kalibration des Mess-Systems ab der ersten Schaltstufe. Die Dauer zwischen zwei aufeinander folgenden Kalibriermessungen wird durch die Güte der verwendeten Verstärker bestimmt. Je stabiler die Verstärkung ist, desto länger kann der Zeitraum zwischen zwei Kalibrierungen gewählt werden. Der Abstand zwischen zwei Kalibrierungen des Mess-Systems ist für jede neue Messungen einstellbar, um so Veränderungen im zeitlichen Verhalten (Alterung) der Verstärker ausgleichen zu können.

Eine Kalibrierung der Leitungen vor der ersten Schaltstufe und der Antennen ist durch diese Methode nicht möglich, deshalb kann nur das relative zeitliche Verhalten der Leistungen $p_M(f, t)$ bzw. $p_R(f, t)$ zur Auswertung herangezogen werden.

Der Absolutwert der korrigierten empfangenen Leistung $p_R(f, t)$ entspricht jedoch nicht exakt der empfangenen Leistung $p_{R, F}(f, T_F)$ der Wärmestrahlung eines Feuers, die aufgrund der Temperatur T_F emittiert wird. Anders formuliert bedeutet dies, dass durch das Mess-System ein unbekannter Versatz auf die Messwerte addiert wird. Eine Kalibrierung der Leitungen vor der ersten Schaltstufe und der Kalibrierlast selbst wäre nötig, um den Absolutwert der Leistung hinter der Antenne bestimmen zu können. Dieser entspräche aber trotzdem nur dem über den Antennenöffnungswinkel gemittelten Absolutwert der empfangenen Leistung $p_R(f, t)$.

Der nächste Abschnitt beschäftigt sich mit der Genauigkeit der durchgeführten Messungen, indem das Auflösungsvermögen des Mess-Systems betrachtet wird.

2.3 Temperature Auflösung

In diesem Abschnitt wird die Temperature Auflösung ΔT_O des Mess-Systems abgeschätzt. Laut [51] ist es zulässig die Temperature Auflösung eines auf dem Superheterodynprinzip beruhenden Radiometers durch die sog. *Radiometerformel* nach RICE [45, 51]

$$\Delta T_O = \frac{T_O + T_{MS}}{\sqrt{\Delta f \tau}} \quad (2.5)$$

zu bestimmen. Darin ist T_O die äquivalente Temperature des Messobjekts, T_{MS} die äquivalente Rauschtemperature des Mess-Systems, Δf die Messbandbreite und τ die Messdauer für einen Messwert. τ kann innerhalb des Mess-Systems gewählt werden. Dabei ist aber zu beachten, dass die Messdauer τ nicht zu groß werden darf, weil die Temperaturentwicklung eines Entstehungsbrandes verfolgt werden soll.

Die äquivalente Temperature T_O des Messobjekts ist eine Beschreibungsform der Leistung p_O der Wärmestrahlung des Messobjekts. Die äquivalente Temperature ist laut Definition die physikalische Temperature T eines *Widerstandes*, dessen emittierte Leistung p der bekannten Signalleistung – hier also p_O – entspricht. Die äquivalente Temperature T_O kann daher mit Gleichung (2.1) aus der Signalleistung p_O berechnet werden. Bei T_O handelt es sich also nicht um die physikalische Temperature des Messobjekts. Folglich ist die Temperature Auflösung ΔT_O streng genommen kein Temperature Auflösungsvermögen, sondern ist proportional zum Leistungsauflösungsvermögen. Mit Gleichung (2.1) ergibt sich die *Leistungsauflösung* Δp_O zu

$$\Delta p_O = k \Delta f \Delta T_O = k \Delta f \frac{T_O + T_{MS}}{\sqrt{\Delta f \tau}} = \frac{p_O + p_{MS}}{\sqrt{\Delta f \tau}},$$

mit der Strahlleistung p_O des Messobjekts und der Rauschleistung p_{MS} des Mess-Systems.

Die äquivalente Rauschtemperature T_{MS} des Mess-Systems ist über [31]:

$$T_{MS} = \left(10^{(0.1 \cdot F_{MS,dB})} - 1 \right) \cdot 290 \text{ K.}$$

mit dem Rauschmaß $F_{MS,dB}$ des Mess-Systems verknüpft. Die Definition der Rauschzahl F und deren Zusammenhang mit dem Rauschmaß F_{dB} ist im Anhang A angegeben. Die Rauschzahl F in Reihe geschalteter Systeme kann über [34]

$$\begin{aligned} F &= F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 \cdot G_2 \cdot \dots \cdot G_n} \\ &= F_1 + \sum_{v=2}^n \frac{F_v - 1}{\prod_{\mu=1}^{v-1} G_\mu} \quad \text{mit} \quad F_v \geq 1, G_\mu > 0, \end{aligned} \quad (2.6)$$

bestimmt werden, wobei n die Anzahl der zusammengeschalteten Systeme ist. Anhand der Formel wird deutlich, dass die Rauschzahl F_1 des ersten Systems den größten Beitrag zur Rauschzahl F der Reihenschaltung beiträgt. Die Rauschzahlen F_v der nachfolgenden Systeme werden durch die Verstärkungsfaktoren G_μ der jeweils vorherigen Systeme dividiert. Die rauscharmen Vorverstärker sind die ersten Komponenten des Mess-Systems. Deshalb sollte die Rauschzahl F_{LNA} dieser Verstärker klein und deren Verstärkungsfaktor G_{LNA} groß sein, damit ein möglichst geringe Systemrauschzahl F_{MS} erzielt wird. Die verwendeten Vorverstärker haben ein Rauschmaß $F_{LNA,dB}$ kleiner als 3 dB und ein Verstärkungsmaß $G_{LNA,dB}$ von 30 dB, was einer Rauschzahl F_{LNA} von 2 bzw. einem Verstärkungsfaktor G_{LNA} von 1000 entspricht.

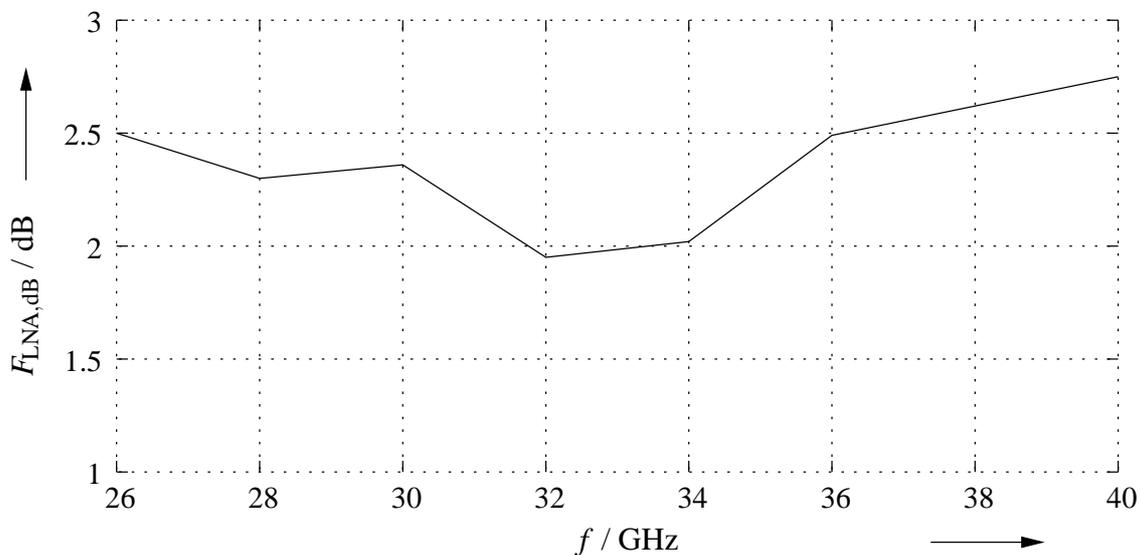


Bild 2.5: Rauschmaß $F_{LNA,dB}$ eines verwendeten Vorverstärkers

Bild 2.5 zeigt das Rauschmaß $F_{LNA,dB}$ eines der eingesetzten Vorverstärker über der Frequenz. Durch die Frequenzabhängigkeit des Rauschmaßes $F_{LNA,dB}$ ist auch die Temperaturauflösung ΔT_O des Mess-Systems frequenzabhängig. In erster Näherung wird diese Frequenzabhängigkeit vernachlässigt, indem der höchste Wert des Rauschmaßes $F_{LNA,dB} = 2.8$ dB verwendet wird. Außerdem wird der Einfluss der nachfolgenden Komponenten dadurch abgeschätzt, dass das Rauschmaß $F_{MS,dB}$ des Mess-Systems aufgerundet wird, da die Rauschzahlen F_v der nachfolgenden Komponenten durch den Verstärkungsfaktor G_{LNA} der Vorverstärker, der 1000 beträgt, dividiert werden. Dadurch ergibt sich das Rauschmaß $F_{MS,dB}$ des Mess-Systems zu $F_{MS,dB} \approx 3$ dB. Mit der Bandbreite $\Delta f = 100$ MHz und durch Wahl der Messdauer τ zu

25 ms, was der geringsten Messdauer τ des verwendeten Leistungsmessgeräts entspricht, kann die Temperaturlösung ΔT_O bzw. die Leistungslösung Δp_O in Abhängigkeit der Temperatur T_O des Messobjekts berechnet werden. Einige Werte der Temperaturlösung ΔT_O und der Leistungslösung Δp_O sind in Tabelle 2.1 aufgelistet.

T_O / K	300	600	1000	1500	2000
p_O / pW	0.4	0.8	1.4	2.1	2.8
$\Delta T_O / \text{K}$	0.4	0.6	0.8	1.1	1.4
$\Delta p_O / \text{aW}$	0.5	0.8	1.1	1.6	2.0

Tabelle 2.1: Temperaturlösung ΔT_O und Leistungslösung Δp_O des Mess-Systems

Diese Abschätzung liefert ΔT_O am Eingang der rauscharmen Vorverstärker. Um die Temperaturlösung ΔT_O des gesamten Mess-Systems zu bestimmen, müssen die Leitungen vor den Vorverstärkern und insbesondere die Antennen berücksichtigt werden. Der Einfluss der Leitungen kann berücksichtigt werden, wenn die Dämpfungsfaktoren α_i der Leitungen über der Frequenz f sowie deren Längen l_i und physikalischen Temperaturen T_{Li} bekannt sind. Der Einfluss einer Leitung kann dann nach [30] durch

$$T_A = T_{Li} \cdot (1 - e^{-\alpha_i l_i}) + T_E e^{-\alpha_i l_i}$$

bestimmt werden. Dabei ist T_A die äquivalente Temperatur am Ausgang der Leitung und T_E die äquivalente Temperatur am Eingang der Leitung. Die äquivalenten Temperaturen T_A und T_E können wieder mit Gleichung (2.1) aus den Signalleistungen p_A und p_E berechnet werden.

Der Einfluss der Antennen auf die Temperaturlösung ΔT_O ist sehr viel schwieriger bestimmbar, da jede Antenne ein richtungsabhängiges Verhalten aufweist. Die empfangene Leistung $p_R(f, t)$ ist eine *gewichtete Mittelung* der gesamten empfangenen Leistung $p_{R,G}(f, t, \theta, \phi)$ aus den unterschiedlichen Raumrichtungen. Um auf die emittierte Leistung $p_F(f, T_F, A_F)$ des Feuers zurückschließen zu können, muss dessen Position und Ausdehnung sowie das *normierte Antennenrichtdiagramm* $F_n(f, \theta, \phi)$ bekannt sein, welches das richtungsabhängige Verhalten der Antennen beschreibt und zudem von der Frequenz f abhängig ist. Üblicherweise werden Kugelkoordinaten verwendet um das richtungsabhängige Verhalten der Antennen zu beschreiben.

Die Hauptstrahlrichtung wird in positive z -Richtung gelegt. θ ist der Elevationswinkel und ϕ der Azimutwinkel. Damit ergibt sich die empfangene Leistung $p_R(f, t)$ zu [30, 51]:

$$p_R(f, t) = \frac{\iint_{4\pi} p_{R,G}(f, t, \theta, \phi) F_n(f, \theta, \phi) d\Omega}{\iint_{4\pi} F_n(f, \theta, \phi) d\Omega}. \quad (2.7)$$

Das Integral im Nenner lässt sich für die eingesetzten Hornantennen mit Hilfe der *Fernfeldbedingung* folgendermaßen approximieren [30, 51]:

$$\iint_{4\pi} F_n(f, \theta, \phi) d\Omega = \Omega_A(f) \approx \theta_{3\text{dB}}(f) \cdot \phi_{3\text{dB}}(f),$$

mit dem Antennenöffnungsraumwinkel $\Omega_A(f)$ und den *Halbwertsbreiten* (in Radiant) $\theta_{3\text{dB}}(f)$ bzw. $\phi_{3\text{dB}}(f)$. Die Halbwertsbreiten sind ein Maß für die Breite der Hauptkeule. Sie geben den Öffnungswinkel der Hauptkeule zwischen den Punkten, bei denen die Empfangsleistung um die Hälfte der Leistung der Hauptstrahlrichtung abgefallen ist, an.

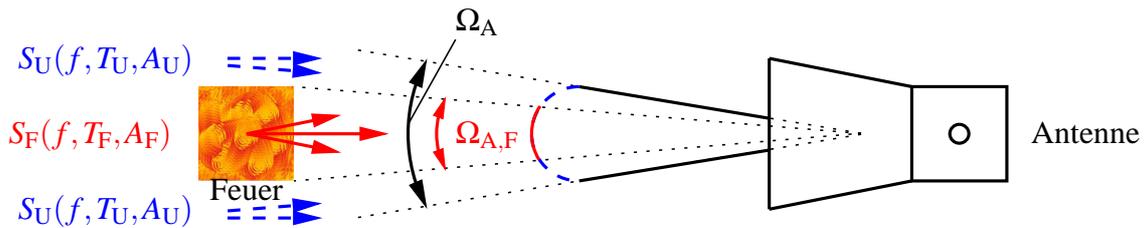


Bild 2.6: Strahlungsverteilung im Feuerfall

Die gesamte empfangene Leistung $p_{R,G}(f, t, \theta, \phi)$ aus den unterschiedlichen Raumrichtungen setzt sich in einer Brandsituation (siehe Bild 2.6) aus der empfangenen Leistung $p_{R,F}(f, t)$ des Feuers und aus der empfangenen Leistung $p_{R,U}(f, t)$ der Umgebung des Feuers zusammen, d. h. es gilt:

$$p_{R,G}(f, t, \theta, \phi) = \begin{cases} p_{R,F}(f, t), & (\theta, \phi) \in \Omega_{A,F}(f) \\ p_{R,U}(f, t), & (\theta, \phi) \in \Omega_{A,U}(f) = \Omega_A(f) - \Omega_{A,F}(f) \end{cases}.$$

Die empfangene Leistung $p_{R,F}(f, t)$ ergibt sich aus der Integration der spektralen Strahlstärke $S_F(f, T_F, A_F)$ des Feuers über den betrachteten Frequenzbereich und über dem Raumwinkel $\Omega_{A,F}(f)$, unter dem die Antenne die Feuerleistung empfängt:

$$p_{R,F}(f, t) = \int \int_{\Omega_{A,F}} S_F(f, T_F, A_F) \partial\Omega \partial f.$$

Ist $\Omega_{A,F}(f)$ kleiner als $\Omega_A(f)$, ergibt sich ein Raumwinkel $\Omega_{A,U}(f) = \Omega_A(f) - \Omega_{A,F}(f)$, über den die Antenne die Wärmestrahlung aus der Umgebung empfängt. Dieser Fall spielt in der automatischen Brandentdeckung eine große Rolle, weil die Brände kurz nach ihrer Entstehung entdeckt werden müssen, d. h. so lange die Brände noch klein sind. Die empfangene Leistung ergibt sich damit wie folgt:

$$\begin{aligned} p_R(f,t) &= \frac{1}{\Omega_A(f)} \cdot \left[\iint_{\Omega_{A,F}} p_{R,F}(f,t) E_n(f, \theta, \phi) d\Omega + \right. \\ &\quad \left. \iint_{\Omega_{A,U}} p_{R,U}(f,t) E_n(f, \theta, \phi) d\Omega \right] \\ &= \frac{1}{\Omega_A(f)} \cdot [p_{R,F}(f,t) \Omega_{A,F}(f) + p_{R,U}(f,t) \Omega_{A,U}(f)] \\ &= p_{R,F}(f,t) \frac{\Omega_{A,F}(f)}{\Omega_A(f)} + p_{R,U}(f,t) \cdot \left(1 - \frac{\Omega_{A,F}(f)}{\Omega_A(f)} \right). \end{aligned}$$

Der Quotient

$$w_F(f) = \frac{\Omega_{A,F}(f)}{\Omega_A(f)}$$

ist der sog. *Füllfaktor* der Antenne, und damit ergibt sich schließlich:

$$p_R(f,t) = p_{R,F}(f,t) w_F(f) + p_{R,U}(f,t) \cdot (1 - w_F(f)). \quad (2.8)$$

Der Raumwinkel $\Omega_{A,F}(f)$, unter dem die Antenne die Leistung $p_{R,F}(f,t)$ des Feuers empfängt, ist immer kleiner oder gleich dem gesamten Antennenöffnungswinkel $\Omega_A(f)$. Somit ist $w_F(f)$ immer kleiner oder gleich eins. Für den Fall, dass die Hauptkeule vollständig durch das Feuer ausgefüllt wird, gilt $w_F(f) = 1$.

Eine Änderung des Füllfaktors $w_F(f)$ verändert die Leistungsauflösung Δp_O des Mess-Systems natürlich nicht, aber eine Differenz $\Delta p_{R,F}(f, \Delta t) = p_{R,F}(f, t_2) - p_{R,F}(f, t_1)$ der empfangenen Feuerleistung führt auf eine um den Füllfaktor $w_F(f)$ verringerte Leistungsdifferenz $\Delta p_R(f, \Delta t) = p_R(f, t_2) - p_R(f, t_1)$ der empfangenen Leistung, wie die folgende Rechnung zeigt:

$$\begin{aligned} p_R(f, t_1) &= w_F(f) \cdot p_{R,F}(f, t_1) + p_{R,U}(f, t_1) \cdot (1 - w_F(f)) \\ p_R(f, t_2) &= w_F(f) \cdot p_{R,F}(f, t_2) + p_{R,U}(f, t_2) \cdot (1 - w_F(f)) \\ \Delta p_R(f, \Delta t) &= w_F(f) \cdot \Delta p_{R,F}(f, \Delta t) + \Delta p_{R,U}(f, \Delta t) \cdot (1 - w_F(f)). \end{aligned}$$

Unter der Voraussetzung, dass sich die empfangene Leistung $p_{R,U}(f,t)$ der Umgebung nicht ändert, ergibt sich:

$$\Delta p_R(f, \Delta t) = w_F(f) \cdot \Delta p_{R,F}(f, \Delta t). \tag{2.9}$$

Ist der Füllfaktor $w_F(f)$ gleich eins, gilt: $\Delta p_R(f, \Delta t) = \Delta p_{R,F}(f, \Delta t)$, d. h. die durch eine Veränderung des Feuers hervorgerufene Änderung $\Delta p_{R,F}(f, \Delta t)$ in der empfangenen Leistung des Feuers führt auf die gleiche Differenz $\Delta p_R(f, \Delta t)$ der empfangenen Leistung. In allen anderen Fällen ist die Differenz $\Delta p_R(f, \Delta t)$ der empfangenen Leistung kleiner als die Differenz der empfangenen Leistung $\Delta p_{R,F}(f, \Delta t)$ des Feuers.

Diese Ableitung gilt nur im Fernfeld der Antennen. Das Fernfeld ist dadurch bestimmt, dass die elektromagnetischen Wellen als *ebene Wellen* aufgefasst werden können. Laut [30, 57] ist die Fernfeldannahme gerechtfertigt, wenn der Abstand d der Empfangsantenne zu einer punktförmigen Quelle – hier der Abstand zum Feuer – die Fernfeldbedingung

$$d \geq \frac{2 \cdot D^2}{\lambda}$$

erfüllt. Dabei ist D die größere geometrische Abmessung der Antenne, hier also die Breite, und $d_{\min} = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda}$ ist der einzuhaltende Mindestabstand.

Frequenzbereich	2 – 12 GHz	12 – 18 GHz	18 – 26 GHz	26 – 40 GHz
Mindestabstand d_{\min}	4.92 m	0.67 m	0.43 m	1.31 m
Fernfeldbed.	bis			bis
erfüllt	2.4 GHz	Ja	Ja	30.6 GHz

Tabelle 2.2: Fernfeldbedingung in allen Frequenzbereichen des Mess-Systems

Tabelle 2.2 zeigt den Mindestabstand d_{\min} , der sich für die kleinste Wellenlänge λ innerhalb der verschiedenen Frequenzbereiche ergibt. Bei den durchgeführten Messungen (siehe Abschnitt 3.2) wurde ein Abstand von $d = 1$ m verwendet, d. h. die Fernfeldbedingung ist nur innerhalb der Frequenzbereiche 12 – 18 GHz und 18 – 26 GHz vollständig erfüllt. Im Frequenzbereich 26 – 40 GHz ist die Bedingung nur bis zu 30.6 GHz erfüllt und im Frequenzbereich 2 – 12 GHz nur bis zu 2.4 GHz.

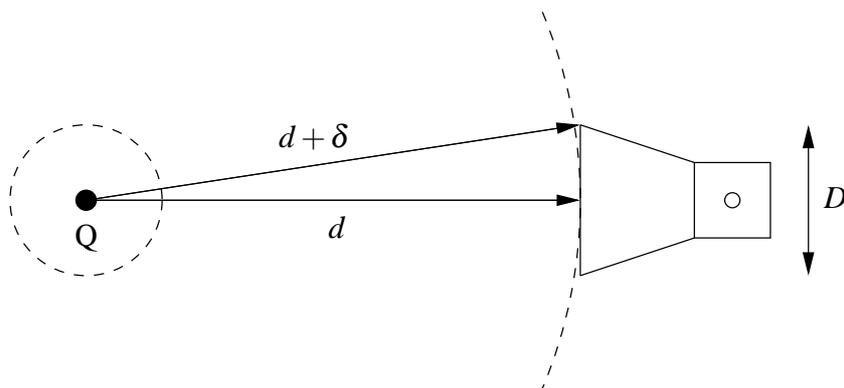


Bild 2.7: Fernfeldbedingung für eine punktförmige Quelle

Der *Phasenunterschied* $\Delta\varphi$ zwischen elektromagnetischen Wellen, der aufgrund der Entfernungsdifferenz δ zwischen einer punktförmigen Quelle Q und Antennenmitte bzw. der Quelle und Antennenrand (siehe Bild 2.7) entsteht, ist wie folgt gegeben [30]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta.$$

Für den Fall $d = d_{\min}$ ergibt sich ein Phasenunterschied von $\Delta\varphi = 22.5^\circ$ zwischen Antennenmitte und -rand. Der größte Phasenunterschied, der im Frequenzbereich 26 – 40 GHz entsteht, ist $\Delta\varphi = 29.4^\circ$. Dieser Unterschied ist nur geringfügig größer als bei Einhaltung der Fernfeldbedingung, daher wird im Folgenden die Fernfeldnäherung auch im Bereich zwischen 26 – 40 GHz verwendet. Im Bereich zwischen 2 – 12 GHz ergibt sich ein maximaler Phasenunterschied von 110.3° , d. h. die Betrachtung des Füllfaktors sind in diesem Frequenzbereich nicht zulässig.

2.4 Ablauf der Messungen

Dieser Abschnitt beschreibt den Ablauf der Messungen, wie sie mit dem aufgebauten Mess-System durchgeführt wurden. Bild 2.8 stellt den Ablauf der Messungen prinzipiell dar.

Zuerst werden alle N ausgewählten *Messbereiche* (MB) kalibriert. Ein MB ist ein Δf -breites Frequenzband aus dem gesamten Frequenzbereich 2 – 40 GHz. Dazu wird die Kalibrierlast an den Eingang des Mess-Systems geschaltet. Innerhalb jedes Messbereiches werden außerdem die Schaltstufen und der lokale Oszillator gesetzt (S_n). Danach werden L Messwerte (M_l) des Messbereiches zur Kalibration aufgenommen, die später gemittelt werden. Durch die Wahl

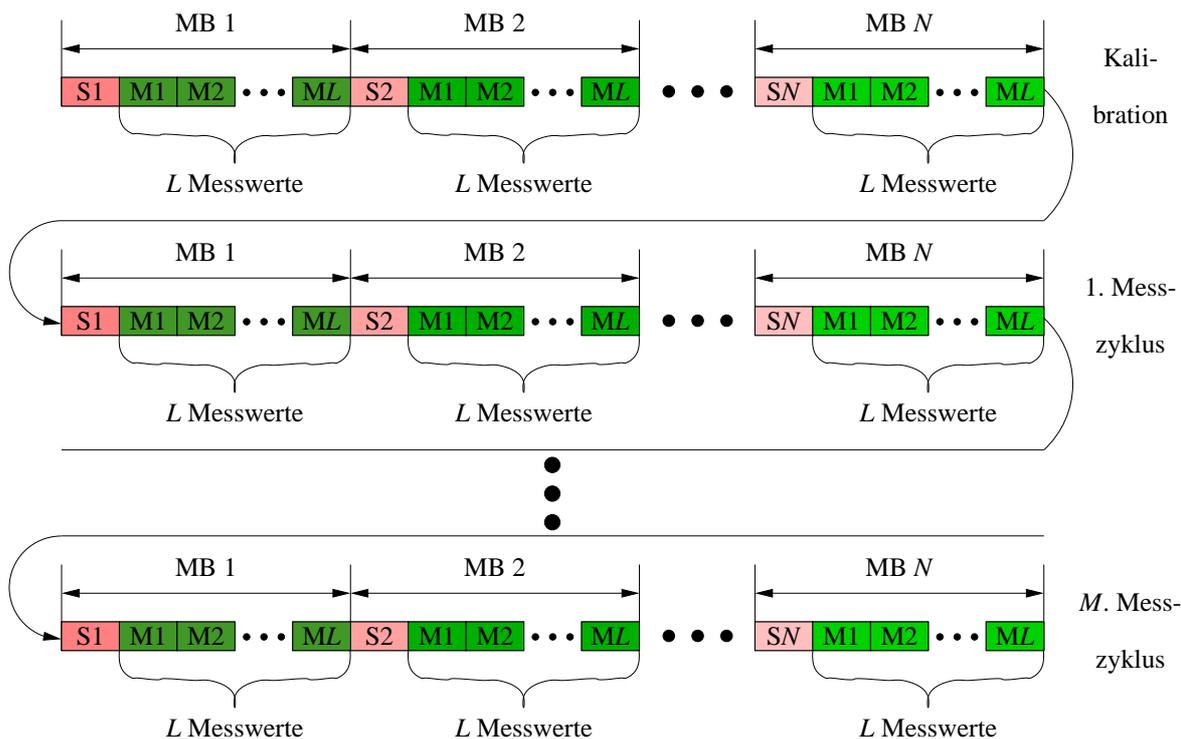


Bild 2.8: Messablauf

von L kann also die Messdauer $\tau = L \cdot 25 \text{ ms}$, $L \in \mathbb{N}$, eingestellt werden. Anschließend wird der nächste Messbereich kalibriert. Sind alle ausgewählten Messbereiche kalibriert, beginnt die eigentliche Messung. Dazu werden nacheinander die Antennen der ausgewählten Messbereiche an den Eingang des Mess-Systems geschaltet, die Messbereiche eingestellt und jeweils L Messungen durchgeführt. Die Anzahl M der Messzyklen zwischen zwei Kalibrationen ist ebenfalls frei wählbar. Ist der voreingestellte Wert M erreicht, wird das Mess-System vor den weiteren Messungen erneut kalibriert. Wird die Messung beendet, werden alle Messbereiche bis zur nächsten Kalibration gemessen, d. h. die M Messzyklen werden vervollständigt.

Anhand der Messprozedur wird deutlich, dass die ausgewählten Messbereiche *sequentiell* gemessen werden. Die Dauer, die zur Einstellung der Messbereiche benötigt wird, ist variabel und davon abhängig, wieviele und welche Messbereiche in derselben Messung gemessen werden, da die Schalter unterschiedliche Schaltzeiten aufweisen und die Einschwingzeit des lokalen Oszillators von der einzustellenden Frequenzdifferenz abhängt. Somit ist bei der Messung vieler Messbereiche keine exakte Zeitangabe möglich, und deshalb werden solche Messungen über der Nummer k des Abtastwerts aufgetragen. Bei der Messung nur eines Messbe-

reiches muss dieser nur einmal eingestellt werden, so dass für diese Messungen die Angabe einer Zeitachse möglich ist.

Der beschriebene Messablauf verändert außerdem das FOURIER-Spektrum der empfangenen Leistung $p_R(f, t)$. Bild 2.9 stellt den zeitlichen Verlauf der Messung mehrerer Messbereiche über der Zeit t dar, wobei die Zeit, die zur Einstellung (S_n) eines Messbereiches benötigt wird, vernachlässigt wurde.

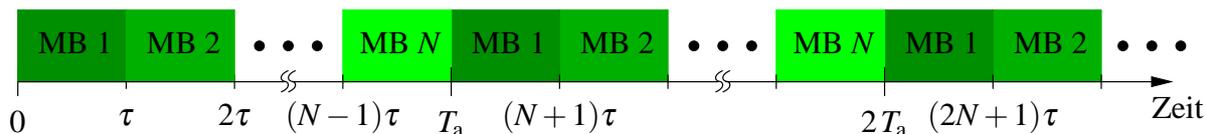


Bild 2.9: Zeitlicher Messablauf

T_a ist die Abtastperiode, also die Dauer zwischen zwei Messungen innerhalb eines Messbereiches, und τ die Messdauer des Mess-Systems. Die Messung startet bei $t = 0$ und endet zur Zeit T_e , die wegen des Messablaufs immer ein ganzzahliges Vielfaches der Abtastperiode ist. Wird nur ein Messbereich betrachtet, z. B. der erste, so ist die Leistung $p_R(f = \text{konst.}, t)$ innerhalb dieses Messbereiches eine Funktion der Zeit t , die in der folgenden Ableitung als $p_R(t)$ bezeichnet wird. Die Leistung $p_R(t)$ wird zwischen $t = k \cdot T_a$ und $t = k \cdot T_a + \tau$, mit $k \in \mathbb{Z}$, durch das Leistungsmessgerät gemittelt und ausgegeben. Dieser Vorgang lässt sich mit Hilfe eines idealisierten Modells (siehe Bild 2.10) nachbilden, das aus der Reihenschaltung eines *linearen Tors*, eines *Kurzzeitintegrators* und eines *idealen Abtasters* besteht. Die Leistung $p_{LT}(t)$ hinter dem linearen Tor ergibt sich zu:

$$p_{LT}(t) = p_R(t) \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t - \frac{\tau}{2} - kT_a}{\tau}\right).$$

Der Kurzzeitintegrator hat die Impulsantwort $h_I(t) = \frac{1}{\tau} \text{rect}\left(\frac{t - \frac{\tau}{2}}{\tau}\right)$ und die Leistung $p_I(t)$ hinter dem Integrator ergibt sich aus der Faltung der Impulsantwort $h_I(t)$ mit $p_{LT}(t)$:

$$p_I(t) = p_{LT}(t) * h_I(t).$$

Die integrierte Leistung $p_I(t)$ wird ausgegeben, was wieder einer Abtastung des Signals entspricht. Diesmal handelt es sich allerdings um eine ideale Abtastung. Die vom Leistungsmess-

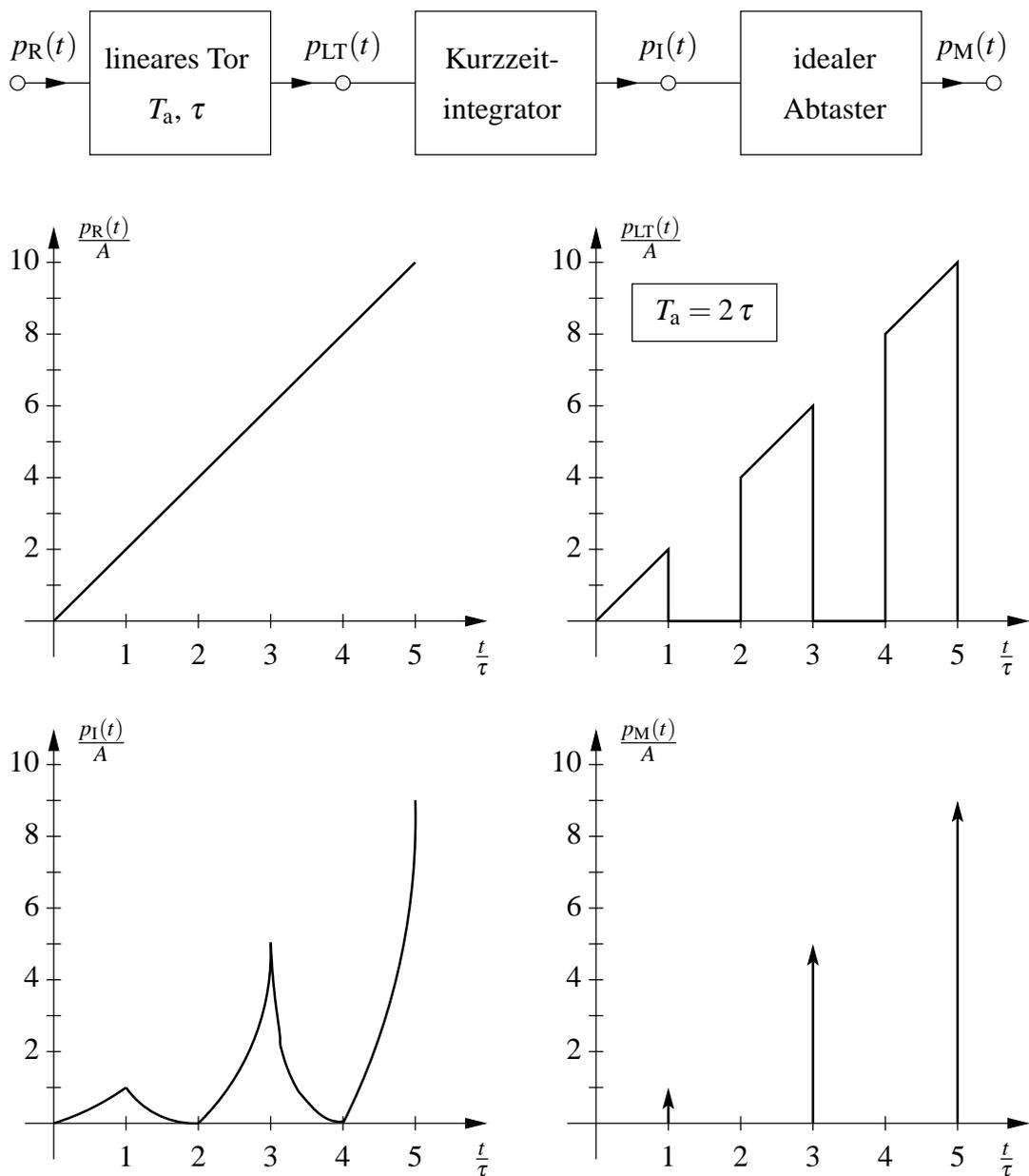


Bild 2.10: Idealisiertes Modell mit beispielhaften Signalverläufen für den Fall $T_a = 2\tau$

gerät ausgegebene Leistung $p_M(t)$ lässt sich durch die Gleichung

$$p_M(t) = p_I(t) \cdot T_a \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - \tau - kT_a)$$

bestimmen.

Wird $p_M(t)$ einer FOURIER-Transformation unterzogen, ergibt sich das Spektrum $P_M(\omega)$ der vom Leistungsmessgerät ausgegebenen Leistung zu:

$$P_M(\omega) = \frac{\tau}{T_a} \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{si} \left(\left[\omega - k \frac{2\pi}{T_a} \right] \frac{\tau}{2} \right) \cdot \exp \left(-j \left[\omega - k \frac{2\pi}{T_a} \right] \frac{\tau}{2} \right) \cdot \text{si} \left(k \frac{\pi \tau}{T_a} \right) \cdot \exp \left(-jk \frac{3\pi \tau}{T_a} \right) \cdot P_R \left(\omega - k \frac{4\pi}{T_a} \right).$$

Die Übertragungsfunktion $H_{MS}(\omega)$ bezogen auf das zeitliche Verhalten innerhalb eines Messbereiches ergibt sich, wenn das Spektrum $P_R(\omega) \stackrel{\mathcal{F}}{\longleftrightarrow} p_R(t)$ der empfangenen Strahlleistung eines Messbereiches für alle Kreisfrequenzen ω zu eins gesetzt wird. Dann gilt:

$$H_{MS}(\omega) = \frac{\tau}{T_a} \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{si} \left(\left[\omega - k \frac{2\pi}{T_a} \right] \frac{\tau}{2} \right) \exp \left(-j \left[\omega - k \frac{2\pi}{T_a} \right] \frac{\tau}{2} \right) \cdot \text{si} \left(k \frac{\pi \tau}{T_a} \right) \cdot \exp \left(-jk \frac{3\pi \tau}{T_a} \right). \quad (2.10)$$

Der Einfluss der Abtastung wird minimal, wenn die Abtastperiode T_a der Messdauer τ entspricht. Anschaulich bedeutet das, dass die Kurzzeitintegration ohne Unterbrechung durchgeführt wird. Dadurch ist $H_{MS}(\omega)$ identisch mit der Übertragungsfunktion des Kurzzeitintegrators. Durch Einsetzen von $T_a = \tau$ in Gleichung (2.10) ergibt sich:

$$\begin{aligned} H_{MS}(\omega) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{si} \left(\frac{\omega \tau}{2} - k\pi \right) \cdot \exp \left(-j \left(\frac{\omega \tau}{2} - k\pi \right) \right) \cdot \text{si}(k\pi) \cdot \exp(-jk3\pi) \\ &= \text{si} \left(\frac{\omega \tau}{2} \right) \cdot \exp \left(-j \frac{\omega \tau}{2} \right), \end{aligned}$$

was der Übertragungsfunktion eines Kurzzeitintegrators entspricht. Die erste Nullstelle der Funktion $\text{si} \left(\frac{\omega \tau}{2} \right)$ liegt bei der Frequenz $f_0 = \frac{1}{\tau}$. Diese Frequenz f_0 wird maximal, wenn τ minimal ist, und die minimale Messdauer innerhalb des Mess-Systems beträgt $\tau = 25$ ms, was auf $f_0 \leq 40$ Hz führt. Daraus folgt, dass nur zeitliche Veränderungen in der empfangenen Leistung $p_R(t)$ gemessen werden können, die zu Frequenzen f kleiner 40 Hz korrespondieren. Schnellere Schwankungen in der empfangenen Leistung $p_R(t)$ sind nicht messbar.

Im allgemeinen Fall liegt zudem eine *Unterabtastung* vor. Die Abtastperiode T_a bestimmt, wie stark sich die Teilspektren von $H_{MS}(\omega)$ überlappen. Das Argument der gewichtenden

si-Funktion $\text{si}\left(k\frac{\pi\tau}{T_a}\right)$ ist wegen des kleinen τ ebenfalls klein, daher sind viele si-Funktionen innerhalb der Summe zu berücksichtigen. Bild 2.11 stellt den Betrag der Summenterme aus Gleichung (2.10) für $k = [-1, 0, 1]$, $T_a = 200\text{ms}$ und $\tau = 75\text{ms}$ dar. Die Werte für T_a und τ entsprechen einer typischen Einstellung des Mess-Systems.

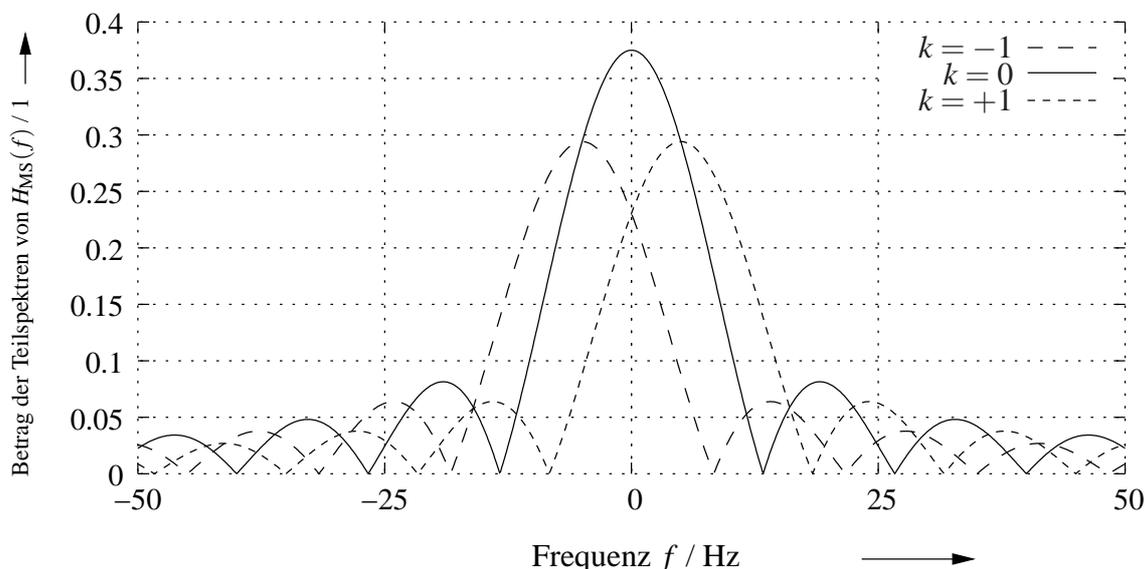


Bild 2.11: Betrag der Teilspektren der Übertragungsfunktion $H_{MS}(f)$

Die durch das Mess-System hervorgerufene Unterabtastung ist deutlich erkennbar, d. h. das Spektrum $P_R(\omega)$ der empfangenen Leistung wird stark verfälscht, sobald mehrere Messbereiche gemessen werden. Eine Information über das zeitliche Verhalten der empfangenen Leistung $p_R(t)$ innerhalb eines Messbereiches ist also nur durch die Messung eines einzelnen Messbereiches möglich und auch dort, wegen der Mittelung der Messwerte, nur bis zu ca. 40 Hz.

2.5 Steuerung des Mess-Systems

Die manuelle Steuerung des Mess-Systems wäre aufwändig, deshalb wird das System automatisch durch einen PC gesteuert. Dazu wurde ein Programm entwickelt, das mit Hilfe einer *graphischen Oberfläche* bedient werden kann. Das Programm setzt sich aus mehreren Teilen zusammen. Im ersten Programmteil wird die Messung konfiguriert, d. h. die Einstellung der gewünschten Messbereiche, der Messdauer τ und der Anzahl M der Messzyklen wird vorge-

nommen.

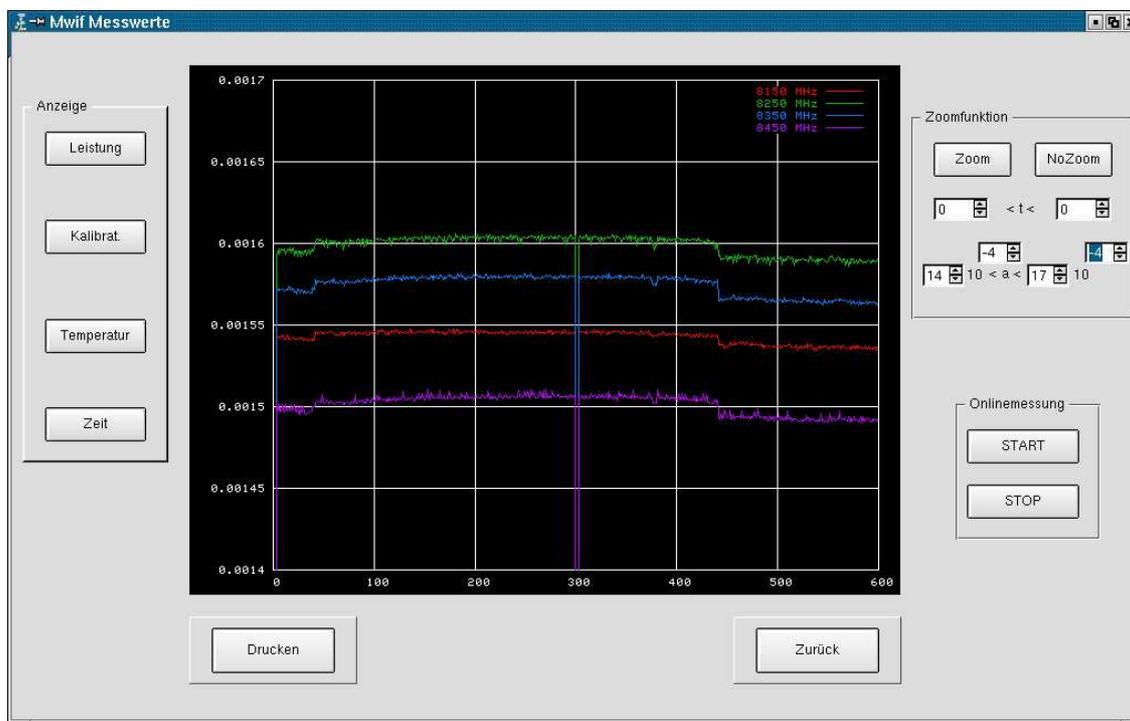


Bild 2.12: Graphische Datenauswertung

Der zweite Programmteil dient der Steuerung der Messung. Hier werden die Messungen vom Anwender gestartet bzw. gestoppt, die verbleibende Steuerung der Schaltstufen und der anderen Geräte wird automatisch durch das Programm vorgenommen. Optische Anzeigen informieren über den Verlauf der Messungen. Der dritte Programmteil, dessen graphische Oberfläche in Bild 2.12 gezeigt wird, stellt die aufgenommenen Daten dar. Innerhalb der Oberfläche können die Daten während einer Messung oder zu einem späteren Zeitpunkt angezeigt werden. Das Programm ermöglicht die Darstellung der gemessenen Leistung $p_M(f, t)$, der Leistung der Kalibrierlast $p_{KL}(f, t)$, deren Temperatur T_{KL} und der Zeit t , die während der Messungen vergeht. Ferner sind Optionen zur Vergrößerung und zum Druck der Daten vorhanden. Das Programm stellt die gewonnen Messwerte direkt dar, eine weiterführende Verarbeitung, wie beispielsweise die Korrektur mit Hilfe der Kalibration, geschieht hier noch nicht.

Nach Ende der Messung speichert das Programm die aufgenommenen Daten zur späteren Auswertung. Dazu wird ein einfaches *ASCII-Datenformat* verwendet, wie es in Bild 2.13

```

Temperatur HotLoad: 96.973412 Uhrzeit: 1096287161
Zündung: 1096287157
C20750: +1.10836394E-003 +1.10820627E-003 +1.10730522E-003
C20850: +1.08687386E-003 +1.08524454E-003 +1.08735136E-003
M20750: +9.50319754E-004 +9.52985406E-004 +9.53509644E-004
M20850: +9.11101191E-004 +9.08592604E-004 +9.08783545E-004
M20750: +9.50199071E-004 +9.52388847E-004 +9.52942950E-004
M20850: +9.09912086E-004 +9.09915429E-004 +9.08740643E-004

```

Bild 2.13: Datenformat innerhalb des Mess-Systems

abgebildet ist. In der ersten Zeile steht die Temperatur T_{KL} der Kalibrierlast gefolgt von der Uhrzeit, bei der die Kalibrationsmessung durchgeführt wurde. Die nächste Zeile enthält den Zündzeitpunkt des Feuers. Die Zeiten sind in vergangenen Sekunden seit dem 1. Januar 1970 um 0:00:00 Uhr angegeben. Es folgen die Kalibrierleistungen $p_{KL}(f, t)$ für die Messbereiche, wobei die n Messwerte – im Beispiel sind es drei – eines Messbereiches in jeweils einer Zeile stehen. Der erste Eintrag der Zeile benennt die Bandmittenfrequenz f_c des Messbereiches in MHz und unterscheidet Kalibration (C) von Messung (M). Dieses Datenformat hat den Vorteil, dass die Beschreibung des Messablaufs in den Daten enthalten ist. So ist keine zusätzliche Dokumentation erforderlich, welche die Einstellungen des Mess-Systems für jede Messung enthält.

2.6 Zusammenfassung

Innerhalb dieses Kapitels wurde das aufgebaute Mess-System vorgestellt, mit dem die emittierte Leistung $p_F(f, T_F, A_F)$ der Wärmestrahlung von Feuern zwischen 2 GHz und 40 GHz gemessen werden kann. Wichtige Parameter sind dabei der Gewinn $G(f)$ der verwendeten Antennen, das Rauschmaß $F_{LNA, dB}$ der Vorverstärker, die Messdauer τ und die Messbandbreite Δf . Der Antennengewinn $G(f)$ ist nach Gleichung (1.11) entscheidend für die empfangene Leistung $p_R(f, t)$ und – über den Füllfaktor $w_F(f)$ – für die Temperaturauflösung ΔT_O bzw. Leistungsauflösung Δp_O des Mess-Systems. Je größer der Gewinn $G(f)$ ist, umso größer ist die empfan-

gene Leistung $p_R(f, t)$ bzw. umso kleiner sind die auflösbaren Leistungsunterschiede. Deshalb sollten Antennen mit großen Gewinn $G(f)$ verwendet werden.

Das Rauschmaß $F_{LNA, dB}$ der Vorverstärker ist für eine gute Temperaturauflösung ΔT_O von Bedeutung, so dass möglichst rauscharme Vorverstärker eingesetzt werden sollten. Ferner sollten die Leitungen zwischen den Antennen und den Vorverstärkern so kurz und damit dämpfungsarm wie möglich sein.

Die Temperaturauflösung ΔT_O wird auch durch die Messdauer τ beeinflusst. Je länger die Messdauer τ ist, desto besser können kleine Temperaturunterschiede aufgelöst werden. Die Messdauer τ muss aber so gewählt sein, dass der Temperaturverlauf von Entstehungsbränden verfolgt werden kann, was τ nach oben begrenzt. Ein Vergleich mit herkömmlichen Messverfahren der automatischen Brandentdeckung liefert einen oberen Grenzwert von $\tau \approx 1$ s.

Der letzte Parameter ist die Messbandbreite Δf . Sie beeinflusst sowohl die empfangene Leistung $p_R(f, t)$ als auch die Temperaturauflösung ΔT_O direkt. In beiden Fällen ist eine große Messbandbreite Δf von Vorteil. Der einzige Nachteil, der durch ein großes Δf entsteht, ist die verringerte spektrale Auflösung. Daher muss ein Kompromiss zwischen Temperaturauflösung ΔT_O einerseits und der Zeit- bzw. Frequenzauflösung andererseits gefunden werden.

Der breitbandige Aufbau des Mess-Systems führt dazu, dass auch Kompromisse im Aufbau notwendig sind. Beispielsweise ist es nicht möglich alle Antennen durch sehr kurze Leitungen mit der ersten Schaltstufe zu verbinden. Schmalbandigere Komponenten weisen außerdem meist bessere Leistungsmerkmale auf. So sind rauscharme Vorverstärker aus dem Bereich des Satellitenfernsehens mit Rauschmaßen $F_{LNA, dB}$ von nur 0.3 dB bei einer Bandbreite Δf von ca. 1 GHz erhältlich. Mehrere schmalbandigere Mess-Systeme wären daher in Bezug auf die Temperaturauflösung ΔT_O besser geeignet als das aufgebaute Mess-System, das zur Messung der emittierten Leistung $p_F(f, T_F, A_F)$ der Wärmestrahlung von Feuern eingesetzt wurde. Die Messungen sowie deren Ergebnisse werden im folgenden Kapitel beschrieben.

Kapitel 3

Messergebnisse und Auswertung

Das im vorherigen Kapitel beschriebene Mess-System wurde zu Messungen im Brandentdeckungslabor der Universität Duisburg-Essen eingesetzt. Dieses Kapitel beschreibt die durchgeführten Messungen und diskutiert deren Ergebnisse. Der erste Abschnitt stellt dazu die verwendeten *Testfeuer* vor. Im zweiten Abschnitt wird der *Versuchsaufbau* beschrieben. Der dritte Abschnitt diskutiert die *Messergebnisse* für den Frequenzbereich 26 – 40 GHz ausführlich, während die folgenden Abschnitte kurz auf die Besonderheiten innerhalb der anderen Frequenzbereiche des Mess-Systems eingehen. Eine Zusammenfassung schließt dieses Kapitel ab.

3.1 Testfeuer

Dieser Abschnitt stellt die verwendeten Testfeuer vor. Dabei handelt es sich hauptsächlich um die genormten Testbrände der *EN 54 Teil 9* [5].

Diese Brände sollen Informationen über das Ansprechverhalten von Brandmeldern unter realen Brandbedingungen liefern. „*Diese Testbrände sind für bestimmte Kategorien von Bränden typisch und überdecken, insgesamt betrachtet, den größten Teil aller in der Praxis auftretenden Brände* [5].“ Tabelle 3.1 fasst die wichtigsten Eigenschaften dieser Brände zusammen.

Das Testfeuer TF7 stammt nicht aus der EN 54 Teil 9. Es ist ein Flüssigkeitsbrand, bei dem Decahydronaphthalin oder kurz Dekalin verbrannt wird. Dieses Feuer hat eine schwache Wärmeentwicklung, und es entsteht ein sehr dunkler Rauch im sichtbaren Bereich. Ferner erzeugt das Feuer eine starke Aufwärtsströmung.

Bezeichnung (TF = test fire)	Brandart	typische Merkmale				
		Wärmeent- wicklung	Aufwärts- strömung	Rauchent- wicklung	Aerosol- spektrum	sichtbarer Bereich
TF1	offener Brand Zellulose (Holz)	stark	stark	ja	überwiegend nicht sichtbar	dunkel
TF2	Pyrolyse- Schwelbrand (Holz)	vernach- lässigbar	schwach	ja	überwiegend sichtbar	hell, stark streuend
TF3	Glimm- Schwelbrand (Baumwolle)	vernach- lässigbar	sehr schwach	ja	überwiegend nicht sichtbar	hell, stark streuend
TF4	offener Brand Kunststoff (Polyurethan)	stark	stark	ja	teilweise nicht sichtbar	sehr dunkel
TF5	Flüssig- keitsbrand (n-Heptan)	stark	stark	ja	überwiegend nicht sichtbar	sehr dunkel
TF6	Flüssig- keitsbrand (Aethylalkohol)	stark	stark	nein	keines	keiner

Tabelle 3.1: Eigenschaften der Testbrände (aus [5])

Die *EN 54 Teil 7* [6] ersetzt seit März 2001 die oben erwähnte *EN 54 Teil 9*. In der neuen Norm fehlen die Testfeuer TF1 und TF6. Die Testfeuer TF3, TF4 und TF5 blieben unverändert. Das TF2 wurde überarbeitet, indem die Geometrie der verwendeten Holzquader geändert wurde. Dieses geänderte TF2 wurde ebenfalls untersucht, und es wird im Folgenden als TF2neu bezeichnet. Die Überarbeitung der Norm hatte das Ziel Rauchmelder schneller zu testen. Leider ist dadurch der Anspruch verloren gegangen, den größten Teil in der Praxis auftretender Brände abzudecken. Die *EN 54 Teil 9* bildet daher die Grundlage für die folgenden Versuche.

Ein weiteres Feuer stammt aus dem Normenvorschlag *prEN 54 Teil 20* [7], die zum Test

von Ansaugrauchmeldern gedacht ist. Es handelt sich dabei um ein reduziertes TF5, das TF5a. Das TF5a wird in einem kleineren Behälter mit reduzierter Menge durchgeführt. Die Behältergeometrie ist so gewählt, dass eine Beobachtung der Flüssigkeit während des Brandes mit dem aufgebauten Mess-System nicht möglich ist. Das TF5a eignet sich daher zur Untersuchung der von Flammen ausgehenden Wärmestrahlung.

3.2 Messaufbau

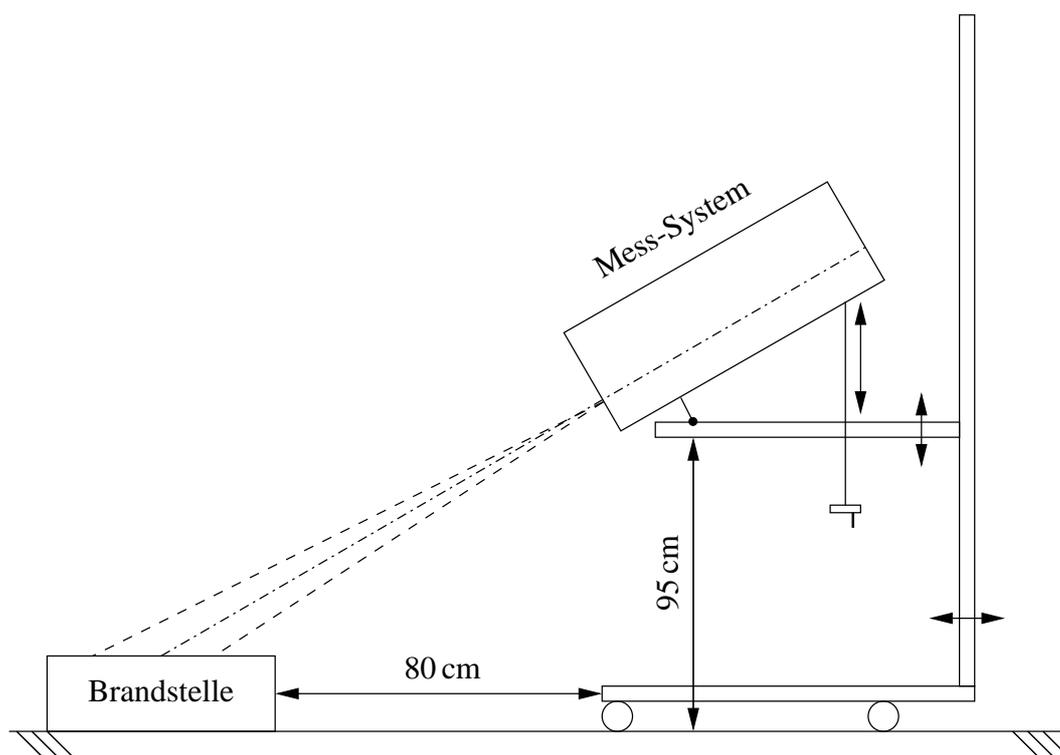


Bild 3.1: Schematische Darstellung des Messaufbaus

Bild 3.1 zeigt den schematischen Messaufbau. Auf der linken Seite ist die Brandstelle zu sehen. Dort werden die unterschiedlichen Brandversuche aufgebaut. Je nach Testbrand ändert sich sowohl die Grundfläche des Brandes als auch die Höhe des Feuers über dem Boden. Beispielsweise wird für ein TF2 Buchenholz auf eine Heizplatte gelegt. Die Heizplatte wird ihrerseits auf die Mitte des Podests gestellt, so dass die Brandhöhe der Summe von Podesthöhe und Höhe der Heizplatte entspricht. Die Brandfläche stimmt mit der kreisrunden Heizplattenfläche überein.

Das Mess-System wurde auf ein rollbares Gestell montiert, damit es variabel im Brandversuchsraum positionierbar ist. Außerdem lässt sich das Mess-System in der Höhe verstellen und kippen. Die Höhenverstellung kann zwischen ca. 95 cm und 2.60 m in Schritten von je 18.5 cm vorgenommen werden. Die Winkelverstellung ist stufenlos zwischen der Waagerechten und einem Neigungswinkel von ca. 60° möglich.

Bei den folgenden Versuchen betrug der Abstand zwischen der Brandstelle und dem Gestell ca. 80 cm. Die Höhenverstellung stand auf der untersten Stufe, also bei 95 cm. Der Neigungswinkel wurde so eingestellt, dass die Hauptstrahlrichtung der jeweiligen Antenne auf die Mitte des Brandmaterials ausgerichtet wurde. Diese Einstellung ergibt einen Abstand d zwischen Brandmitte und Antennen von ungefähren 1 m. Dieser Messaufbau führt in den einzelnen Frequenzbereichen zu den in Tabelle 3.2 angegebenen Füllfaktoren $w_F(f)$.

$w_F(f)$	TF1	TF2	TF3	TF4	TF5	TF6	TF7
12 – 18 GHz	0.89	0.23	0.47	0.89	0.63	0.80	0.11
18 – 26 GHz	0.87	0.20	0.45	0.87	0.61	0.74	0.10
26 – 40 GHz	1.00	0.46	0.63	1.00	0.98	1.00	0.28

Tabelle 3.2: Füllfaktoren $w_F(f)$ der Testfeuer in den verschiedenen Frequenzbereichen

Die Füllfaktoren innerhalb des Frequenzbereiches 26 – 40 GHz sind am größten, folglich ist die Auflösung des Mess-Systems in diesem Frequenzbereich am besten. Im folgenden Abschnitt werden deshalb die Messergebnisse der verschiedenen Testfeuer innerhalb dieses Frequenzbereiches diskutiert. Die Abschnitte 3.4, 3.5 und 3.6 beschreiben kurz die Besonderheiten, die sich in den anderen Frequenzbereichen ergeben haben. Dies gilt insbesondere für den Frequenzbereich 2 – 12 GHz, da dort die Fernfeldbedingung nicht erfüllt ist und somit keine Füllfaktoren für diesen Frequenzbereich angegeben werden können.

In den folgenden Abschnitten werden zwei Leistungen betrachtet. Zum einen die gemessene Leistung $p_M(f, t)$ nach Gleichung (2.3) und zum anderen die korrigierte empfangene Leistung $p_R(f, t)$ nach Gleichung (2.4). $p_M(f, t)$ ist die vom Leistungsmessgerät gemessene Leistung, welche die Gesamtverstärkung $G_{MS}(f)$ des Mess-Systems beinhaltet. Bei der empfangenen Leistung $p_R(f, t)$ ist die Gesamtverstärkung $G_{MS}(f)$ des Mess-Systems mit Hilfe

der Kalibrierlast herausgerechnet. Die dargestellten Kurven zeigen den zeitlichen Verlauf dieser Leistungen für *Messbänder* mit unterschiedlichen Mittenfrequenzen f_c und der Bandbreite $\Delta f = 100\text{MHz}$. Im Folgenden werden daher die Schreibweisen $p_M(f_c, t)$ bzw. $p_R(f_c, t)$ für die dargestellten Leistungen verwendet.

3.3 Frequenzbereich 26 - 40 GHz

Die Diskussion der Messungen beginnt mit dem Frequenzbereich 26 – 40GHz. Dieser Frequenzbereich hat den Vorteil, dass die eingesetzte Antenne den größten Gewinn $G(f)$ hat und sich somit der größte Füllfaktor $w_F(f)$ ergibt. Die Temporauflösung ΔT_O ist ebenfalls besser als in den anderen Frequenzbereichen. Dies führt dazu, dass die Messergebnisse in diesem Frequenzbereich genauer sind und die Testfeuer somit am besten beschreiben.

3.3.1 Testfeuer 1

Das erste betrachtete Feuer ist das TF1, ein offener Holzbrand. Bei diesem Feuer werden Buchenholzquader gestapelt und verbrannt. Bild 3.2 stellt die Projektion der Antennenhauptkeule innerhalb des Frequenzbereiches 26 – 40GHz auf einer Ebene dar, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung im Abstand d steht, also am Ort des Brandes. Das Mess-System fokussiert den Brand unter einem bestimmten Winkel, deshalb ist die Brandfläche des TF1 ebenfalls auf die Fläche projiziert. Die Hauptkeule liegt für den verwendeten Messaufbau vollständig in der Brandfläche, d. h. der Füllfaktor $w_F(f)$ ist gleich eins.

Bild 3.3 stellt die Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,\text{dB}}(f_c, \Delta t)$ und Bild 3.4 die gemessene Leistung $p_M(f_c, t)$ der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich der Messbereiche zwischen 37.55 – 37.95GHz dar. Bei dieser Messung wurden mehrere Messbereiche gemessen, daher ist die Leistung $p_M(f_c, t)$ bzw. die Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,\text{dB}}(f_c, \Delta t)$ über der Nummer des Abtastwerts k aufgetragen. Die Leistungsdifferenz $\Delta p_M(f_c, \Delta t) = p_M(f_c, t) - p_M(f_c, t_0)$ gibt die Differenz zwischen der gemessenen Leistung zum Zeitpunkt t und der Startleistung $p_M(f_c, t_0)$ zum Zeitpunkt t_0 an, wobei die Startzeit t_0 als der Zeitpunkt festgelegt wird, bei dem die gemessene Leistung $p_M(f_c, t)$ vor der Zündung des Feuers ihr Minimum annimmt. Logarithmierung der Differenz liefert die Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,\text{dB}}(f_c, \Delta t)$ mit der Einheit Dezibel oder kurz dB,

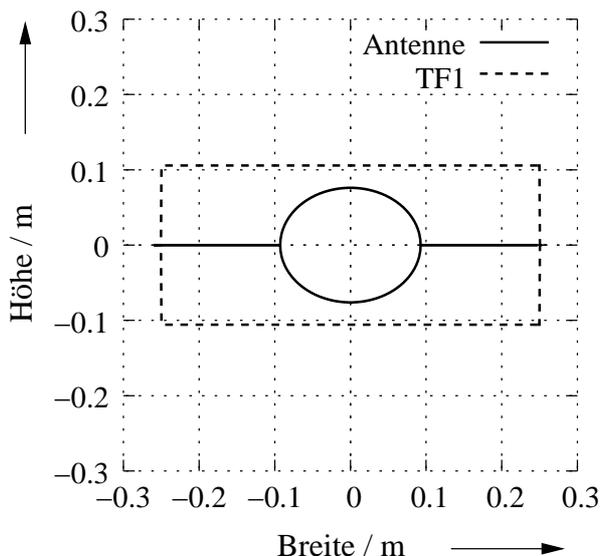


Bild 3.2: Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Fläche des Testfeuer TF1

und es gilt:

$$\Delta p_{M,\text{dB}}(f_c, \Delta t) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_M(f_c, t)}{p_M(f_c, t_0)} \right).$$

In Bild 3.3 ist der Einfluss des Feuers auf die gemessene Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,\text{dB}}(f_c, \Delta t)$ deutlich erkennbar. Außerdem ist der Verlauf von $\Delta p_{M,\text{dB}}(f_c, \Delta t)$ – bis auf die Größe der maximalen Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,\text{dB}}(f_c, \Delta t_m)$ – in allen betrachteten Messbereichen nahezu gleich. Auf die Darstellung der restlichen Messbereiche innerhalb des Frequenzbereiches 26 – 40 GHz wird verzichtet, da der Verlauf in diesen Messbereichen den gezeigten gleicht. Bild 3.4 stellt die gemessene Leistung $p_M(f_c, t)$ dar. Die Startleistung $p_M(f_c, t_0)$ entspricht der Raumtemperatur. Diese Leistung sollte in allen Messbereichen gleich sein, und die Kurven müssten übereinander liegen. Die Ursache für die Verschiebung der Kurven ist in der frequenzabhängigen Verstärkung $G_{MS}(f)$ des Mess-Systems zu suchen, denn nach Gleichung (2.3) gilt $p_M(f_c, t) = G_{MS}(f) \cdot p_R(f_c, t)$.

In Abschnitt 2.2 wurde dies bereits diskutiert und darauf verwiesen, dass nur der relative zeitliche Verlauf der gemessenen Leistung $p_M(f_c, t)$ ausgewertet werden kann. Ein weiteres Phänomen, das durch das Mess-System hervorgerufen wird, ist der Sprung bei $k \approx 275$. Zu diesem Zeitpunkt wurde eine Kalibrationsmessung durchgeführt und da entweder die Leistung $p_{KL}(f, t)$ der Kalibrierlast oder die empfangene Leistung des Feuers $p_{R,F}(f_c, t)$ gemessen wer-

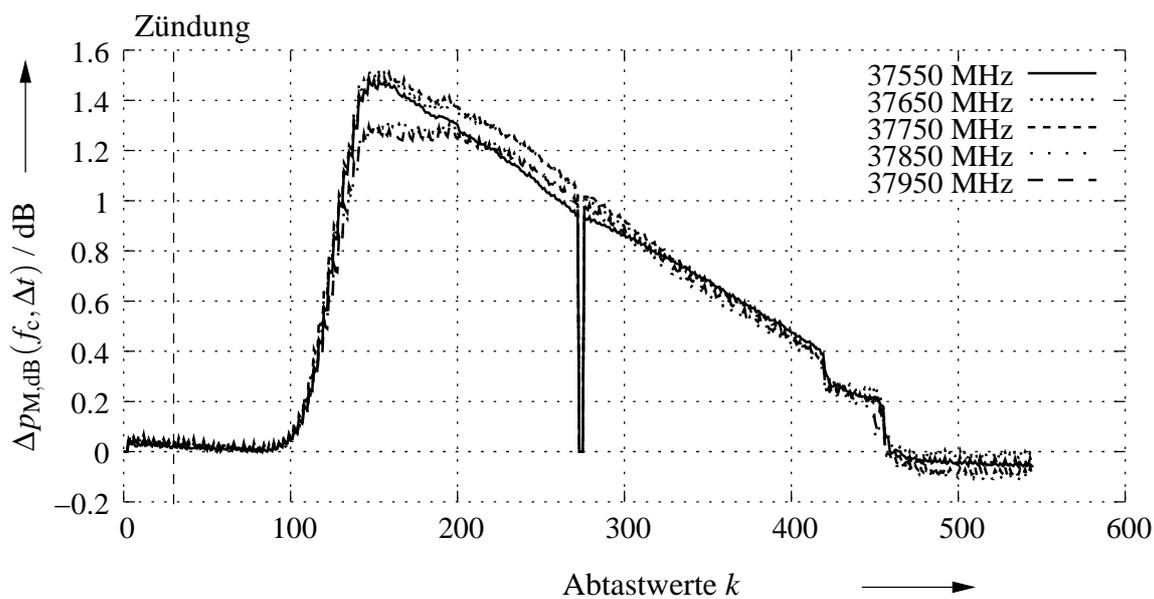


Bild 3.3: Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF1 der Messbereiche zwischen 37.55 – 37.95 GHz

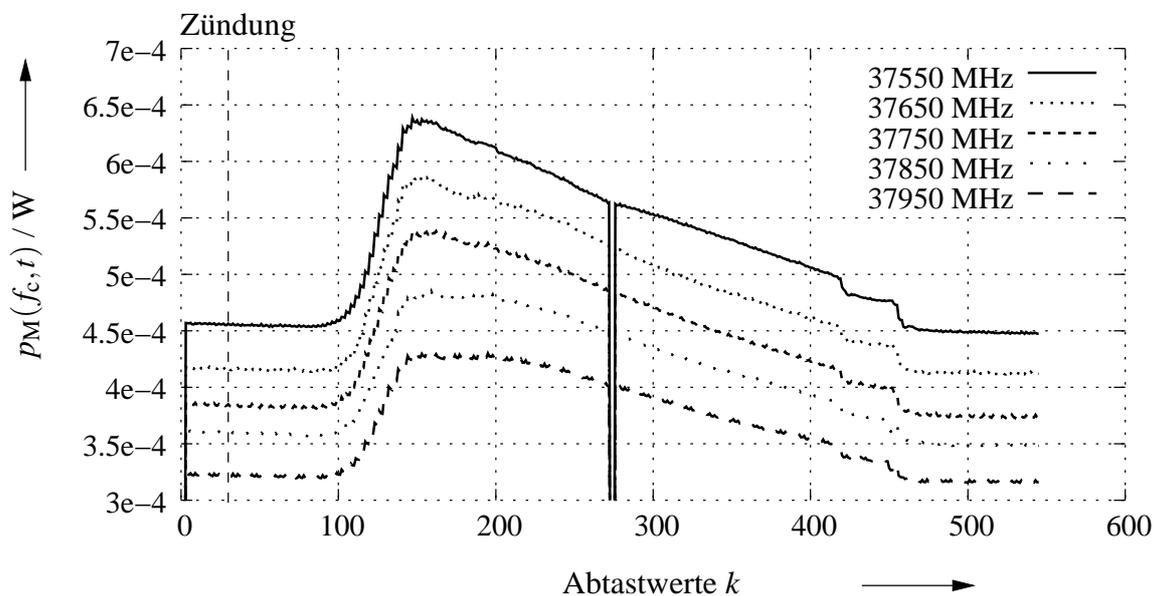


Bild 3.4: Gemessene Leistung $p_M(f_c, t)$ eines TF1 der Messbereiche zwischen 37.55 – 37.95 GHz

den kann, ist $p_M(f_c, t)$ dort zu null gesetzt.

Die Zündung des Brandes fand bei $k \approx 30$ statt. Ab $k \approx 100$ kann ein nahezu exponentieller Anstieg in der gemessenen Leistung $p_M(f_c, t)$ beobachtet werden. Im Bereich des Maximums von $p_M(f_c, t)$ erloschen die Flammen, und das verbliebene Holz begann zu glühen. Die durch die Glut hervorgerufene Wärmestrahlung ist ebenfalls deutlich in $p_M(f_c, t)$ zu sehen. Mit fortlaufender Zeit fällt $p_M(f_c, t)$ dann linear ab. Im Bereich zwischen $400 \leq k \leq 500$ sind zwei weitere Sprünge in der gemessenen Leistung $p_M(f_c, t)$ zu beobachten. Die Ursache dieser Sprünge ist die Entfernung des restlichen Holzes aus dem Fokus der Antenne, was zwei Anläufe brauchte.

Die frequenzabhängigen Unterschiede in der Größe der maximalen Leistungsdifferenz $\Delta p_M(f_c, \Delta t_m)$ lassen sich auch in diesem Bild beobachten, sind aber in Bild 3.3 besser zu erkennen. Diese frequenzabhängigen Unterschiede können durch das Mess-System selbst verursacht werden, und zwar durch das frequenzabhängige Temperaturauflösungsvermögen ΔT_O der einzelnen Messbereiche oder durch die Verstärker, die nicht exakt linear arbeiten. Das brennende Material, in diesem Fall Buchenholz, kann die frequenzabhängige maximale Leistungsdifferenz $\Delta p_M(f_c, \Delta t_m)$ ebenfalls hervorrufen. Gleichung (1.5), welche die Strahlstärke $I_F(f, T_F)$ der Wärmestrahlung von Feuern beschreibt, enthält den Emissionsgrad $w_\varepsilon(f, T_F)$. $w_\varepsilon(f, T_F)$ gibt den Einfluss des Materials wieder und ist abhängig von der Feuertemperatur T_F und der betrachteten Frequenz f . Die Unterschiede der maximalen Leistungsdifferenz $\Delta p_M(f_c, \Delta t_m)$ können also durchaus vom Material abhängen und somit sogar typisch für das verbrennende Material sein.

Bild 3.5 stellt die Startleistung $p_M(f_c, t_0)$ – korrespondierend mit der Raumtemperatur – der Maximalleistung $p_M(f_c, t_m)$ gegenüber. Die Kurven beschreiben prinzipiell das Verstärkungsverhalten $G_{MS}(f)$ des Mess-Systems. Unter der Voraussetzung, dass sich der Raum im thermischen Gleichgewicht befindet, sollte die Leistung zumindest im Startzeitpunkt t_0 in allen Messbereichen gleich sein, so dass die Startleistung bis auf einen konstanten Faktor dem Verstärkungsverhalten entspricht. Der Verlauf der Maximalleistung $p_M(f_c, t_m)$ ist dem Verlauf von $p_M(f_c, t_0)$ sehr ähnlich. Aus diesem Grund sind die frequenzabhängigen Unterschiede der maximalen Leistungsdifferenz $\Delta p_M(f_c, \Delta t_m)$ eher dem Mess-System zuzuschreiben. Wird $G_{MS}(f)$ analysiert, so ist deren Frequenzabhängigkeit deutlich erkennbar. Bis zu ca. 37 GHz schwankt die Verstärkung, danach ist ein Abfall zu beobachten. Dieser Abfall ist ein Anzeichen dafür, dass die Leistungsfähigkeit des Mess-Systems gegen Ende des Frequenzbereiches 26 – 40 GHz

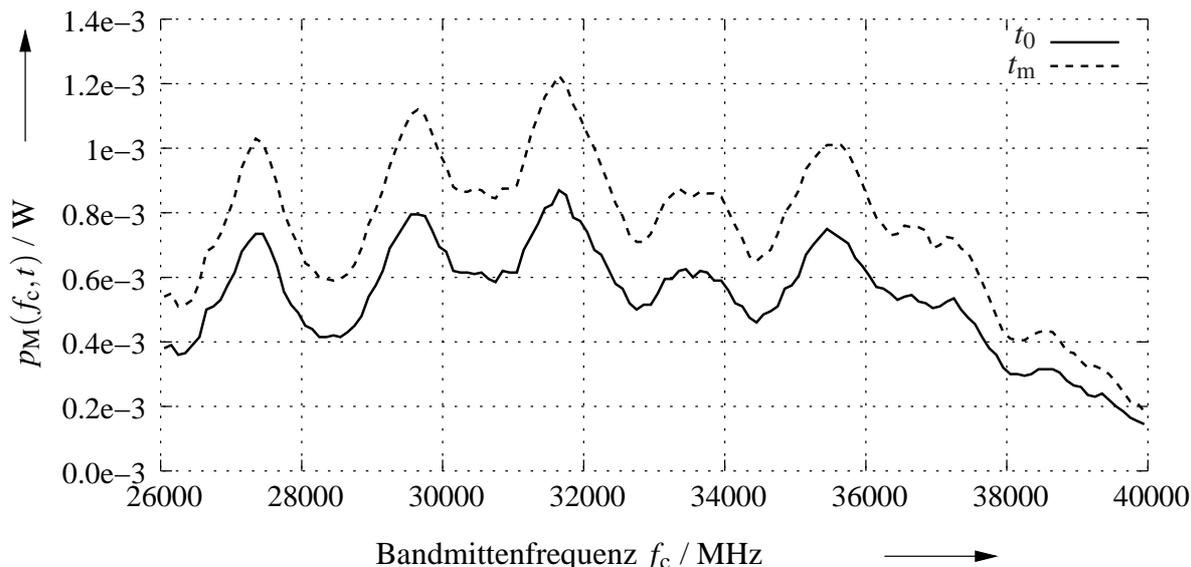


Bild 3.5: Startleistung $p_M(f_c, t_0)$ und Maximalleistung $p_M(f_c, t_m)$ eines TF1

abnimmt. Eine mögliche Ursache dafür ist, dass viele eingesetzte Bauteile am oberen Ende ihres nutzbaren Frequenzbereiches etwas schlechtere Leistungsmerkmale aufweisen als bei niedrigeren Frequenzen (siehe z. B. Bild 2.5). Die Addition dieser schlechteren Leistungsfähigkeit über mehrere Bauteile könnte also zu dem Abfall am Ende des Frequenzbereiches 26 – 40 GHz führen. Innerhalb der letzten 3 GHz wird die maximale Leistungsdifferenz $\Delta p_M(f_c, \Delta t_m)$ auch kleiner, wohingegen diese Differenz in den anderen Messbereichen anscheinend konstant ist. Bild 3.6 stellt den prozentualen Anstieg $A_p(f_c)$ der gemessenen Leistung der Wärmestrahlung dar. Dieser bestimmt sich wie folgt:

$$A_p(f_c) = \frac{\Delta p_M(f_c, \Delta t_m)}{p_M(f_c, t_0)} \cdot 100 = \frac{p_M(f_c, t_m) - p_M(f_c, t_0)}{p_M(f_c, t_0)} \cdot 100,$$

wobei $p_M(f_c, t_0)$ wiederum der gemessenen Startleistung und $p_M(f_c, t_m)$ der gemessenen Maximalleistung entspricht. $p_M(f_c, t_0)$ und $p_M(f_c, t_m)$ müssen aus den Messwerten entnommen werden, daher ist die Bestimmung des prozentualen Anstiegs $A_p(f_c)$ nur innerhalb einer gewissen Toleranz möglich. Aus diesem Grund sind sowohl der maximale prozentuale Anstieg $A_{p,\max}(f_c)$ als auch der minimale prozentuale Anstieg $A_{p,\min}(f_c)$ dargestellt, die sich wie folgt berechnen:

$$A_{p,\max}(f_c) = \frac{\Delta p_M(f_c, \Delta t_m) + 2\Delta}{p_M(f_c, t_0) - \Delta} \cdot 100, \quad A_{p,\min}(f_c) = \frac{\Delta p_M(f_c, \Delta t_m) - 2\Delta}{p_M(f_c, t_0) + \Delta} \cdot 100.$$

Die Ableseungenauigkeit Δ wurde für diese Auswertung zu $\Delta = 5 \mu\text{W}$ gesetzt. Der prozentuale Anstieg ist mit der maximalen Leistungsdifferenz $\Delta p_{\text{M,dB}}(f_c, \Delta t_m)$ verknüpft, und es gilt:

$$A_p(f_c) = 100 \cdot \left[10^{\frac{\Delta p_{\text{M,dB}}(f_c, \Delta t_m)}{10}} - 1 \right].$$

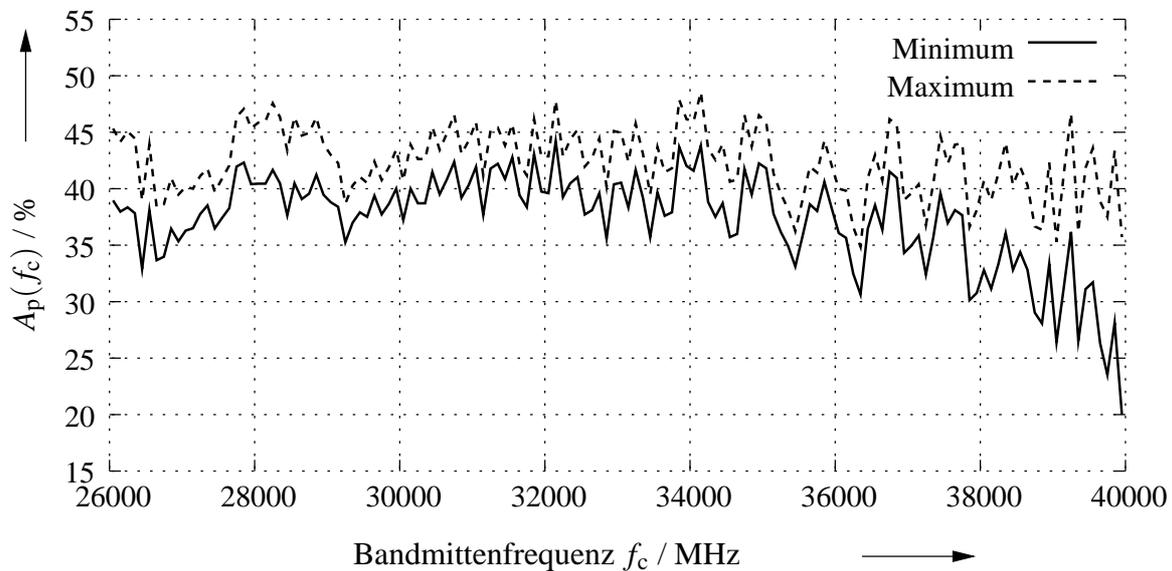


Bild 3.6: Prozentualer Anstieg $A_p(f_c)$ der Leistung der Wärmestrahlung eines TF1

Der prozentuale Anstieg $A_p(f_c)$ für das TF1 liegt im Wesentlichen zwischen 35 – 45%. Am Ende des Frequenzbereiches, also ab ca. 37 GHz, wird die Differenz zwischen $A_{p,\text{max}}(f_c)$ und $A_{p,\text{min}}(f_c)$ größer, was auch auf die schlechtere Leistungsfähigkeit dieser Messbereiche hinweist. Erstaunlich ist allerdings, dass sich – trotz der vergrößerten Differenz – der maximale prozentuale Anstieg $A_{p,\text{max}}(f_c)$ im Vergleich mit den anderen Messbereichen kaum ändert.

Eine Aussage, welche Messbereiche sich innerhalb des Frequenzintervalls 26 – 40 GHz am besten zur Detektion eines TF1 eignen, ist mit Hilfe der beschriebenen Messungen und deren Auswertungen nicht möglich. Allerdings ist in allen Messbereichen der Einfluss des Brandes deutlich erkennbar. Ein TF1 kann also in diesem Frequenzbereich durch die Messung der empfangenen Leistung $p_{\text{R,F}}(f, t)$ der Wärmestrahlung des Feuers detektiert werden.

In Bild 3.4 lassen sich noch weitere Unterschiede im Frequenzverhalten der gemessenen Leistung $p_{\text{M}}(f_c, t)$ erkennen. Diese sind kurz nach dem Maximum $p_{\text{M}}(f_c, t_m)$ der Leistung, also während des Übergangs zwischen Brennen und Glühen, zu beobachten. Die Leistung $p_{\text{M}}(f_c, t)$ in den Messbereichen 37.55 GHz, 37.65 GHz und 37.75 GHz fällt nach dem Maximum sofort

linear ab. In den Messbereichen 37.85 GHz und 37.95 GHz bleibt $p_M(f_c, t)$ zwischen $150 \leq k \leq 210$ nahezu konstant.

Ein deutlicherer Unterschied im Frequenzverhalten kann zwischen den beiden Messbereichen 36.55 GHz und 36.65 GHz beobachtet werden, deren empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ in Bild 3.7 über den Abtastwerten k dargestellt ist. Die von der Antenne empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ wird mit Hilfe der Kalibrierlast aus der gemessenen Leistung $p_M(f_c, t)$ nach Gleichung (2.4) berechnet. Ein Unterschied in der Leistungsdifferenz $\Delta p_R(f_c, \Delta t_m)$ zwischen Start- und Maximalleistung ist für diese Messbereiche ebenfalls zu beobachten. Interessanter ist aber der Bereich $k \geq 2000$ nach dem Maximum. Die empfangene Leistung $p_R(36.65 \text{ GHz}, t)$ fällt bis $k \approx 4500$ weniger stark ab als $p_R(36.55 \text{ GHz}, t)$. Zwischen $6000 \leq k \leq 8000$ schneiden sich die Kurven zweimal, bis deren Differenz wieder den Wert erreicht, den sie zu Beginn der Messung hatte.

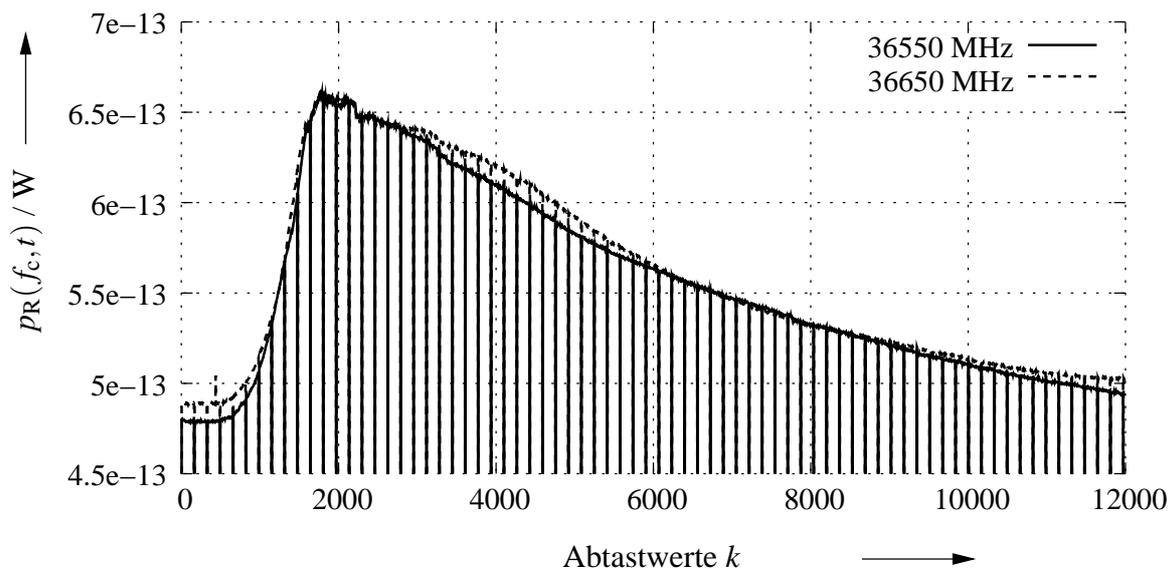


Bild 3.7: Empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF1 der Messbereiche 36.55 GHz und 36.65 GHz

Die Ursache für dieses Verhalten ist diesmal ausschließlich beim Feuer bzw. beim brennenden Material zu suchen, da es sich um relative Änderungen der empfangenen Leistung $p_R(f_c, t)$ handelt, wobei der Messaufbau die Identifizierung der Ursache nicht ermöglicht, so dass weitere Untersuchungen durchzuführen sind, die sich speziell mit der Erklärung der auftretenden

physikalischen Phänomene befassen.

Bild 3.8 stellt die mit Hilfe der Kalibrierlast korrigierte, empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ als Funktion der Zeit t für den Messbereich $f_c = 30.15 \text{ GHz}$ dar. Diese Darstellung ermöglicht die zeitliche Analyse der Leistung $p_R(f_c, t)$ der Wärmestrahlung. Die Zündung des Feuers fand bei $t = 39 \text{ s}$ statt. Sechseinhalb Minuten nach der Zündung erreicht $p_R(30.15 \text{ GHz}, t)$ sein Maximum. Zu dieser Zeit erloschen die Flammen und das übrige Buchenholz begann zu glühen. Sogar 40 Minuten nach der Zündung ist die empfangene Leistung $p_{R,F}(f_c, t)$ des glühenden Holzes noch deutlich in den Messkurven zu sehen.

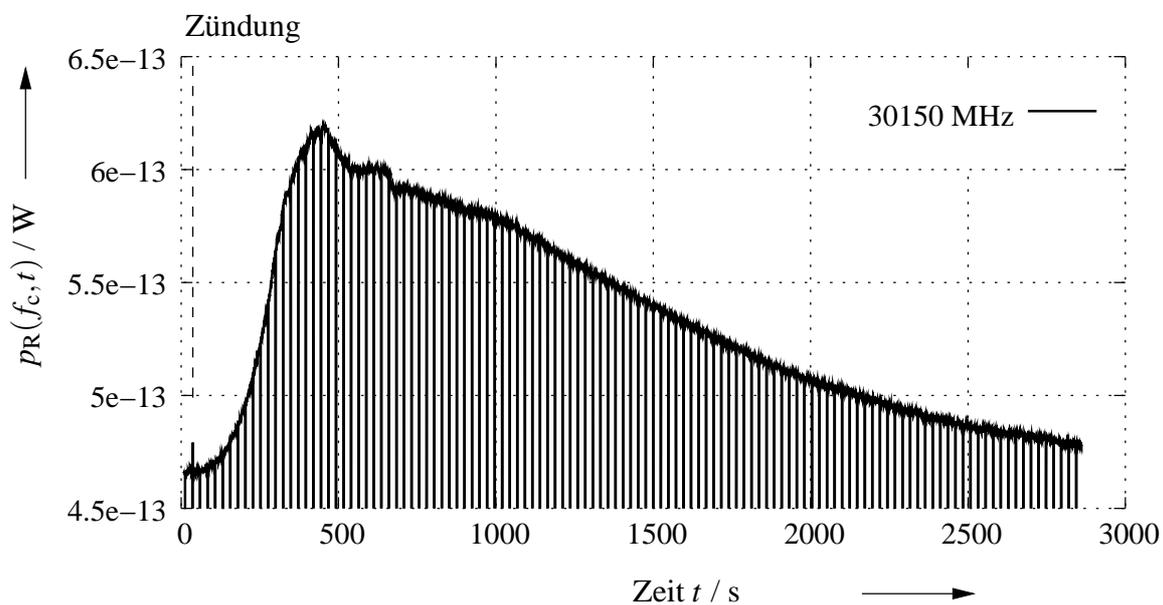


Bild 3.8: Empfangene Leistung $p_R(30.15 \text{ GHz}, t)$ eines TF1

Am interessantesten für die automatische Brandentdeckung ist aber der Zeitraum kurz nach der Zündung. Bild 3.9 stellt diesen Bereich mit größerer Auflösung dar. Zum Zündzeitpunkt bei $t = 39 \text{ s}$ ist eine Signalspitze erkennbar, die durch die automatische Zündvorrichtung erzeugt wurde. Die Zündvorrichtung besteht aus Schieß- oder Kolophoniumbaumwolle und einem Heizdraht, der an ein Netzgerät angeschlossen ist. Das Netzgerät wird durch einen Schalter aus dem Beobachtungsraum des Brandentdeckungslabors betätigt, worauf der Heizdraht die Schießbaumwolle aufheizt. Bei einer bestimmten Temperatur explodiert die Schießbaumwolle und die entstehenden Funken zünden das Feuer. Die zeitliche Auflösung des Mess-Systems

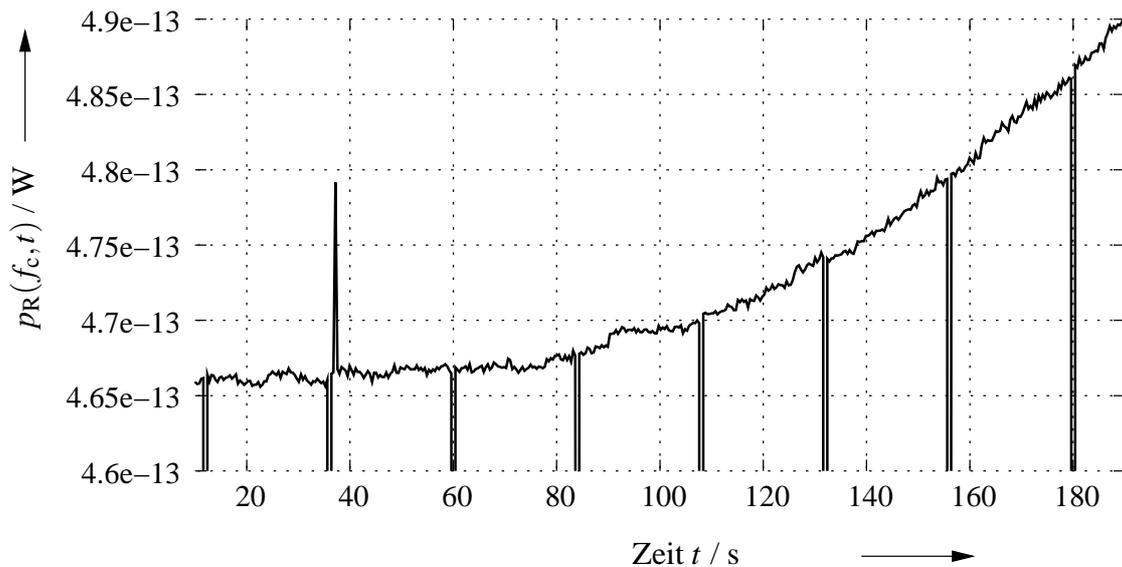


Bild 3.9: Empfangene Leistung $p_R(30.15\text{ GHz}, t)$ eines TF1 in der Anfangsphase

ist ausreichend, um diese Explosion zu erfassen. Ab ca. $t = 80\text{ s}$ ist ein leichter Anstieg in $p_R(30.15\text{ GHz}, t)$ zu beobachten, der 10 Sekunden später noch deutlicher wird. Der Einfluss des Feuers auf die empfangene Leistung $p_R(30.15\text{ GHz}, t)$ lässt sich also schon ca. 60 s nach der Zündung beobachten.

Bild 3.10 stellt für das TF1 die äquivalente Temperatur

$$T_R = \frac{p_R(30.15\text{ GHz}, t)}{k\Delta f}$$

dar, d. h. T_R ist die Temperatur, die ein thermisch rauschender Widerstand annehmen müsste, um innerhalb der Bandbreite Δf die Rauschleistung $p_R(f_c, t)$ zu erzeugen. Diese Temperatur T_R kann in erster Näherung als die physikalische Temperatur eines schwarzen Körpers aufgefasst werden und ist damit – bis auf den unbekanntem Emissionsgrad $w_\varepsilon(f, T_F)$ – eine grobe Abschätzung der Holztemperatur.

Wie in Abschnitt 2.2 gesagt, kann das Mess-System nur relative Veränderungen in der empfangenen Leistung $p_R(f_c, t)$ messen. Der absolute Leistungswert wird nicht kalibriert und ist daher ungenau. Dies hat zur Folge, dass der Startwert der äquivalenten Temperatur T_R bei ca. 340 K liegt. Das Maximum von T_R nimmt einen Wert von ca. 450 K an, somit ergibt sich eine Differenz von etwa 110 K. In der Literatur [53] wird die Holztemperatur bei der Verbrennung zwischen 500 – 550 K angegeben, was einer Temperaturdifferenz von 210 – 260 K zur

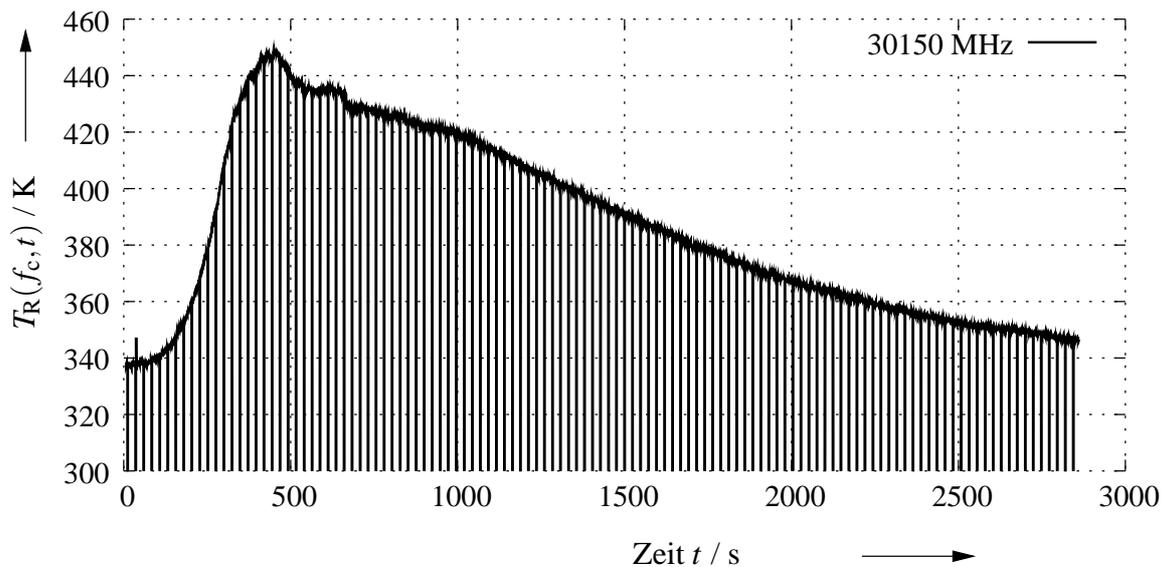


Bild 3.10: Äquivalente Temperatur $T_R(30.15 \text{ GHz}, t)$ eines TF1

Raumtemperatur (290 K) entspricht. Die mit dem Mess-System ermittelte Temperaturdifferenz ist kleiner. Die Abweichung ist dadurch zu erklären, dass die äquivalente Temperatur T_R nur näherungsweise mit der physikalischen Temperatur des Holzes übereinstimmt und dass dabei der Emissionsgrad des Holzes berücksichtigt werden müsste. Ferner ist zu beachten, dass der Messaufbau nicht geeignet ist, um die Verbrennungseigenschaften des Holzes beliebig genau zu ermitteln. So hat die geometrische Ausdehnung der Antennenhauptkeule zur Folge, dass sich das beobachtete Holz in unterschiedlichen Verbrennungsphasen befindet und eine räumliche Mittelung der Temperatur vorgenommen wird. Dies führt auf eine Temperaturdifferenz, die kleiner ist, als laut Literatur zu erwarten wäre.

Dieses Beispiel zeigt, dass zur Ermittlung der Materialeigenschaften während eines Brandes besondere Versuchsbedingungen erfüllt werden müssen. Da weder die Testbrände noch der hier verwendete Versuchsaufbau zur Bestimmung der Verbrennungseigenschaften von bestimmten Materialien konzipiert wurden, sind quantitative Aussagen darüber nur sehr eingeschränkt möglich. Aufgrund der hier erzielten Messergebnisse scheint es allerdings lohnenswert das Verhalten von typischen Materialien bei Verbrennungen mit Hilfe der emittierten Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich zu untersuchen.

3.3.2 Testfeuer 2

Das TF2 ist ein Pyrolyse-Schwelbrand. Bei diesem Brand wird Buchenholz ringsherum auf einer Heizplatte verteilt. Die Heizplatte wird dann in ca. 11 min von Raumtemperatur auf 600°C geheizt und hält diese Temperatur für 4 min.

Bild 3.11 stellt die Projektion der Hauptkeule auf eine Ebene, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung im Abstand d steht, dar. Die Brandfläche des TF2 ist ebenfalls auf diese Fläche projiziert. Die Hauptkeule liegt nicht mehr vollständig in der Brandfläche. Der Füllfaktor ergibt sich daher zu $w_F(f) = 0.46$.

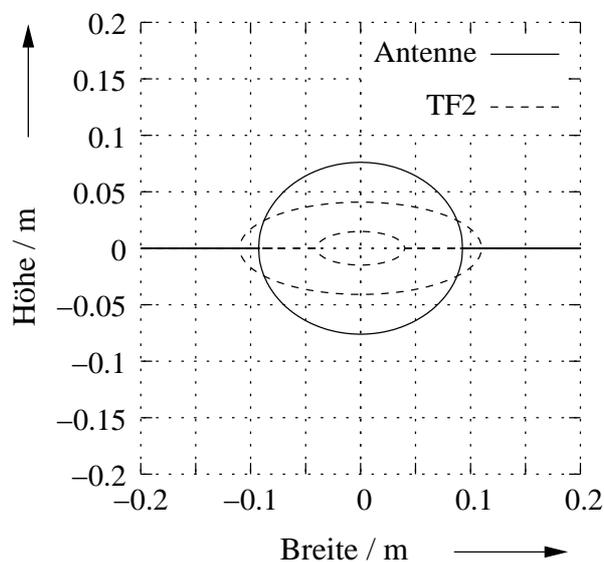


Bild 3.11: Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Fläche des Testfeuers TF2

Bild 3.12 stellt die Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,\text{dB}}(f_c, \Delta t)$ der Wärmestrahlung der Messbereiche zwischen $27.05 - 27.45\text{ GHz}$ über den Abtastwerten k dar. Die Kurvenverläufe, die sich in den anderen Messbereichen ergeben, sind den dargestellten sehr ähnlich und werden deshalb hier nicht gezeigt. Die Heizplatte wurde bei $k \approx 280$ eingeschaltet. Danach steigt die Leistung $p_M(f_c, t)$ linear bis zu ihrem Maximum bei ca. $k = 400$ an. Nach dem Maximum fällt die Kurve ebenfalls linear ab, aber mit einer anderen Steigung als zuvor. Die maximale Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,\text{dB}}(f_c, \Delta t_m)$ zwischen der Start- und der Maximalleistung ist sehr viel kleiner als beim TF1. Beim TF2 werden aber nur 210 cm^3 Holz verschwelt, hingegen werden 36000 cm^3 Buchenholz

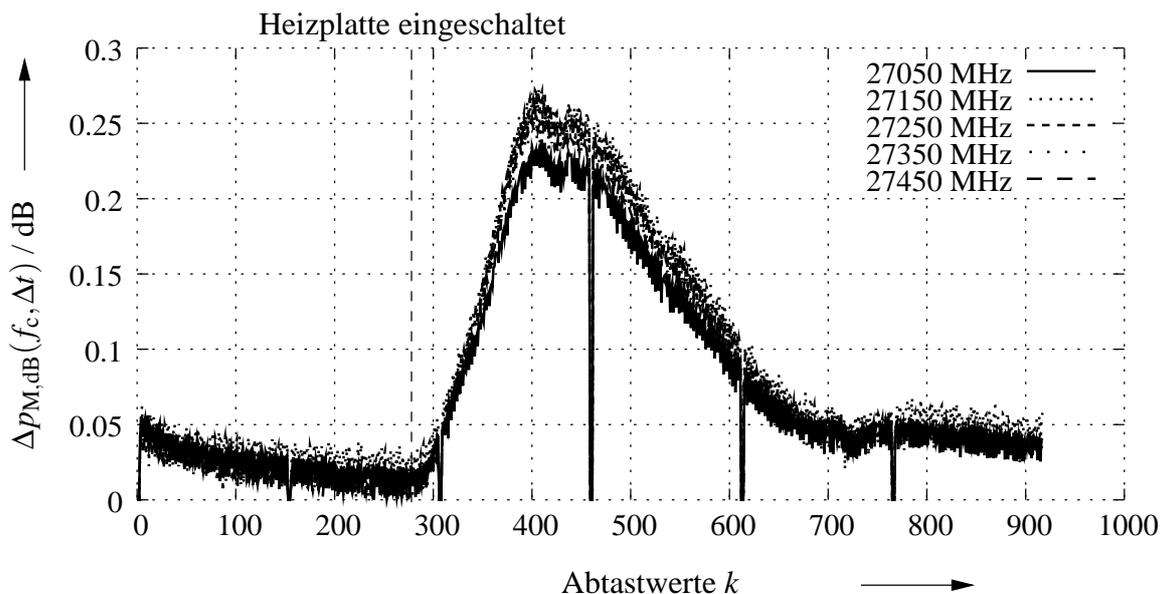


Bild 3.12: Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF2 der Messbereiche zwischen 27.05 – 27.45 GHz

beim TF1 verbrannt. Der Füllfaktor $w_F(f)$ des TF2 ist ferner nur etwa halb so groß als der des TF1, deshalb ist die verminderte maximale Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t_m)$ im Fall des TF2 durch den unterschiedlichen Messaufbau begründbar.

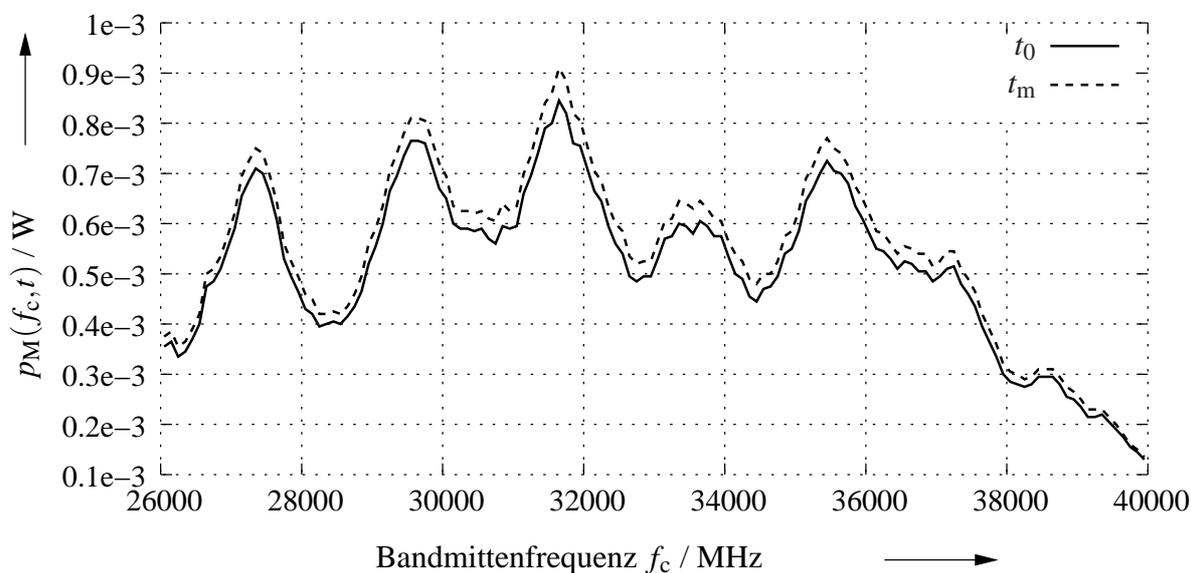


Bild 3.13: Startleistung $p_M(f_c, t_0)$ und Maximalleistung $p_M(f_c, t_m)$ eines TF2

Bild 3.13 zeigt die Startleistung $p_M(f_c, t_0)$ und die Maximalleistung $p_M(f_c, t_m)$ für das TF2

über der Bandmittenfrequenz f_c der Messbereiche aufgetragen. Die Kurvenverläufe sind den Verläufen des TF1 (siehe Bild 3.5) sehr ähnlich. Diese Kurven repräsentieren im Prinzip das Verstärkungsverhalten $G_{MS}(f)$ des Mess-Systems, daher sollten auch keine Unterschiede durch die Art des Testbrandes hervorgerufen werden, was durch Bild 3.13 bestätigt wird. Die deutlich geringere Differenz $\Delta p_M(f_c, \Delta t_m)$ zwischen Start- und Maximalleistung im Fall des TF2 ist auch in diesem Diagramm zu beobachten.

Bild 3.14 zeigt die prozentualen Anstiege $A_{p,\min}(f_c)$ und $A_{p,\max}(f_c)$ für das TF2. Der prozentuale Anstieg $A_p(f_c)$ schwankt zwischen 2 – 10% innerhalb des Bereiches von 26.0 – 37.0GHz. In den Messbereichen mit Frequenzen $f_c > 37.0$ GHz wird der minimale prozentuale Anstieg $A_{p,\min}(f_c)$ sogar negativ. Dies bedeutet, dass die doppelte Ableseungenauigkeit 2Δ größer ist als die messbare Leistungssteigerung $\Delta p_M(f_c, \Delta t_m)$. Auch beim TF2 lässt sich kein Messbereich finden, der zur Detektion besser geeignet ist als die anderen.

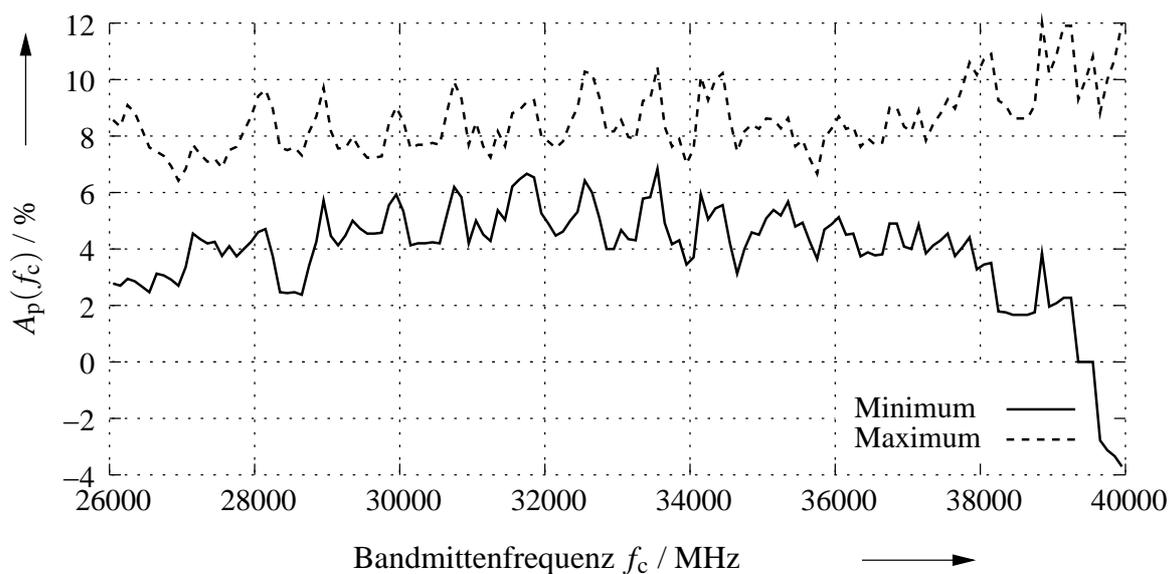


Bild 3.14: Prozentualer Anstieg $A_p(f_c)$ der Leistung der Wärmestrahlung eines TF2

Bild 3.15 stellt die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF2 für die beiden Messbereiche 34.55 GHz und 34.65 GHz dar. Die Leistungssprünge gegen Ende der Messung sind darauf zurückzuführen, dass das restliche Holz aus dem Fokus des Mess-Systems entfernt wurde.

Nur im Bereich um $k \approx 3300$ ist ein kleiner Unterschied im zeitlichen Verlauf der Leistung

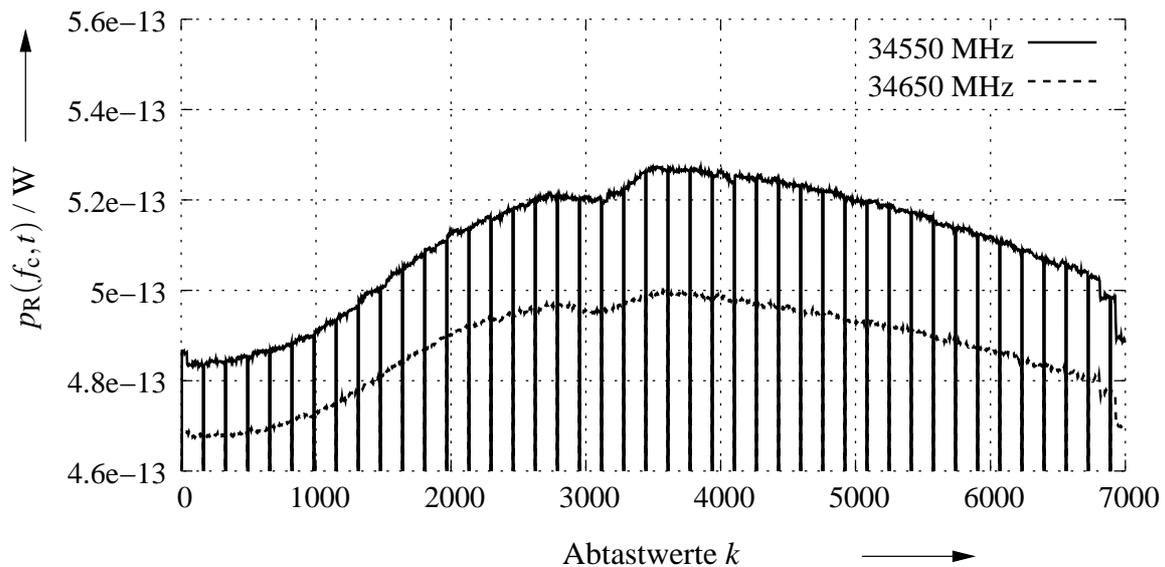


Bild 3.15: Empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF2 der Messbereiche 34.55 GHz und 34.65 GHz

$p_R(f_c, t)$ der verschiedenen Messbereiche zu beobachten. Die Steigung von $p_R(34.55 \text{ GHz}, t)$ ist zwischen $3100 \leq k \leq 3500$ etwas größer als für die Leistung $p_R(34.65 \text{ GHz}, t)$. Sonst sind aber keine Unterschiede im Zeitverhalten der Leistung $p_R(f_c, t)$ für die beiden Messbereiche zu beobachten. Dies gilt für alle Messbereiche im Frequenzbereich zwischen 26 – 40 GHz.

Bild 3.16 stellt die korrigierte Leistung $p_R(31.75 \text{ GHz}, t)$ eines TF2 über der Zeit t dar. Die Heizplatte wurde 50 s nach Beginn der Messung eingeschaltet. Ab $t \approx 150$ s lässt sich ein Anstieg in $p_R(31.75 \text{ GHz}, t)$ beobachten, was einer Reaktionszeit von ca. 100 s entspricht. Bei $t = t_m \approx 710$ s erreicht $p_R(31.75 \text{ GHz}, t)$ sein Maximum. Dies korrespondiert mit der Steuerung der Heizplatte, die in 11 Minuten auf 600°C heizt und dann ca. 4 Minuten diese Temperatur hält. Anhand der der empfangenen Leistung $p_R(31.75 \text{ GHz}, t)$ der Wärmestrahlung des Holzes kann also das Regelverhalten der Heizplatte – abgesehen von einer kleinen Verzögerung – wiedergefunden werden, denn bei ca. $t = 1000$ s fällt die Leistung $p_R(31.75 \text{ GHz}, t)$ der Wärmestrahlung nahezu linear ab. Am Ende der Messung, bei ca. $t = 2050$ s, wurde das restliche Holz entfernt, was zu einem Sprung in $p_R(31.75 \text{ GHz}, t)$ führt, da die Heizplatte keinen Beitrag zur empfangenen Leistung im Mikrowellenbereich leistet.

Durch Vergleich mit Bild 3.15 wird ein Unterschied im zeitlichen Verhalten der empfan-

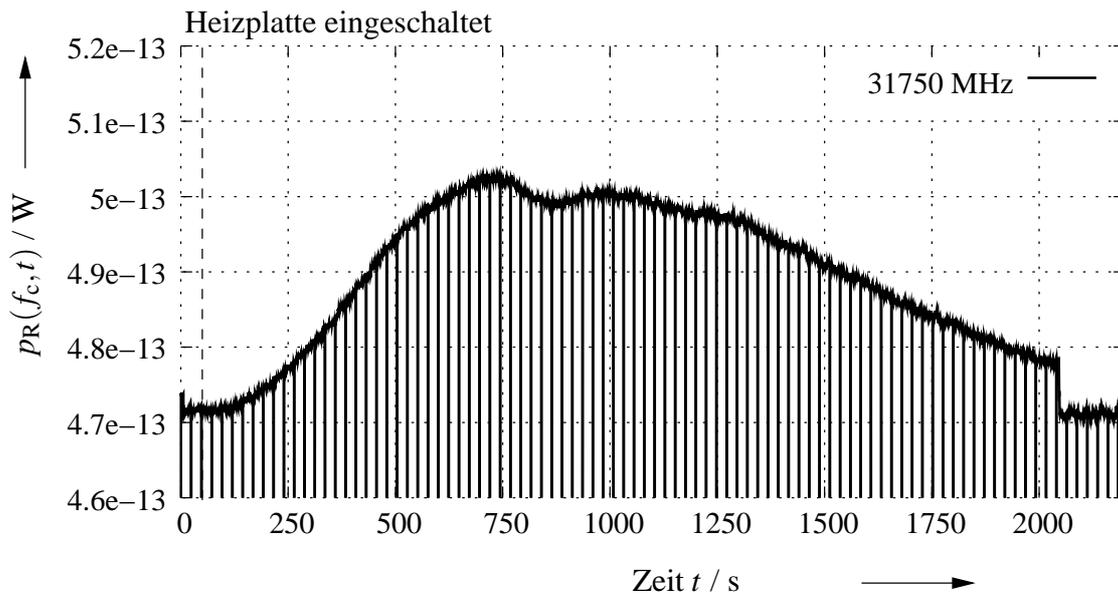


Bild 3.16: Empfangene Leistung $p_R(31.75 \text{ GHz}, t)$ eines TF2

genen Leistung $p_R(f_c, t)$ zwischen zwei Versuchen des gleichen Testfeuers deutlich. Dort liegt das Maximum $p_R(f_c, t_m)$ erst im Bereich des Überschwingens bei ca. $k = 3500$. Dieser Unterschied wird möglicherweise durch schwankende Umwelteinflüsse wie die Raumtemperatur oder den unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalt des verwendeten Holzes hervorgerufen. Diese schwer zu kontrollierenden Versuchsbedingungen führen auch bei den herkömmlichen Messverfahren der automatischen Brandentdeckung zu Schwankungen der Messgrößen. Daher sind Reproduktionsbedingungen für diese Größen eingeführt worden, und nur wenn ein Testbrand diese Reproduktionsbedingungen einhält, ist er gültig und darf mit anderen Bränden verglichen werden. Die Messung der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich liefert den Temperaturverlauf des Brandmaterials und könnte daher als weitere Größe zur Überprüfung der Reproduktionsbedingungen dienen.

Bild 3.17 zeigt die normierten Messwerte der Ionisationskammer-, Durchlicht- und Gaskonzentrationsmessungen. Erst 6 Minuten nach Einschalten der Heizplatte lassen sich Reaktionen in den Messwerten beobachten. Dies ist ca. 4 Minuten später als bei der Leistungsmessung der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich. Die Ursache dafür ist, dass durch die Leistungsmessung im Mikrowellenbereich die Temperaturentwicklung des sich erwärmenden Holzes verfolgt wird. Dagegen messen die herkömmlichen Verfahren die Rauchdichte bzw. die Kon-

zentration spezieller Brandgase. Das Holz muss dazu aber so weit erhitzt werden, dass Rauch und Gase produziert werden. Ferner muss die Thermik des Brandes ausreichen, um den Rauch und die Gase zu den Messgeräten, die unterhalb der Decke montiert sind, zu transportieren.

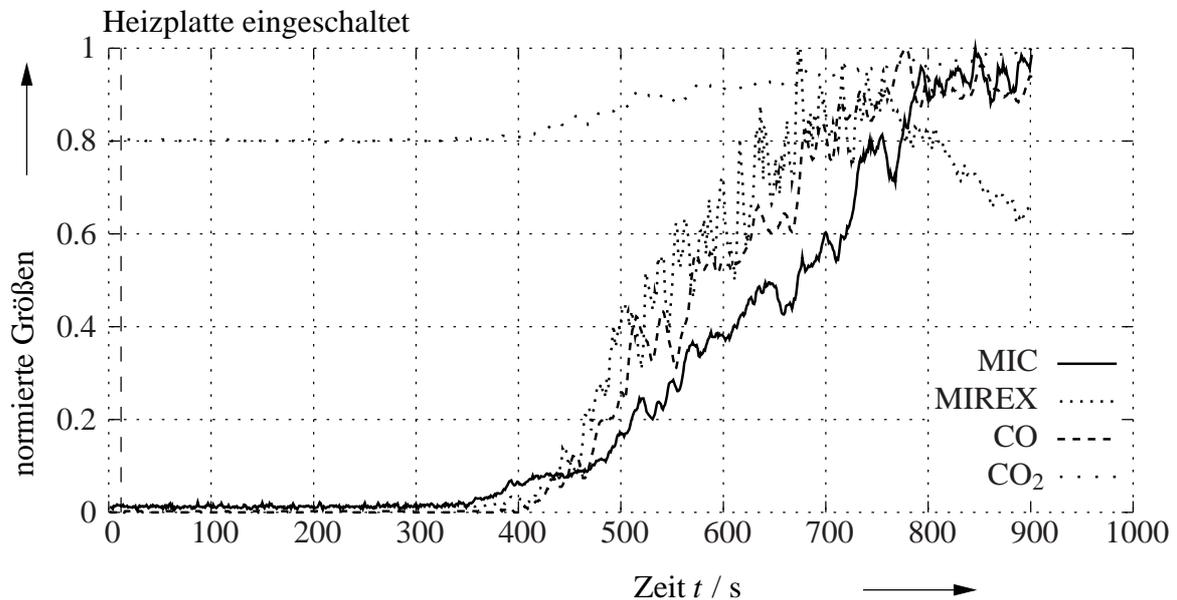


Bild 3.17: Normierte Ionisationskammer- (MIC), Durchlicht- (Mirex) und Gasmesswerte (CO und CO₂) eines TF2

Bild 3.18 stellt die Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF2 für einen geänderten Versuchsaufbau dar. Dabei wurde eine Deckenplatte zwischen den Brandort und das Mess-System gestellt, so dass die Wärmestrahlung durch eine künstliche Decke hindurch gemessen wurde. Die Deckenplatte besteht aus Mineralwolle, die sich hauptsächlich aus Sand, Altglas und Kalk zusammensetzt. Die verwendete Deckenplatte war 2 cm dick. Ein Vergleich der Ergebnisse mit Bild 3.12 ergibt, dass die maximale Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ bei vorhandener Deckenplatte mit 0.18 dB kleiner ist als ohne Deckenplatte, wo $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t) = 0.25$ dB betrug. Prinzipiell lässt sich der Einfluss der Deckenplatte auf die gemessene Leistung $p_M(f_c, t)$ über Gleichung (1.12) beschreiben. Allerdings ist dazu die Kenntnis des Absorptionskoeffizienten $w_\alpha(f)$ notwendig, was für die verwendete Mineralwolle nicht der Fall ist. Der Einfluss der Frequenzabhängigkeit von $w_\alpha(f)$ wird im Messbereich 27.45 GHz deutlich. $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ beträgt dort nur 0.13 dB, was wahrscheinlich durch Resonanzphänomene der Mineralwolle erklärbar ist. Um diese Vermutung zu überprüfen, ist eine Messung von $w_\alpha(f)$ für die verwendete Mine-

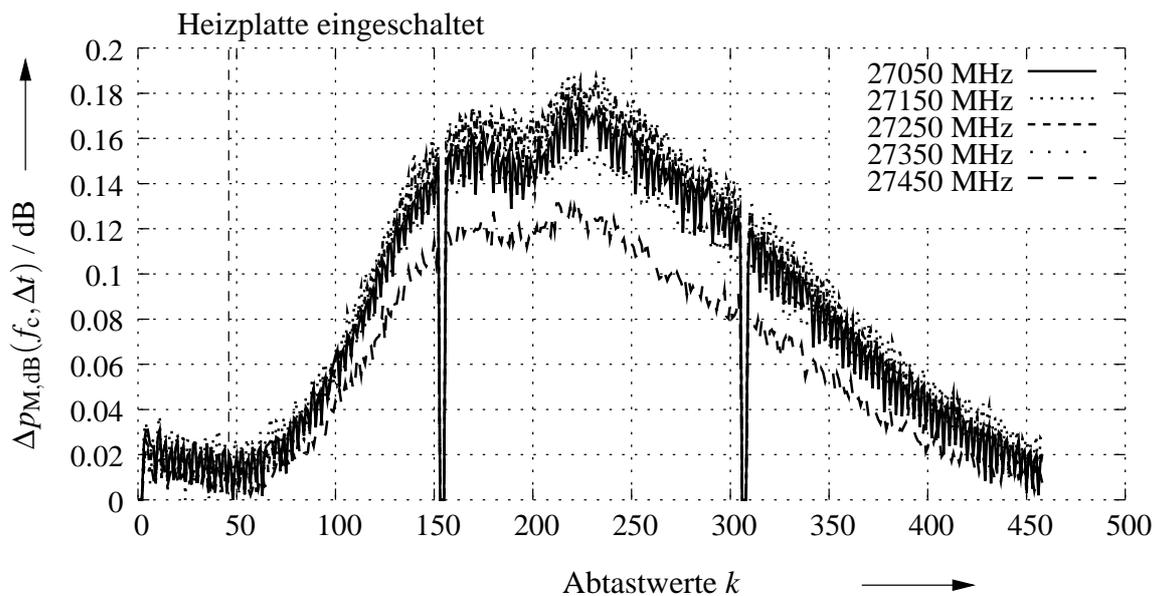


Bild 3.18: Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF2 der Messbereiche zwischen 27.05 – 27.45 GHz hinter einer Deckenplatte

ralwolle nötig, die auch Rückschlüsse auf die Ursache der Absorption erlaubt. Das Fazit, dass Brandentdeckung durch nichtleitende Materialien wie Wände oder Deckenplatten möglich ist, soll hier aber genügen.

3.3.3 Testfeuer 2neu

Das Testfeuer TF2neu unterscheidet sich in der Menge und den Abmessungen der verwendeten Holzquader vom alten Testfeuer TF2. Dort wurden 30 Holzquader mit den Abmessungen $1\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 3.5\text{ cm}$ verwendet. Das TF2neu besteht aus 12 Holzquadern mit den Abmessungen $2\text{ cm} \times 2.5\text{ cm} \times 7.5\text{ cm}$, was einer Menge von 450 cm^3 entspricht. Beim TF2neu wird also mehr als doppelt soviel Holz verwendet als beim alten TF2. Beim TF2 wurde das Holz aber besser über der Heizplattenfläche verteilt als beim TF2neu. Der Füllfaktor des TF2neu ist somit etwas kleiner als beim TF2.

Bild 3.19 stellt die Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ der Messbereiche zwischen 32.35 – 32.75 GHz über den Abtastwerten k dar.

Der Verlauf der Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ innerhalb der anderen Messbereiche zwi-

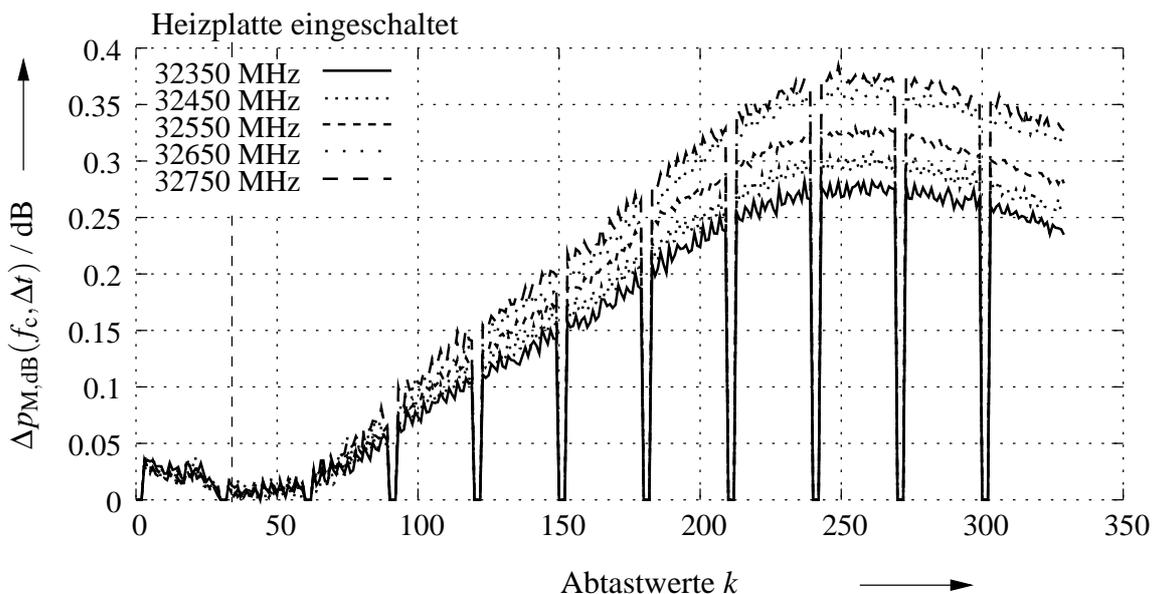


Bild 3.19: Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF2neu der Messbereiche zwischen 32.35 – 32.75 GHz

schen 26 – 40 GHz ist dem dargestellten Verlauf sehr ähnlich und wird daher nicht gezeigt. Bei $k \approx 34$ wurde die Heizplatte eingeschaltet. Die Leistung $p_M(f_c, t)$ steigt danach in allen Bereichen nahezu linear bis zum Maximum $p_M(f_c, t_m)$ bei ca. $k = 250$ an. Anschließend fallen die Kurven wieder ab. Vergleicht man $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ des TF2neu mit der Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ des alten TF2 aus Bild 3.12, fällt auf, dass $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ hier langsamer ansteigt als beim TF2. Die maximale Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t_m)$ wurde dort bereits nach ca. $k = 120$ Abtastwerten erreicht.

Die aus der Startleistung $p_M(f_c, t_0)$ bzw. der Maximalleistung $p_M(f_c, t_m)$ ermittelte Gesamtverstärkung $G_{MS}(f)$ des Mess-Systems für das TF2neu ist der Gesamtverstärkung $G_{MS}(f)$ aus Bild 3.13 für das TF2 so ähnlich, dass auf deren Darstellung verzichtet wird. Bild 3.20 zeigt stattdessen die prozentualen Anstiege $A_{p,min}(f_c)$ bzw. $A_{p,max}(f_c)$. Diese Kurven sehen denen des TF2 aus Bild 3.14 ebenfalls sehr ähnlich. Der prozentuale Anstieg $A_p(f_c)$ liegt innerhalb der Messbereiche zwischen 26 – 37 GHz wieder zwischen 2 – 10%. Zwischen 37 – 40 GHz ist die doppelte Ablesegenauigkeit 2Δ wieder so groß, dass $A_{p,min}(f_c)$ null oder sogar negativ wird, obwohl die Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ in diesen Messkurven deutlich sichtbar ist. Auch für das TF2neu gilt, dass kein Messbereich gefunden wurde, der sich zur Detektion eines TF2 besser eignet als andere Messbereiche.

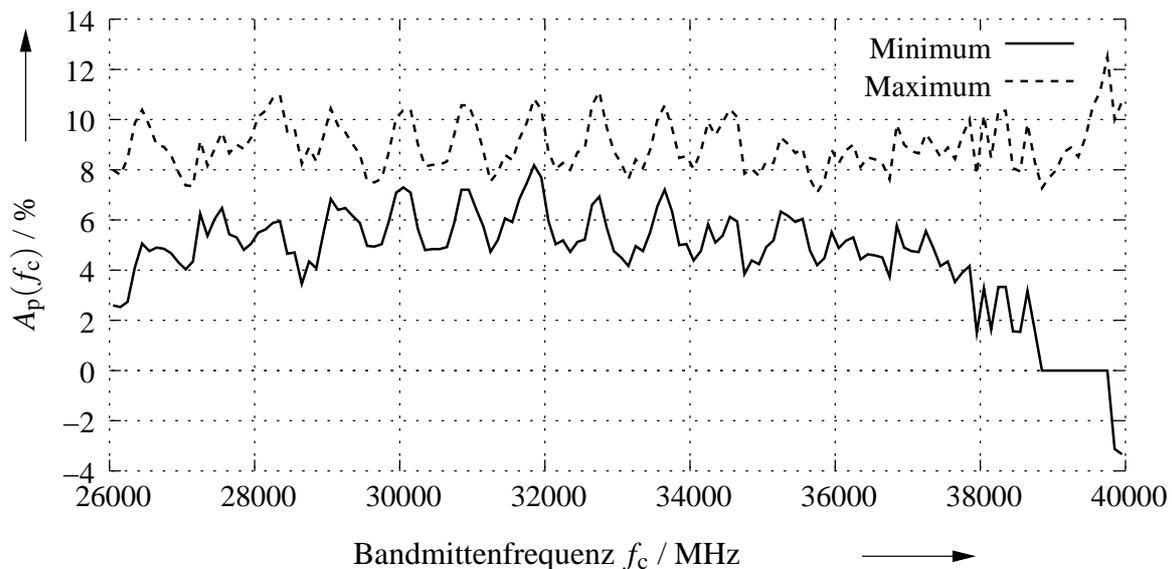


Bild 3.20: Prozentualer Anstieg $A_p(f_c)$ der Leistung der Wärmestrahlung eines TF2neu

Bild 3.21 stellt das zeitliche Verhalten der empfangenen Leistung $p_R(37.05 \text{ GHz}, t)$ der Wärmestrahlung eines TF2neu dar. Die empfangene und mit Hilfe der Kalibrierlast korrigierte Leistung $p_R(37.05 \text{ GHz}, t)$ ist über der Zeit t aufgetragen. Die Heizplatte wurde 28 s nach dem Beginn der Messung eingeschaltet. Bei ca. 200 s kann bei dem TF2neu ein Anstieg in $p_R(37.05 \text{ GHz}, t)$ beobachtet werden, was einer Reaktionszeit von ca. 3 Minuten entspricht. Dies ist deutlich langsamer als die Reaktionszeit beim alten TF2, die 90 s betrug. Bei $t = t_m \approx 1450 \text{ s}$ wird das Maximum $p_R(37.05 \text{ GHz}, t_m)$ der Leistung erreicht, und ein nahezu linearer Abfall von $p_R(37.05 \text{ GHz}, t)$ beginnt bei ca. $t = 1600 \text{ s}$. Bei $t \approx 2400 \text{ s}$ wurde das restliche Holz aus dem Fokus des Mess-Systems entfernt. Diese Messung zeigt, dass das Maximum $p_R(37.05 \text{ GHz}, t_m)$ der Leistung ca. 23 Minuten nach der Zündung erreicht wird. Zu diesem Zeitpunkt ist die Heizplatte schon seit 8 Minuten ausgeschaltet und kühlt sich ab. Die physikalischen Ursachen, die zu diesem Verhalten führen, lassen sich mit diesem Messaufbau nicht erforschen; wahrscheinlich bildet sich aber ein höhenabhängiges Temperaturprofil in den Holzquadern aus, da die Masse der einzelnen Holzquader so groß ist, dass diese nicht mehr den Zustand des thermischen Gleichgewichts erreichen. Ferner wird den Holzquadern auch nach Abschalten der Heizplatte Energie zugeführt, da sich die Platte nur langsam abkühlt. Diese Energie, zusammen mit der durch den Pyrolyseprozess in den Holzquadern freigesetzte Energie, reicht aus, um den Pyrolyseprozess für einige Zeit weiterzuführen.

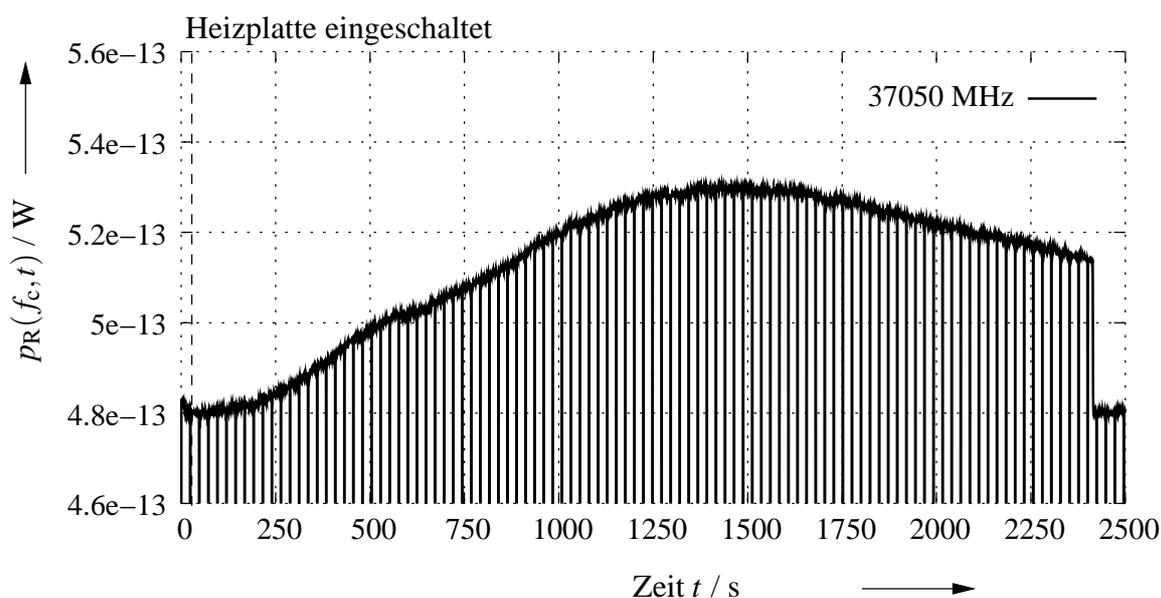


Bild 3.21: Empfangene Leistung $p_R(37.05 \text{ GHz}, t)$ eines TF2neu

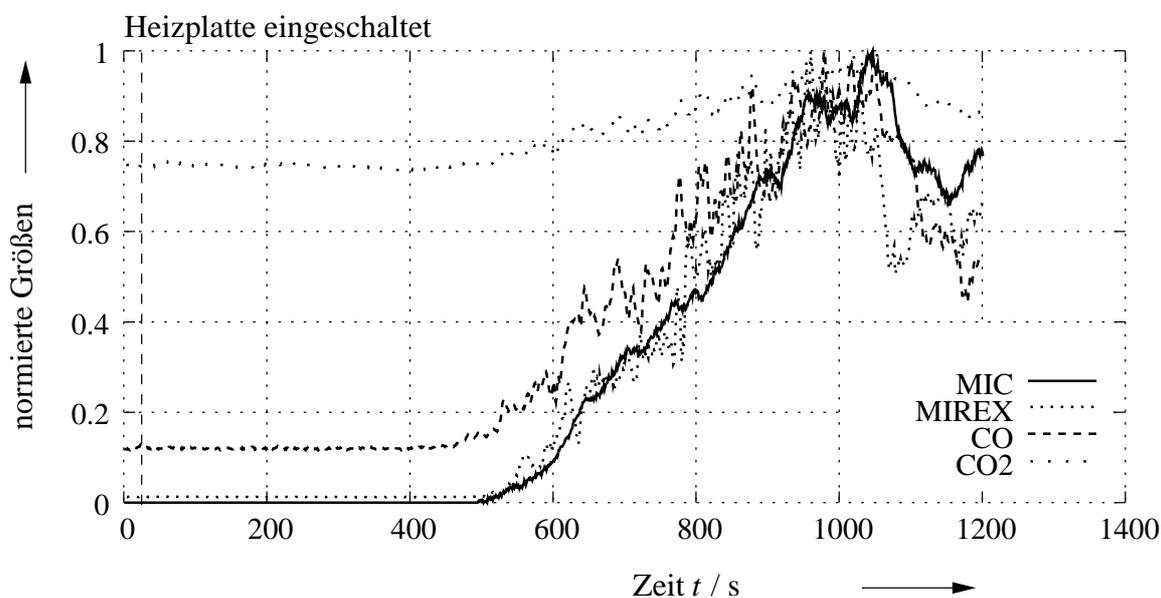


Bild 3.22: Normierte Ionisationskammer- (MIC), Durchlicht- (Mirex) und Gasmesswerte (CO und CO₂) eines TF2neu

Ein Vergleich der Reaktionszeit der Leistungsmessung eines TF2neu mit der Reaktionszeit der herkömmlichen Messverfahren in der automatischen Branddetektion, wie sie in Bild

3.22 dargestellt sind, ergibt, dass die Reaktionszeiten der Ionisationskammer-, Durchlicht-, und Gaskonzentrationsmessverfahren ca. 7 Minuten betragen und damit ca. 4 Minuten länger sind als beim TF2. Die Differenz der Reaktionszeiten zwischen den herkömmlichen Verfahren und der Leistungsmessung der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich ist beim TF2neu also wieder in derselben Größenordnung wie beim alten TF2. Ferner dauert der Pyrolyseprozess beim TF2neu länger als beim alten TF2, was wahrscheinlich daran liegt, dass beim alten TF2 das Holz gleichmäßiger über der Heizplatte verteilt ist und so insgesamt gleichmäßiger erhitzt wird.

3.3.4 Testfeuer 3

Das Testfeuer TF3 ist ein Baumwoll-Lunten-Schwelbrand. Dabei werden zwischen 90 und 104 Lunten mit einer Länge von 80 cm am unteren Ende erhitzt, so dass sie zu glühen beginnen. Die Glut wandert dann langsam die Lunten herauf, bis diese komplett verschwelt sind.

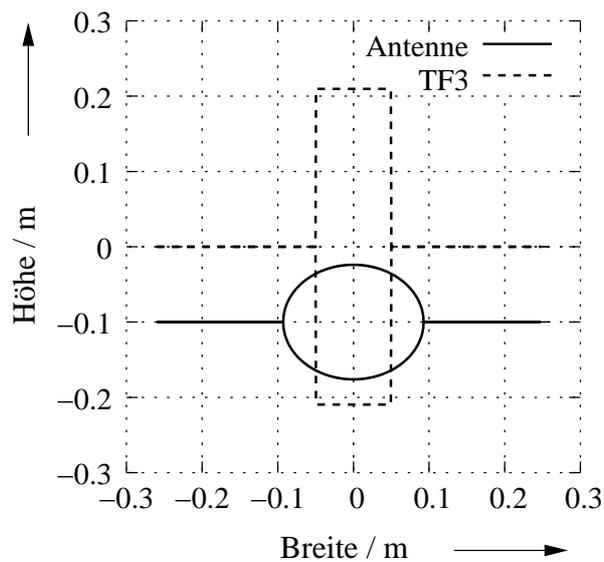


Bild 3.23: Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Fläche des Testfeuers TF3

Bild 3.23 stellt wieder die Projektion der Hauptkeule auf eine Ebene, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung im Abstand d steht, dar. Die Brandfläche des TF3 ist ebenfalls auf diese Fläche projiziert. Die Hauptkeule ist auf das untere Drittel der Lunten gerichtet. Der Füllfaktor ergibt sich zu $w_F(f) = 0.63$. Dieser Füllfaktor bezieht sich auf die Ausdehnung der Lunten

innerhalb der Hauptkeule. Da die glühende Fläche nur einen Bruchteil der Baumwoll-Lunten ausmacht, ist der wahre, also auf die Glut bezogene, Füllfaktor $w_F(f)$ wesentlich kleiner. Da die exakte Ausdehnung der Glut aber nicht bekannt ist, kann der Füllfaktor nur nach oben hin abgeschätzt werden.

Bild 3.24 stellt die Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ der Messbereiche zwischen 33.55 – 33.95 GHz über den Abtastwerten k dar. Es fällt auf, dass sich die Kurvenverläufe für die gezeigten Messbereiche sehr ähnlich sehen. Dies ist im ganzen Frequenzbereich 26 – 40 GHz zu beobachten, daher wird auf die Darstellung der anderen Messbereiche verzichtet.

Bei $k \approx 52$ wurden die Lunten aufgeheizt. Dieser Vorgang kann einige Minuten in Anspruch nehmen, deshalb kann nicht von einem exakten Zündzeitpunkt gesprochen werden.

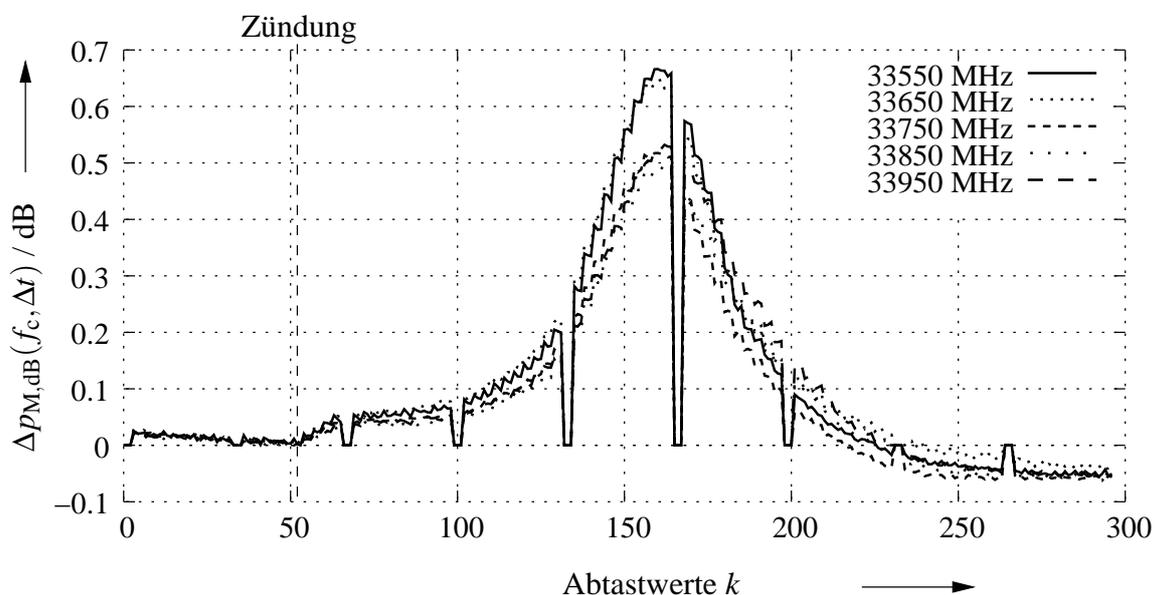


Bild 3.24: Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF3 der Messbereiche zwischen 33.55 – 33.95 GHz

Kurze Zeit später ist eine geringe Erhöhung der Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ zu beobachten. Nach ca. $k = 100$ steigt $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ stärker an und erreicht bei $k \approx 160$ das Maximum. Bis ca. $k = 225$ fällt $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ wieder ab. Die Kurven sind bezogen auf die maximale Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t_m)$ nahezu symmetrisch. Die Ursache dafür liegt darin, dass sich der Ort des Brandes mit der Zeit t verändert, er wandert nach oben. Das Mess-System fokussiert aber nur einen Punkt im unteren Drittel der Lunten. Die Kurven zeigen also den Durchlauf

des Brandes durch den Fokus des Mess-Systems. Sie geben keine Auskunft über den zeitlichen Verlauf der empfangenen Leistung $p_{R,F}(f_c, t)$ dieses Testfeuers.

Außerdem fällt auf, dass die maximale Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, t_m)$ zwischen Start- und Maximalleistung in einigen Messbereichen größer ist als in anderen Messbereichen. Beispielsweise ist $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t_m)$ im Messbereich 33.55 GHz um mehr als 0.1 dB größer als in den Messbereichen 33.85 GHz und 33.95 GHz. Bild 3.25 zeigt den maximalen und minimalen prozentualen Anstieg $A_{p,\min}(f_c)$ bzw. $A_{p,\max}(f_c)$ der gemessenen Leistung $p_M(f_c, t)$ eines TF3. Der prozentuale Anstieg $A_p(f_c)$ schwankt in den Messbereichen 26 – 37 GHz zwischen 10 – 20%.

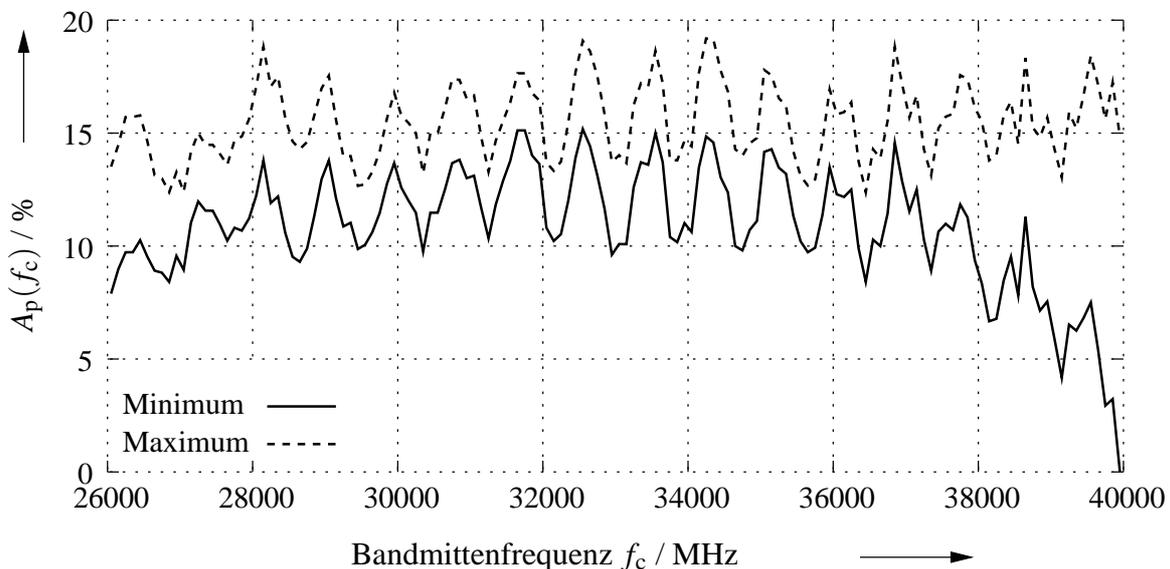


Bild 3.25: Prozentualer Anstieg $A_p(f_c)$ der Leistung der Wärmestrahlung eines TF3

Der prozentuale Anstieg $A_p(f_c)$ des TF3 ist damit größer als für beide Varianten des 2. Testfeuers, TF2 bzw. TF2neu, aber kleiner als $A_p(f_c)$ des TF1. Bei den Messbereichen zwischen 37 – 40 GHz ist wieder der Abfall des minimalen prozentualen Anstiegs $A_{p,\min}(f_c)$ zu beobachten, der durch die schlechtere Leistungsfähigkeit des Mess-Systems verursacht wird. Eine sichtbare Differenz $\Delta p_R(f_c, \Delta t_m)$ ist in der empfangenen Leistung $p_R(f_c, t)$ dieser Messbereiche aber trotzdem vorhanden, wie das folgende Bild zeigt.

Bild 3.26 stellt die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF3 für die beiden Messbereiche 39.15 GHz und 39.25 GHz dar. Die beiden Kurven unterscheiden sich nur in der Größe der

maximalen Leistungsdifferenz $\Delta p_R(f_c, \Delta t_m)$, die für den Messbereich 39.25 GHz geringfügig größer ist. Andere frequenzabhängige Unterschiede im zeitlichen Verlauf der empfangenen Leistung $p_R(f_c, t)$ sind weder hier noch in der gemessenen Leistung $p_M(f_c, t)$ der anderen Messbereiche zwischen 26 – 40 GHz zu beobachten.

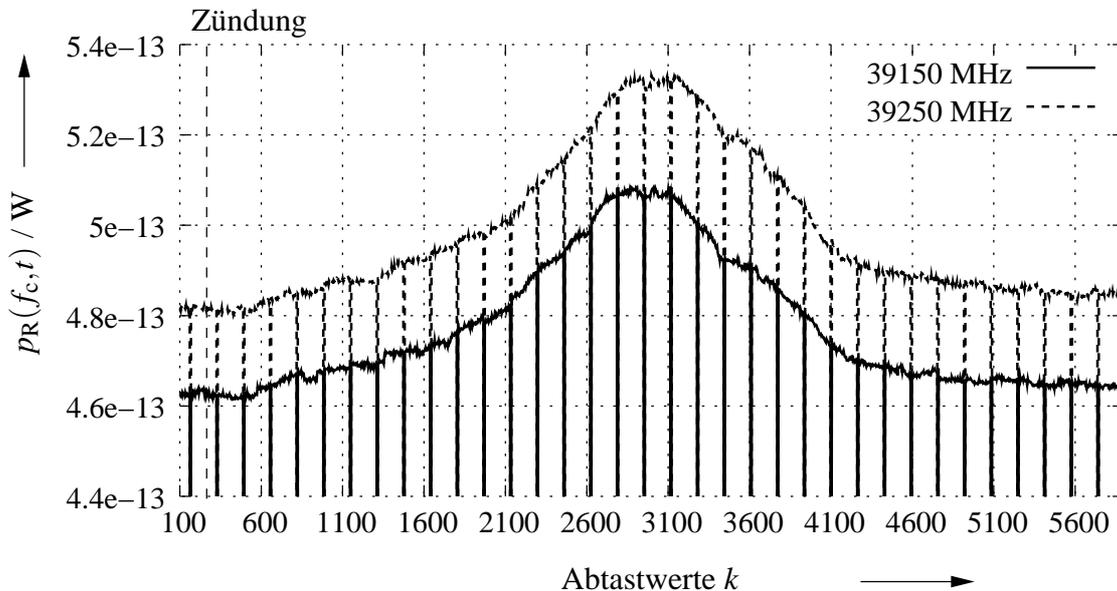


Bild 3.26: Empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF3 der Messbereiche 39.15 GHz und 39.25 GHz

Bild 3.27 stellt das zeitliche Verhalten der empfangenen Leistung $p_R(f_c, t)$ der Wärmestrahlung eines TF3 für den Messbereich 26.65 GHz dar. Die empfangene und korrigierte Leistung $p_R(26.65 \text{ GHz}, t)$ ist über der Zeit t aufgetragen. Das Feuer wurde bei $t \approx 46 \text{ s}$ gezündet. Ab ca. $t = 200 \text{ s}$ ist ein Anstieg in $p_R(26.65 \text{ GHz}, t)$ zu beobachten. Bei $t = t_m \approx 800 \text{ s}$ erreicht die Leistung das Maximum $p_R(26.65 \text{ GHz}, t_m)$ und fällt anschließend wieder ab. Das zeitliche Verhalten von $p_R(26.65 \text{ GHz}, t)$ zeigt den Durchlauf der glühenden Baumwoll-Lunten durch den Fokus des Mess-Systems und nicht den zeitlichen Verlauf des Schwelprozesses der Lunten. Ein Vergleich des Ansprechverhaltens mit herkömmlichen Rauch- bzw. Gassensoren ist deshalb nicht aussagekräftig.

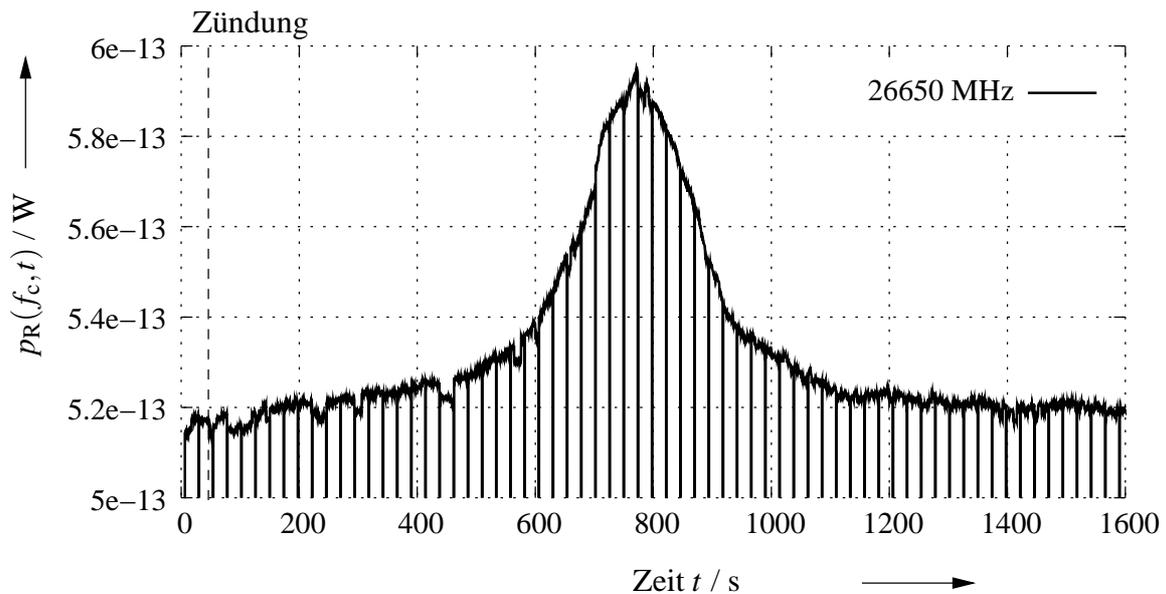


Bild 3.27: Empfangene Leistung $p_R(26.65 \text{ GHz}, t)$ eines TF3

3.3.5 Testfeuer 4

Das Testfeuer TF4 ist ein Polyurethanbrand. Dabei werden 3-4 Kunststoffmatten verbrannt. Die Abmessungen der Matten entspricht der Größe des TF1, so dass sich der gleiche Füllfaktor $w_F(f)$ ergibt wie beim TF1, der eins war. Bild 3.2 gibt also auch die Position der Hauptkeule innerhalb des TF4 wieder. Die Matten werden an einer Ecke mit Spiritus gezündet. Der Schaumstoff schmilzt dadurch, die Flüssigkeit verdampft, und die Gase verbrennen. Der Brand verläuft deshalb in zwei Phasen. In der Phase des Schmelzens ist der Brand, wie beim Testfeuer TF3, von dem Ort abhängig. In dieser Phase wird also nicht das zeitliche Verhalten eines Polyurethanbrandes beobachtet, sondern der Durchlauf des Schmelzprozesses durch den Fokus des Mess-Systems. In der zweiten Phase, bei der alles Material verflüssigt ist, wird dann der zeitliche Verlauf des brennenden Polyurethans innerhalb des Fokus beobachtet.

Bild 3.28 stellt die Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,\text{dB}}(f_c, \Delta t)$ der Messbereiche 36.35 – 36.75 GHz über den Abtastwerten k dar. In allen Messbereichen ergibt sich eine Treppenfunktion, d. h. die Leistung $p_M(f_c, t)$ springt von einem Messwert zum nächsten. Dies ist ein deutliches Anzeichen dafür, dass die Abtastperiode T_a für dieses Feuer zu groß ist, um den zeitlichen Verlauf der gemessenen Leistung $p_M(f_c, t)$ exakt beobachten zu können. Trotzdem ist anhand von $\Delta p_{M,\text{dB}}(f_c, \Delta t)$ der Durchlauf des Schmelzens durch den Fokus des Mess-Systems zu erkennen.

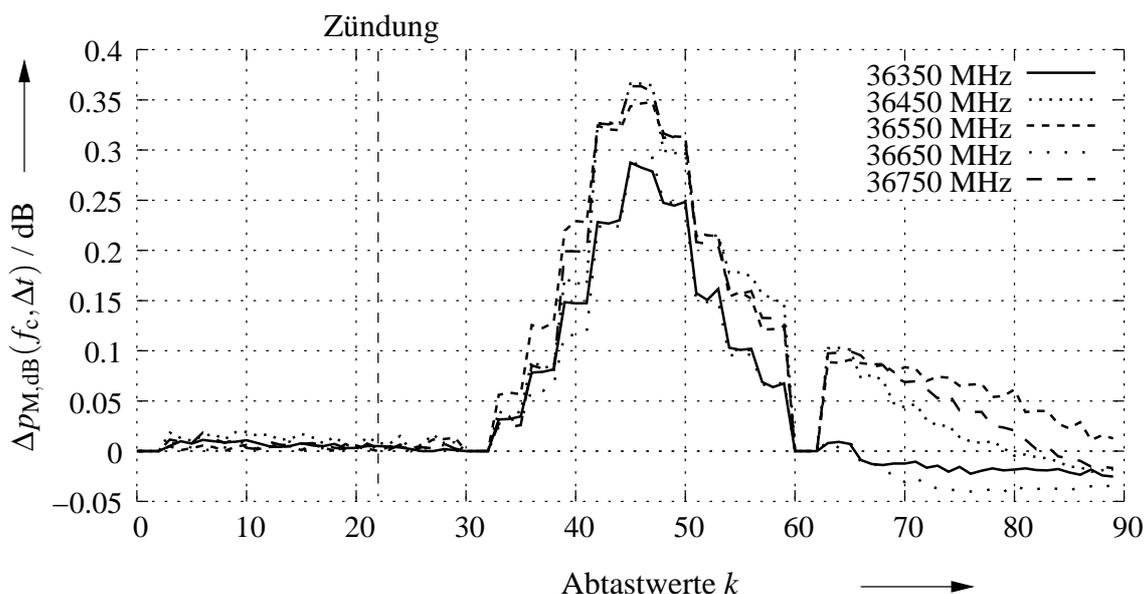


Bild 3.28: Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF4 der Messbereiche zwischen 36.35 – 36.75 GHz

Bild 3.29 zeigt den minimalen und maximalen prozentualen Anstieg $A_{p,min}(f_c)$ bzw. $A_{p,max}(f_c)$ eines TF4 über der Bandmittenfrequenz f_c der verschiedenen Messbereiche aufgetragen. Der prozentuale Anstieg $A_p(f_c)$ des TF4 kann nicht mit $A_p(f_c)$ der anderen Testfeuer verglichen werden, da das Maximum $p_M(f_c, t_m)$ der Leistung aufgrund der zu großen Abtastperiode T_a nicht genau bestimmt werden kann. Allerdings ist es möglich, die maximale Leistungsdifferenz $\Delta p_M(f_c, \Delta t_m)$ zwischen Start- und Maximalleistung in Abhängigkeit von der Frequenz f zu beurteilen. Doch auch beim TF4 sind keine Messbereiche zu finden, in denen $\Delta p_M(f_c, \Delta t_m)$ deutlich größer ist als in anderen Messbereichen.

Bild 3.30 stellt die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF4 für die beiden Messbereiche 30.65 GHz und 30.75 GHz dar, um die frequenzabhängigen Unterschiede im zeitlichen Verhalten der empfangenen Leistung $p_R(f_c, t)$ zu verdeutlichen.

Die Leistungsdifferenz $\Delta p_R(f_c, \Delta t_m)$ im Messbereich 30.75 GHz ist geringer als im Messbereich 30.65 GHz. Nach dem Maximum $p_R(f_c, t_m)$, also für $k > 1000$, fällt $p_R(f_c, t)$ in beiden Bereichen ab. Im Messbereich 30.75 GHz fällt $p_R(f_c, t)$ sogar unter den Wert $p_R(30.75 \text{ GHz}, t_0)$ zu Beginn der Messung. Bis zum Ende der Messung steigt die Leistung $p_R(30.75 \text{ GHz}, t)$ dann

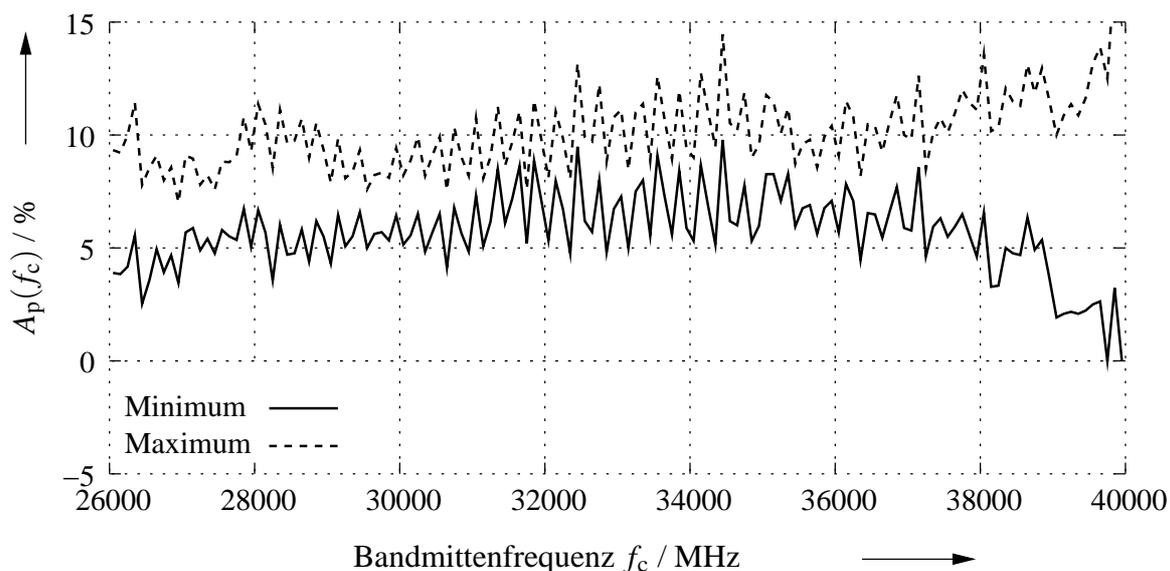


Bild 3.29: Prozentualer Anstieg $A_p(f_c)$ der Leistung der Wärmestrahlung eines TF4

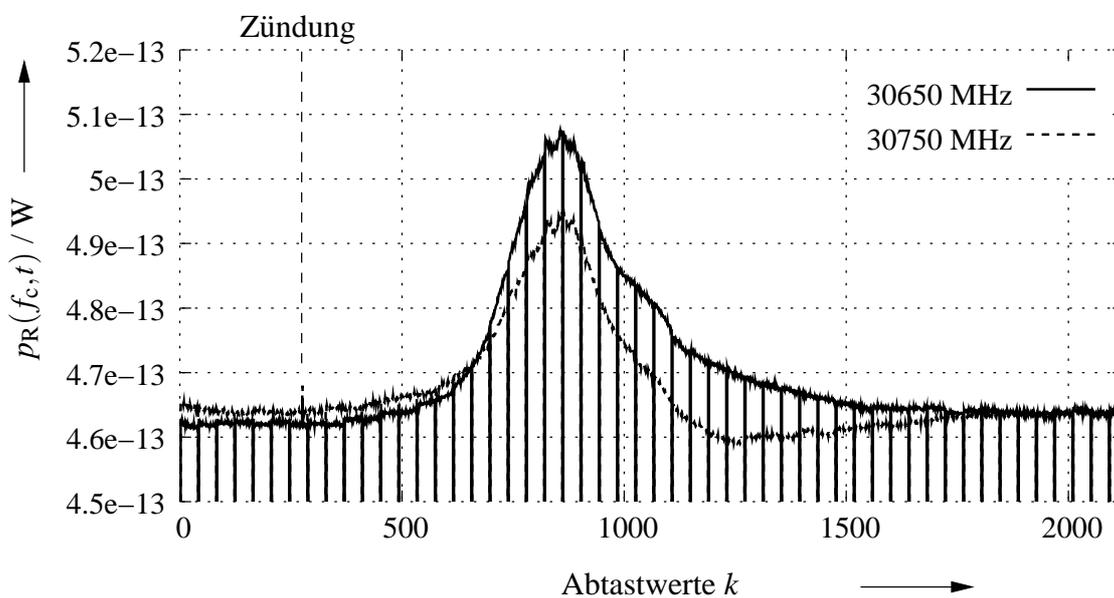


Bild 3.30: Empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF4 der Messbereiche 30.65 GHz und 30.75 GHz

wieder bis auf ihren Startwert $p_R(30.75 \text{ GHz}, t_0)$. Dieses Verhalten lässt sich auch in einigen anderen Frequenzbereichen beobachten. Die physikalischen Ursachen für dieses Verhalten lassen sich – mit dem verwendeten Mess-System – auch für das TF4 nicht erforschen.

Bild 3.31 stellt die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ der Wärmestrahlung eines TF4 dar. Die empfangene Leistung $p_R(39.75 \text{ GHz}, t)$ ist über der Zeit t aufgetragen und zeigt anfangs den Durchlauf der Schmelzphase durch den Fokus des Mess-Systems und später den zeitlichen Verlauf des Flüssigkeitsbrandes.

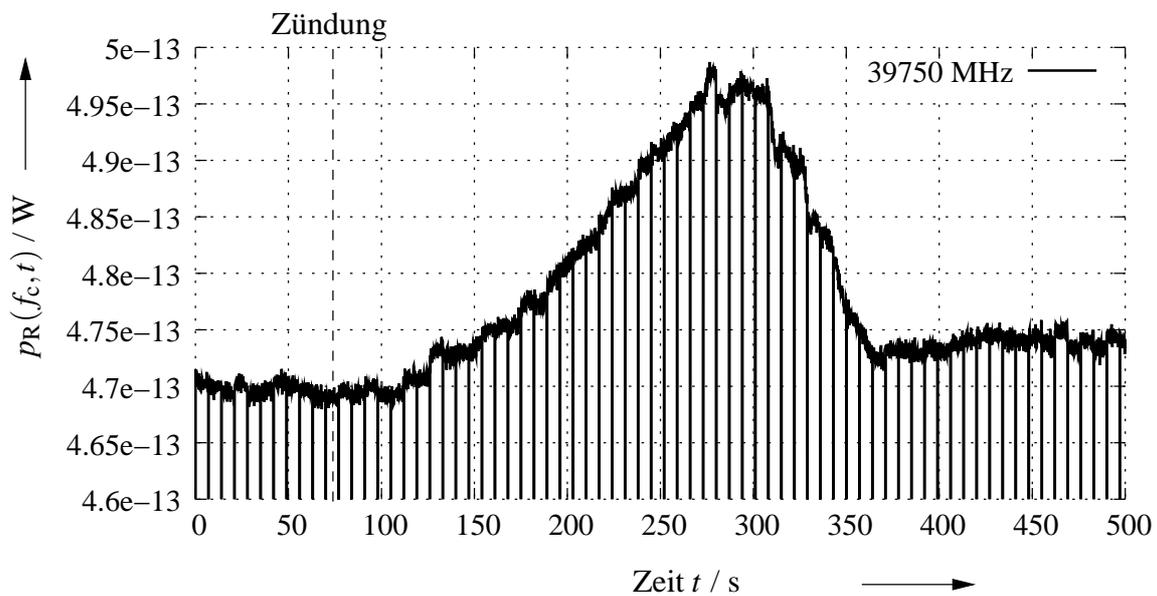


Bild 3.31: Empfangene Leistung $p_R(39.75 \text{ GHz}, t)$ eines TF4

Die Zündung fand bei $t \approx 74 \text{ s}$ statt. Bei ca. $t = 130 \text{ s}$ kann ein Anstieg in der empfangenen Leistung $p_R(39.75 \text{ GHz}, t)$ beobachtet werden. Die Reaktionszeit von ca. 1 Minute hängt aber hauptsächlich von der Grundfläche der verwendeten Schaumstoffmatten ab und nicht von der Entwicklung des Brandes. Ein Vergleich des Ansprechverhaltens mit den herkömmlichen Verfahren der automatischen Brandentdeckung ist daher für das TF4 nicht möglich. Bei $t = t_m \approx 300 \text{ s}$ erreicht $p_R(39.75 \text{ GHz}, t)$ sein Maximum und fällt dann ab. Im Gegensatz zum TF3 ist die Kurve nicht mehr symmetrisch zum Maximum $p_R(39.75 \text{ GHz}, t_m)$, weil mit der ortsabhängigen Veränderung der Leistung auch ein Wechsel des Aggregatzustandes des Brennstoffes verbunden ist. In diesem Messbereich ist $p_R(39.75 \text{ GHz}, t)$ in der Flüssigkeitsphase, also

für $t > 350$, kaum von der Startleistung $p_R(39.75 \text{ GHz}, t_0)$ zu unterscheiden.

3.3.6 Testfeuer 5

Das Testfeuer TF5 ist der erste reine Flüssigkeitsbrand. Dabei wird n-Heptan in einer 5 cm hohen Schale mit der Grundfläche von $33 \text{ cm} \times 33 \text{ cm}$ verbrannt.

Bild 3.32 stellt wieder die Projektion der Hauptkeule auf eine Ebene, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung im Abstand d steht, dar. Die Brandfläche des TF5 ist ebenfalls auf diese Fläche projiziert. Die Hauptkeule liegt nicht komplett innerhalb der Brandfläche, daher ergibt sich der Füllfaktor zu $w_F(f) = 0.98$.

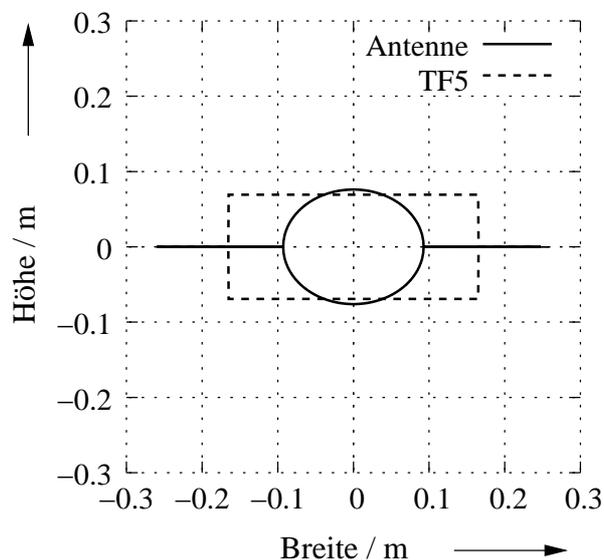


Bild 3.32: Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Fläche des Testfeuers TF5

Bild 3.33 stellt die Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,\text{dB}}(f_c, \Delta t)$ der Messbereiche zwischen 34.15 – 34.44 GHz über den Abtastwerten k dar. Kurz nach der Zündung, bei ca. $k = 90$, sind Veränderungen in $\Delta p_{M,\text{dB}}(f_c, \Delta t)$ zu beobachten. Diese Veränderungen sind aber sehr klein und hängen stark von der Frequenz f ab. Im Messbereich 34.25 GHz ist so gut wie keine Veränderung festzustellen. Im Messbereich 34.45 GHz steigt die Leistungsdifferenz an, während $\Delta p_{M,\text{dB}}(f_c, \Delta t)$ im Messbereich 34.35 GHz sogar kleiner wird. Diese Änderungen sind allerdings so klein, dass eine Auswertung des prozentualen Anstiegs $A_p(f_c)$ keinen Sinn macht. Die Temperatur-

schwankungen innerhalb des Mess-Systems haben zudem einen deutlichen Einfluss auf die Gesamtverstärkung $G_{MS}(f)$ des Mess-Systems und so auf die gemessene Leistung $p_M(f_c, t)$.

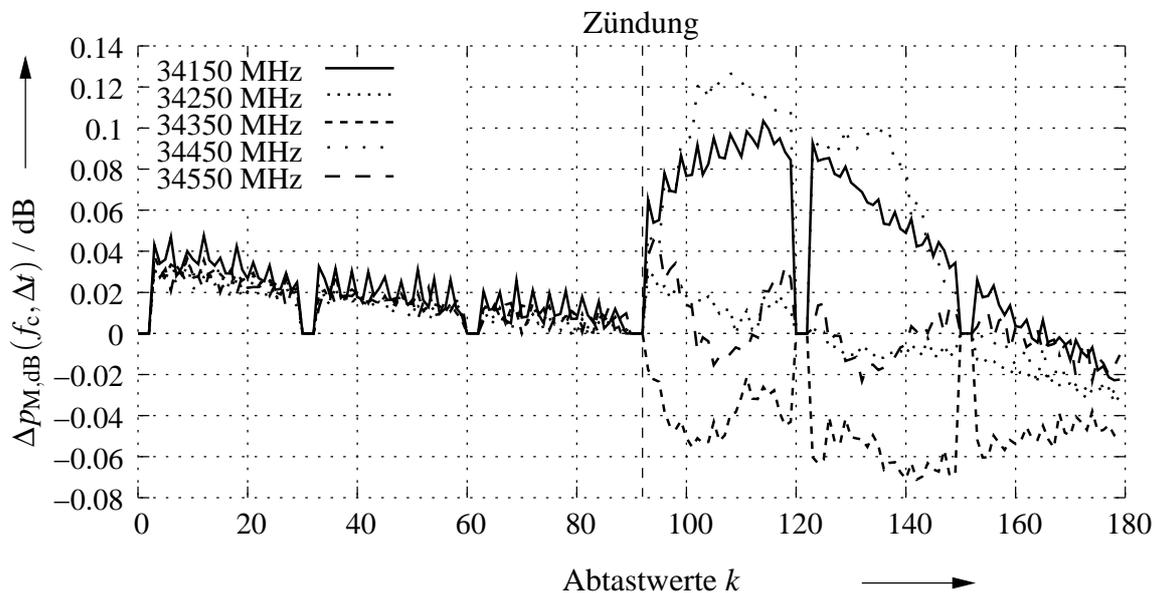


Bild 3.33: Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF5 der Messbereiche zwischen 34.15 – 34.55 GHz

So ist ein temperaturbedingter Abfall der Leistungsdifferenz von etwa 0.05 dB während der Messung zu erkennen. Daher können nur mit Hilfe der Kalibration korrigierte Daten, also die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$, ausgewertet werden.

Bild 3.34 stellt die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ der Wärmestrahlung des Messbereiches 33.55 GHz eines TF5 über der Zeit t aufgetragen dar. Die Zündung fand bei $t \approx 126$ s statt. Mit der Zündung steigt die Leistung $p_R(33.55 \text{ GHz}, t)$ an, bis diese bei ca. $t = 200$ s ein erstes lokales Maximum erreicht. $p_R(33.55 \text{ GHz}, t)$ oszilliert anschließend und erreicht dabei zwei weitere Maxima bei ca. $t = 325$ s und $t = 425$ s. Nach dem letzten dieser Maxima fällt $p_R(33.55 \text{ GHz}, t)$ monoton ab und nähert sich wieder der Raumtemperatur entsprechenden Leistung. Dieses Verhalten bildet möglicherweise den Verbrennungsprozess, also den chemischen Umbau des n-Heptans, ab. Aus diesem Grund ist auch die Veränderung der Leistung $p_R(f_c, t)$ über der Zeit t in den unterschiedlichen Frequenzbereichen interessant, da diese weiteren Aufschluss über den Prozess liefern könnte.

Bild 3.35 stellt die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF5 für die beiden Messberei-

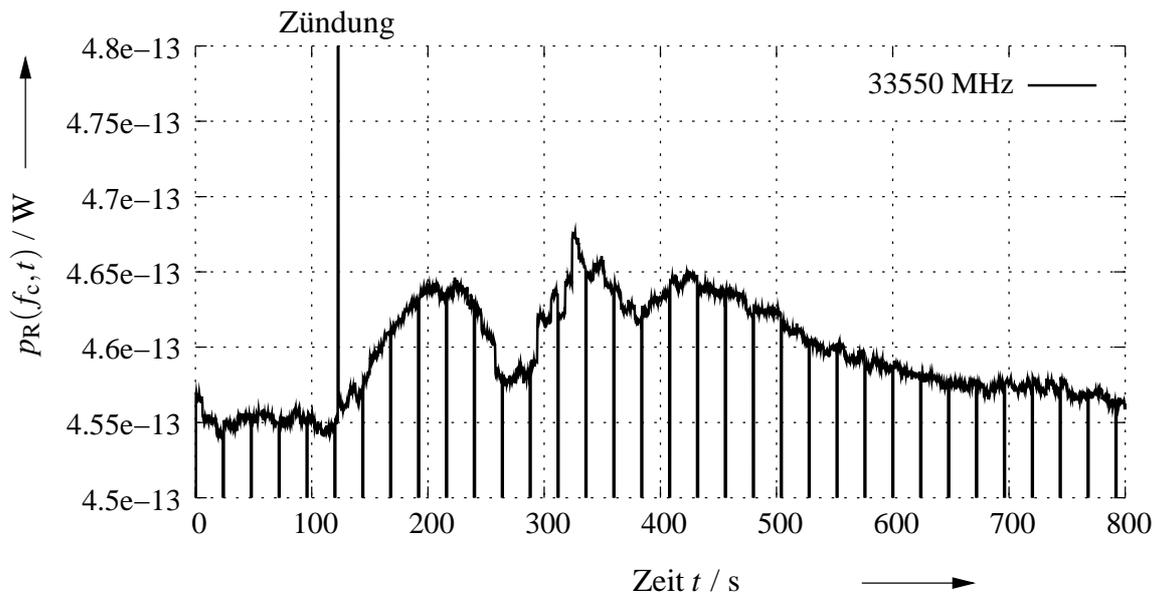


Bild 3.34: Empfangene Leistung $p_R(33.55 \text{ GHz}, t)$ eines TF5

che 31.45 GHz und 31.55 GHz dar. In beiden Messbereichen nimmt $p_R(f_c, t)$ Werte sowohl oberhalb als auch unterhalb des Werts der Leistung $p_R(f_c, t_0)$ zu Beginn der Messung, der zur Raumtemperatur korrespondiert, an. Es entsteht sogar der Eindruck, dass der Verlauf der Leistung $p_R(31.45 \text{ GHz}, t)$ des Messbereiches 31.45 GHz invers zum Verlauf von $p_R(31.55 \text{ GHz}, t)$ ist. Diese charakteristische Frequenzabhängigkeit der empfangenen Leistung $p_R(f_c, t)$ kann zur Detektion ausgenutzt werden, insbesondere weil die kleine Leistungsdifferenz $\Delta p_R(f_c, \Delta t_m)$ die Detektion eines reinen TF5 schwierig macht.

Eine Variante des TF5, das Testfeuer TF5a, wurde durchgeführt, um den Einfluss der Flammen auf die gemessene Leistung $p_M(f_c, t)$ beurteilen zu können. Der Behälter, in den die ca. 200 ml n-Heptan gefüllt werden, hat eine Grundfläche von $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ und ist 10 cm hoch. Der Füllstand der Flüssigkeit liegt daher vor dem Brand bei ca. 2 cm. Aufgrund der Geometrie des im Abschnitt 3.2 beschriebenen Messaufbaus ist es nicht möglich, die Flüssigkeit während des Feuers zu fokussieren, d. h. es werden nur die Flammen, die aus dem Gefäß herausragen, beobachtet.

Bild 3.36 stellt die Leistungsdifferenz $\Delta p_{M, \text{dB}}(f_c, \Delta t)$ der Messbereiche zwischen 28.45 – 28.85 GHz über den Abtastwerten k dar. Die Kurven fallen stetig ab. Dieser Abfall wird durch die Temperaturerhöhung innerhalb des Mess-Systems verursacht. Ein Einfluss der Flammen

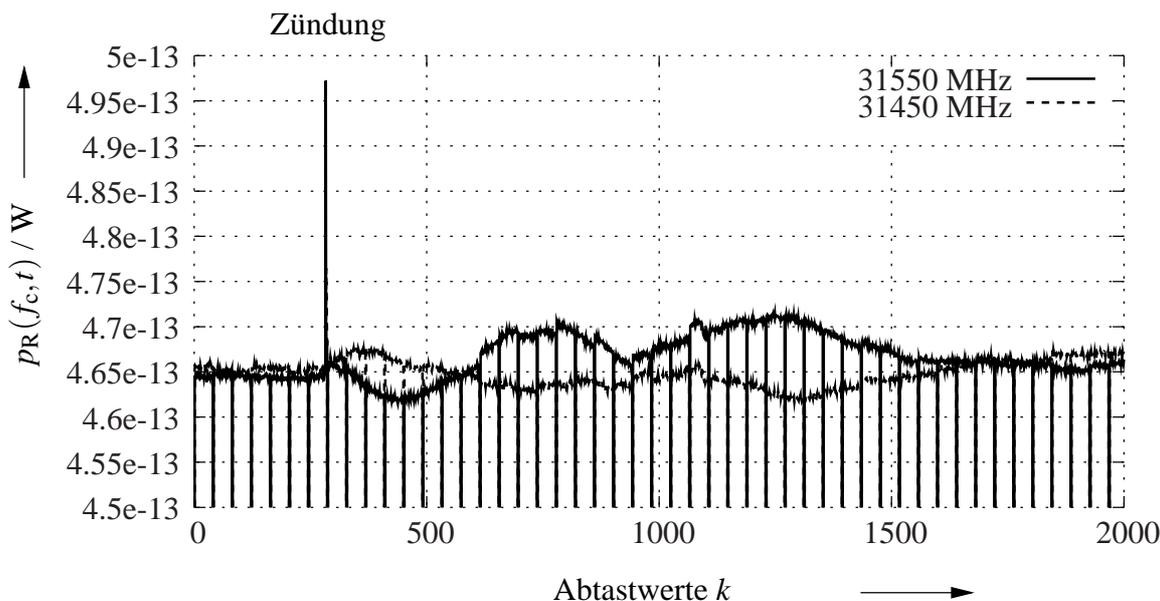


Bild 3.35: Empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF5 der Messbereiche 31.45 GHz und 31.55 GHz

auf die Leistungsdifferenz $\Delta p_{M, dB}(f_c, \Delta t)$ ist nicht erkennbar, deshalb müssen wieder die korrigierten Daten, also $p_R(f_c, t)$, betrachtet werden.

Bild 3.37 zeigt die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ für den Messbereich 28.85 GHz. Die Zündung fand bei $t \approx 82$ s statt. Kurze Zeit später ist ein kleiner Anstieg in der Leistung $p_R(28.85 \text{ GHz}, t)$ zu beobachten. Dieser Anstieg hat sein Maximum bei ca. $t = 350$ s und fällt dann bis $t \approx 600$ s ab. Danach beginnt ein nahezu linearer Anstieg bis ca. $t = 1600$ s. Der zweite Anstieg, der bei $t = 600$ s beginnt, könnte durch die Erhöhung der Raumtemperatur hervorgerufen werden. Insgesamt ist der sichtbare Einfluss der Flammen auf die empfangene Leistung $p_R(28.85 \text{ GHz}, t)$ eher gering, hängt aber wieder von der Frequenz f ab.

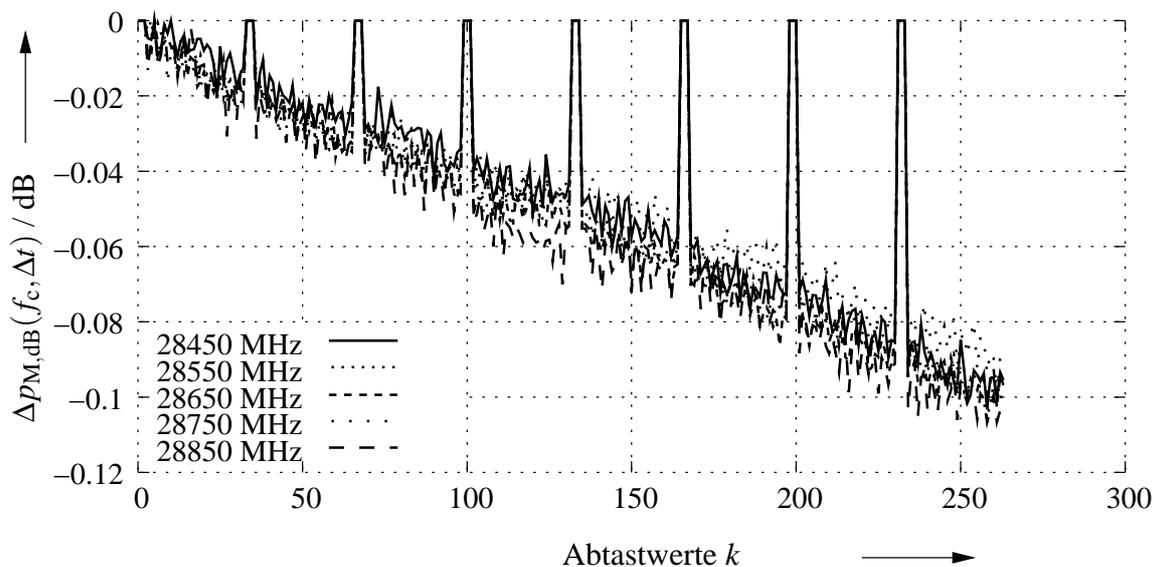


Bild 3.36: Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF5a der Messbereiche zwischen 28.45 – 28.85 GHz

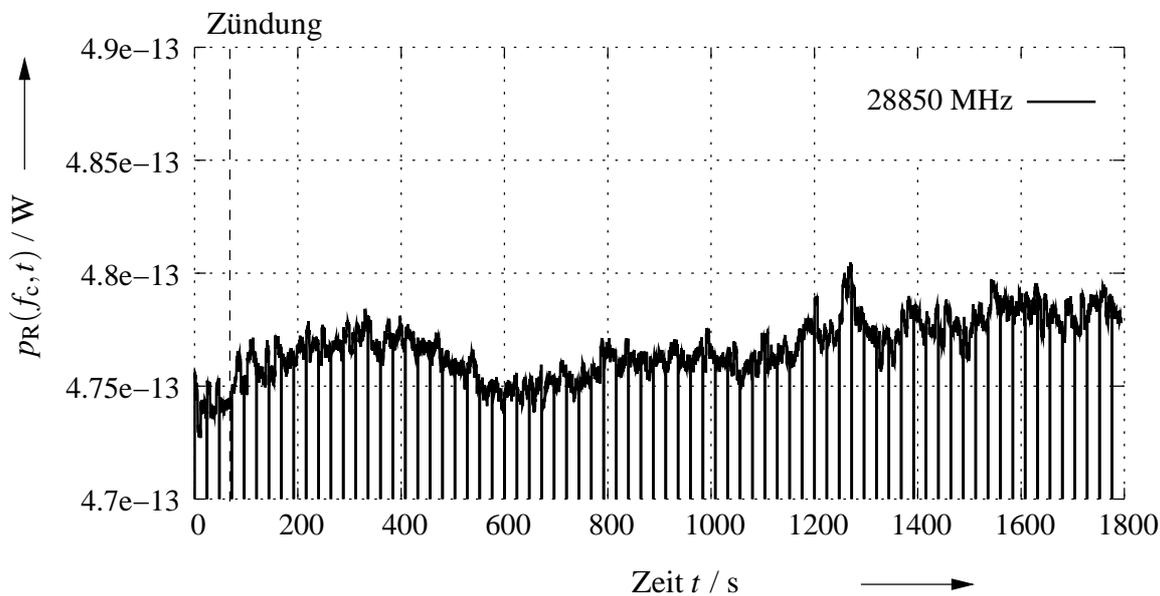


Bild 3.37: Empfangene Leistung $p_R(28.85 \text{ GHz}, t)$ eines TF5a

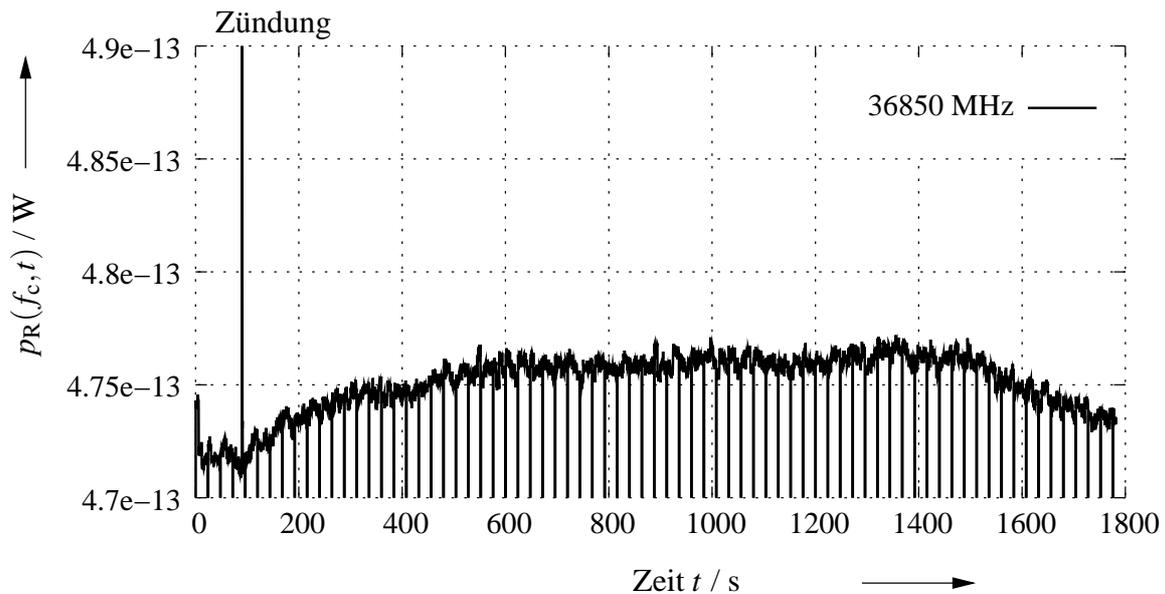


Bild 3.38: Empfangene Leistung $p_R(36.85 \text{ GHz}, t)$ eines TF5a

Dies verdeutlicht Bild 3.38, das die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ für den Messbereich 36.85 GHz darstellt. Bei $t \approx 93 \text{ s}$ wurde das Feuer automatisch gezündet, was anhand der Signalspitze zu erkennen ist. Wie im Messbereich 28.85 GHz steigt die Leistung $p_R(f_c, t)$ bis $t = 400 \text{ s}$ leicht an. Anschließend fällt $p_R(36.85 \text{ GHz}, t)$ aber nicht ab, sondern es folgt ein linearer Anstieg, der bis ca. $t = 1500 \text{ s}$ andauert, der wiederum mit der Raumtemperatur zusammenhängen kann.

Um diese These genauer zu untersuchen, wurde das Testfeuer TF5a wiederholt. Der Fokus des Mess-Systems wurde dabei um ca. 60 cm nach links verschoben, d. h. der Behälter in dem das Feuer brennt, liegt außerhalb des Beobachtungsbereiches. Stattdessen wurde der Boden beobachtet, der in der Umgebung der Brandstelle mit Metallplatten abgedeckt ist.

Bild 3.39 zeigt die über der Zeit t aufgetragene empfangene Leistung $p_R(36.85 \text{ GHz}, t)$. Der Brand wurde bei ca. $t = 49 \text{ s}$ von Hand gezündet. Nach der Zündung lässt sich wieder ein Anstieg der Leistung $p_R(36.85 \text{ GHz}, t)$ beobachten, der bis $t \approx 1850 \text{ s}$ andauert und wahrscheinlich durch die Erhöhung der Raumtemperatur hervorgerufen wird. Der Anstieg ist allerdings nicht so hoch, wie bei der Messung in Bild 3.38. Das charakteristische Verhalten bis ca. $t = 400 \text{ s}$ in den Bildern 3.37 und 3.38 ist bei diesem Brand nicht zu sehen, scheint also durch die Flammen selbst hervorgerufen zu werden. Um den Einfluss der Reflektionen am Metallboden zu beurtei-

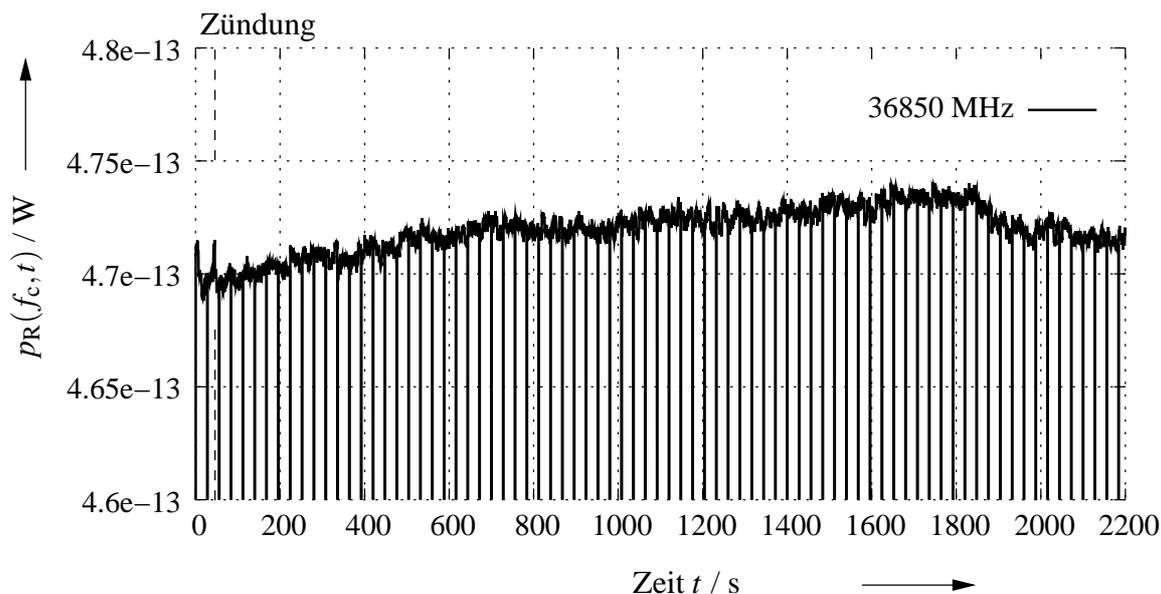


Bild 3.39: Empfangene Leistung $p_R(36.85 \text{ GHz}, t)$ eines TF5a außerhalb des Brandorts (mit Reflektionen)

len, wurde das Mess-System um 90° gedreht, so dass die Flammen weder direkt noch indirekt, also durch Reflektionen am Metallboden, beobachtet werden konnten.

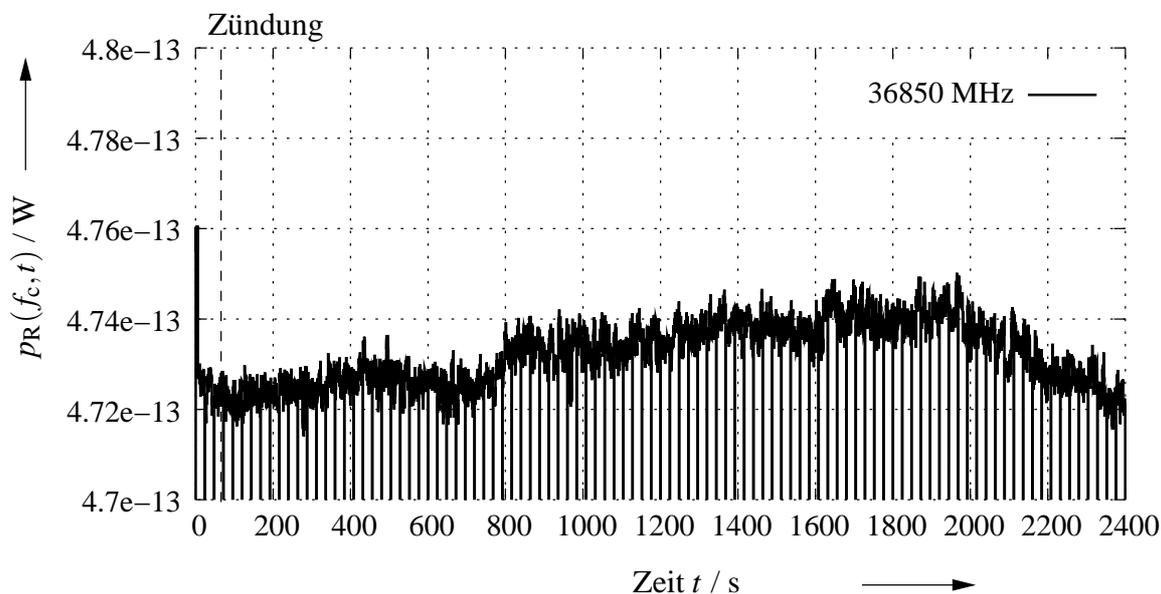


Bild 3.40: Empfangene Leistung $p_R(36.85 \text{ GHz}, t)$ eines TF5a außerhalb des Brandorts (ohne Reflektionen)

Bild 3.40 stellt $p_R(36.85 \text{ GHz}, t)$ für diesen Versuch über der Zeit t dar. Die Zündung des Feuers fand bei $t \approx 66 \text{ s}$ statt. Ab ca. $t = 800 \text{ s}$ kann ein Anstieg in $p_R(36.85 \text{ GHz}, t)$ beobachtet werden, der bis ca. $t = 2000 \text{ s}$ andauert. Danach fällt $p_R(36.85 \text{ GHz}, t)$ wieder ab. Der Anstieg der Raumtemperatur, der durch den Brand verursacht wird, führt also zu einem kleinen Anstieg in der empfangenen Leistung $p_R(36.85 \text{ GHz}, t)$, obwohl die Temperaturerhöhung, die durch das TF5a hervorgerufen wird, klein ist. Die Temperatur unterhalb der Decke, die in einer Entfernung von 3 m von der Brandstelle gemessen wird, steigt nur um ca. 5°C . Folglich lässt sich die Wärmestrahlung von Feuern auch über Reflektionen messen, wobei die Reaktionszeit sehr viel größer ist als bei direkter Fokussierung des Feuers.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass auch das Testfeuer TF5a durch die empfangene Leistung $p_{R,F}(f, t)$ der Wärmestrahlung dieses Feuers im Mikrowellenbereich detektiert werden kann, auch wenn die nötige Temperaturauflösung sehr viel größer sein muss als bei den vorher betrachteten Feststoffbränden.

3.3.7 Testfeuer 6

Das Testfeuer TF6 ist genau wie das TF5 ein offener Flüssigkeitsbrand, bei dem Ethanol in einer 5 cm hohen Schale mit einer Grundfläche von $43.5 \text{ cm} \times 43.5 \text{ cm}$ verbrannt wird.

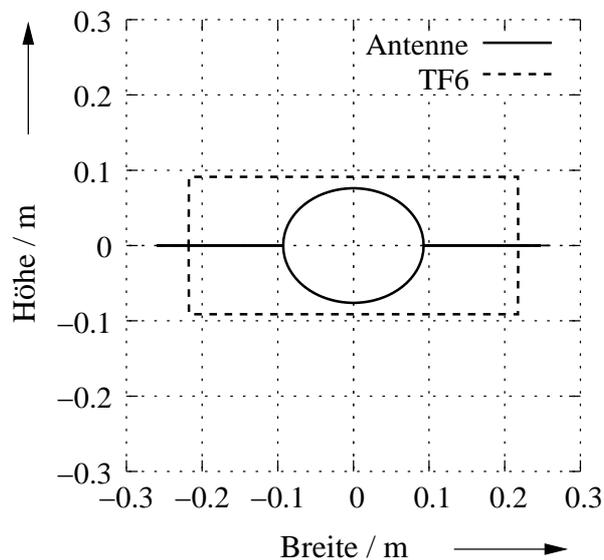


Bild 3.41: Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Fläche des Testfeuers TF6

Bild 3.41 stellt wieder die Projektion der Hauptkeule auf eine Ebene, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung im Abstand d steht, dar. Die Brandfläche des TF6 ist ebenfalls auf diese Fläche projiziert. Die Hauptkeule liegt komplett innerhalb der Brandfläche, daher ergibt sich der Füllfaktor zu $w_F(f) = 1.0$.

Bild 3.42 stellt die Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ der Messbereiche zwischen 30.85 – 31.25 GHz über den Abtastwerten k dar. Kurz nach der Zündung bei $k \approx 75$ ist ein Anstieg der Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ zu beobachten. Bei ca. $k = 100$ erreicht $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ einen Sättigungswert, der bis ca. $k = 150$ konstant bleibt. $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ fällt danach wieder ab. Dieses Verhalten ist in allen Messbereichen innerhalb des Frequenzbereiches 26 – 40 GHz nahezu identisch, weshalb auf die Darstellung der anderen Messbereiche verzichtet wird.

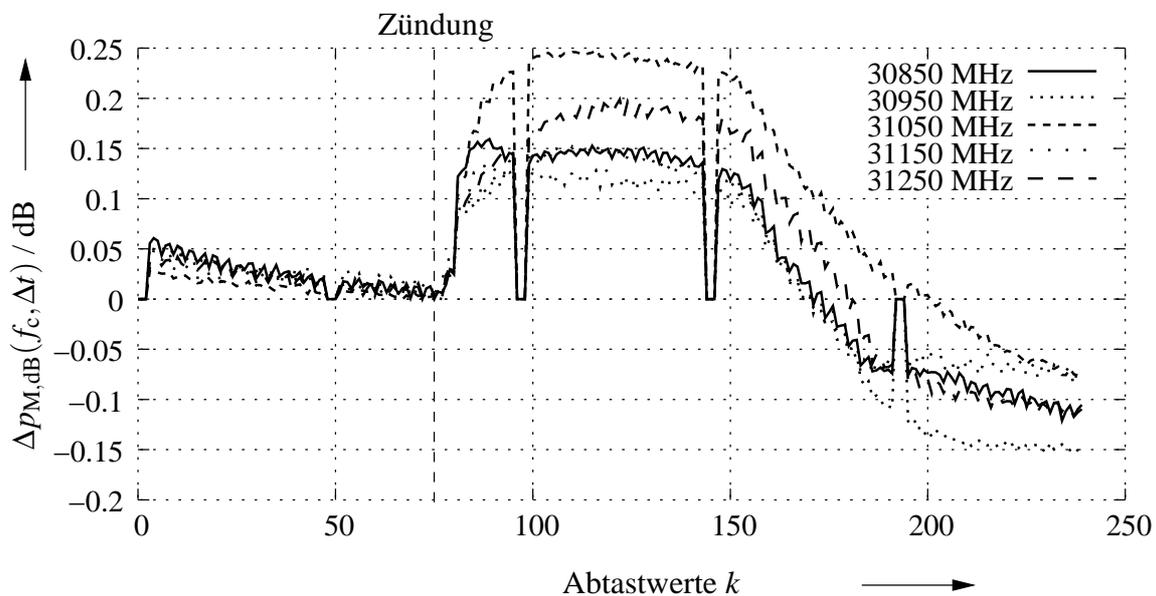


Bild 3.42: Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF6 der Messbereiche zwischen 30.85 – 31.25 GHz

Bild 3.43 zeigt den minimalen und maximalen prozentualen Anstieg $A_{p,\min}(f_c)$ bzw. $A_{p,\max}(f_c)$ der gemessenen Leistung $p_M(f_c, t)$ eines TF6. Der Frequenzbereich lässt sich wieder in zwei Abschnitte unterteilen. Zwischen 26 – 37 GHz liegt der prozentuale Anstieg $A_p(f_c)$ zwischen 0 – 8% und ist damit kleiner als bei den bisher betrachteten Feststoffbränden, aber größer als der Anstieg eines TF5. Ab 37 GHz werden die Schwankungen des prozentualen Anstiegs $A_p(f_c)$ größer, genau wie bei den vorher untersuchten Bränden. Beim TF6 lässt sich

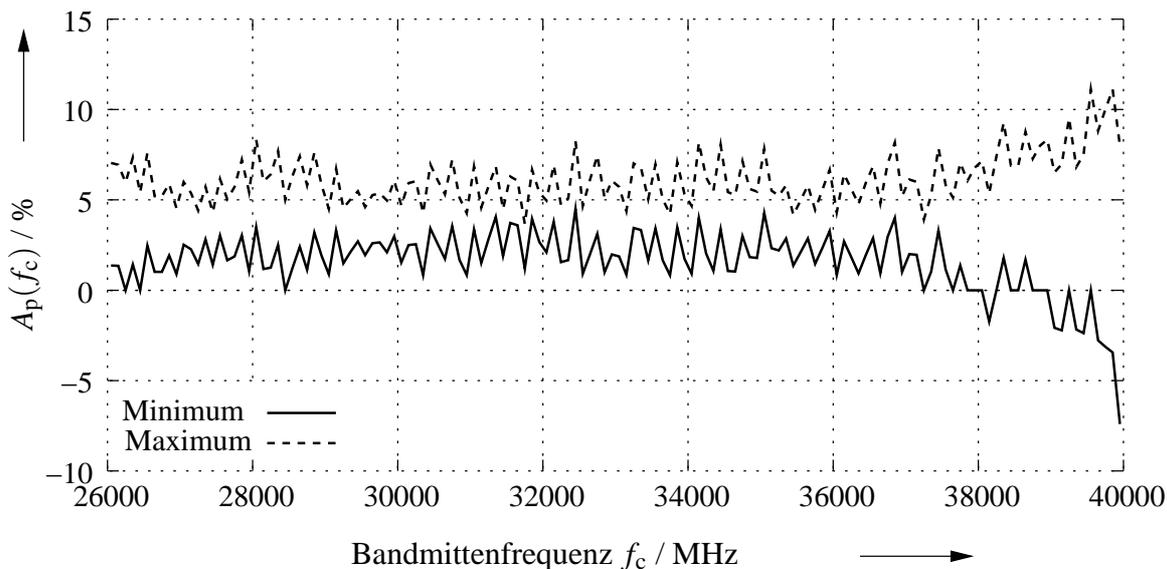


Bild 3.43: Prozentualer Anstieg $A_p(f_c)$ der Leistung der Wärmestrahlung eines TF6

wieder kein Messbereich finden, bei dem deutlich mehr Leistung $p_M(f_c, t)$ der Wärmestrahlung gemessen wird als in den anderen Bereichen. Im zeitlichen Verlauf der gemessenen Leistung $p_M(f_c, t)$ sind ebenfalls kaum frequenzabhängige Unterschiede zu beobachten.

Bild 3.44 stellt die empfangene Leistung $p_R(29.35 \text{ GHz}, t)$ der Wärmestrahlung eines TF6 über der Zeit t aufgetragen dar. Die Zündung fand bei $t \approx 89 \text{ s}$ statt. An dieser Stelle kann eine

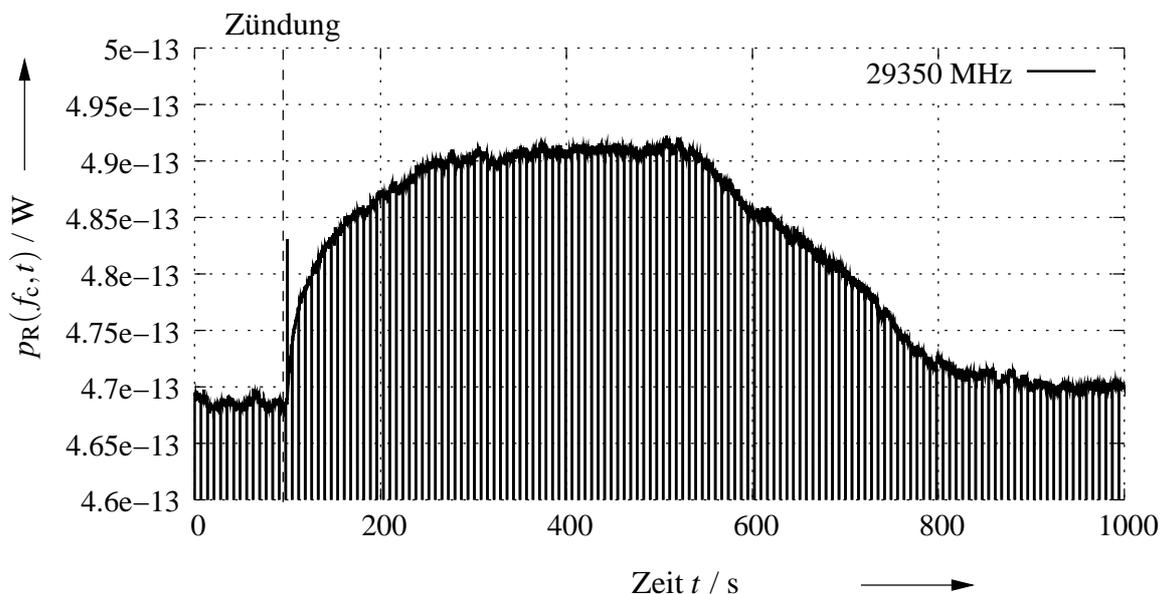


Bild 3.44: Empfangene Leistung $p_R(29.35 \text{ GHz}, t)$ eines TF6

Signalspitze beobachtet werden, die wieder von der automatischen Zündvorrichtung hervorgerufen wird. Nach der Signalspitze steigt auch die empfangene Leistung $p_R(29.35 \text{ GHz}, t)$ an, bis diese bei ca. $t = t_m = 250 \text{ s}$ ihren Maximalwert erreicht, der bis $t \approx 550 \text{ s}$ konstant bleibt. Die Kurve fällt anschließend ab, bis sie bei ca. $t = 800 \text{ s}$ wieder in die Nähe der zur Raumtemperatur korrespondierenden Leistung gelangt. Dieses Verhalten lässt sich so erklären: Mit der Zündung erreicht die Flüssigkeit in der Nähe der Zündstelle ihren Siedepunkt, der für Ethanol [11] bei 78.7°C liegt. Danach erwärmt sich die komplette Flüssigkeit in der Schale auf Siedetemperatur. Der Anstieg $\Delta p_M(f_c, \Delta t)$ ist also mit der Ausbreitung der Siedetemperatur durch die ganze Flüssigkeit zu erklären. Die Temperatur bleibt danach konstant, bis die Flüssigkeit nahezu vollständig in den gasförmigen Zustand übergegangen ist. Durch den Brand wird die Flüssigkeit reduziert, so dass anschließend ein Abfall in der Leistung $p_R(29.35 \text{ GHz}, t)$ zu beobachten ist.

Um den Einfluss der Flammen beurteilen zu können, wurde der gleiche Aufbau wie beim TF5a verwendet, mit der Ausnahme, dass 200 ml Ethanol an Stelle des n-Heptan verbrannt wurden. Bild 3.45 stellt die empfangene Leistung $p_R(34.45 \text{ GHz}, t)$ über der Zeit t für dieses Experiment dar. Die Zündung fand bei ca. $t = 45 \text{ s}$ statt. Kurz darauf steigt $p_R(34.45 \text{ GHz}, t)$ bis $t \approx 400 \text{ s}$ an. Zwischen $400 \text{ s} \leq t \leq 1400 \text{ s}$ steigt $p_R(34.45 \text{ GHz}, t)$ etwas an, allerdings mit einer kleineren Steigung. Gegen Ende der Messung fällt $p_R(34.45 \text{ GHz}, t)$ dann wieder ab. Bei der Untersuchung der Flammen ergibt sich also ein ähnliches Zeitverhalten der empfangenen Leistung $p_R(34.45 \text{ GHz}, t)$ wie bei der Messung der empfangenen Leistung des TF6 in Bild 3.44, allerdings ist hier die maximale Leistungsdifferenz $\Delta p_R(f_c, \Delta t_m)$ zwischen Start- und Maximalwert der empfangenen Leistung deutlich kleiner. Es muss dabei aber beachtet werden, dass der Füllfaktor $w_F(f) = 0.19$ für die Versuche mit dem Aufbau des TF5a kleiner ist als bei der Messung des TF6. Der genaue Anteil der Flüssigkeit bzw. der Flammen an der empfangenen Leistung $p_R(f_c, t)$ lässt sich nicht bestimmen, da auch Reflektionen der Wärmestrahlung an den Metallwänden des Ethanolbehälters in die Messung einbezogen werden, die beim Verlassen des Behälters in Richtung des Mess-Systems gelenkt werden. Eine Trennung der Wärmestrahlung von Brandmaterial und Flammen ist mit dem verwendeten Messaufbau daher nicht möglich.

Bild 3.46 stellt die empfangene Leistung $p_R(34.45 \text{ GHz}, t)$ eines TF6 für den Aufbau eines TF5a dar, wobei der Fokus des Mess-Systems wieder um 90° gedreht wurde, so dass keine direkte oder reflektierte Wärmestrahlung der Flammen gemessen werden konnte. Bei

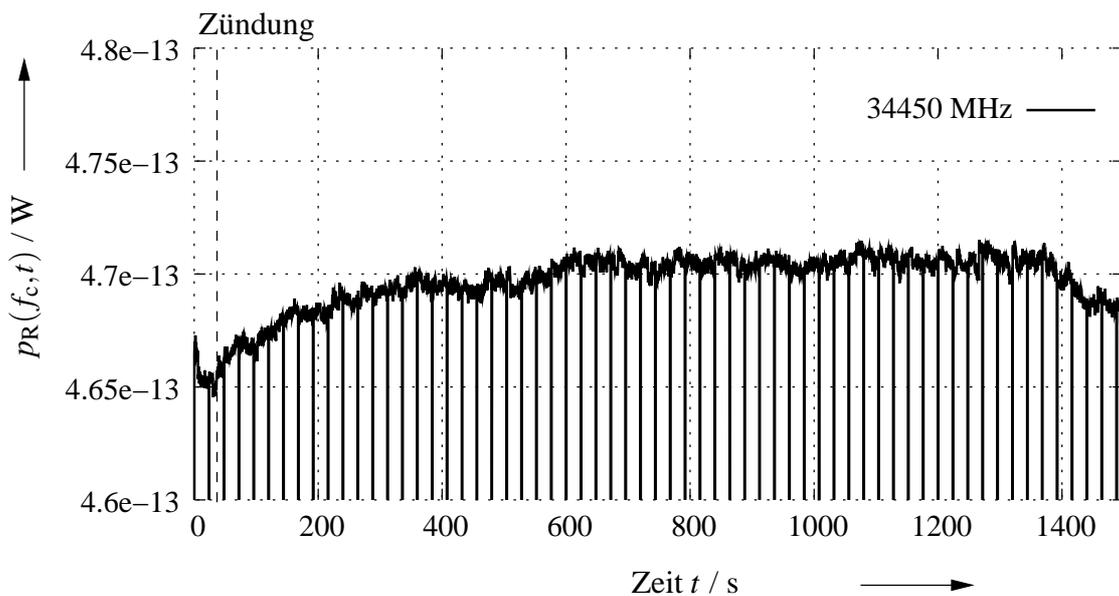


Bild 3.45: Empfangene Leistung $p_R(34.45\text{GHz},t)$ der Wärmestrahlung der Flammen eines TF6

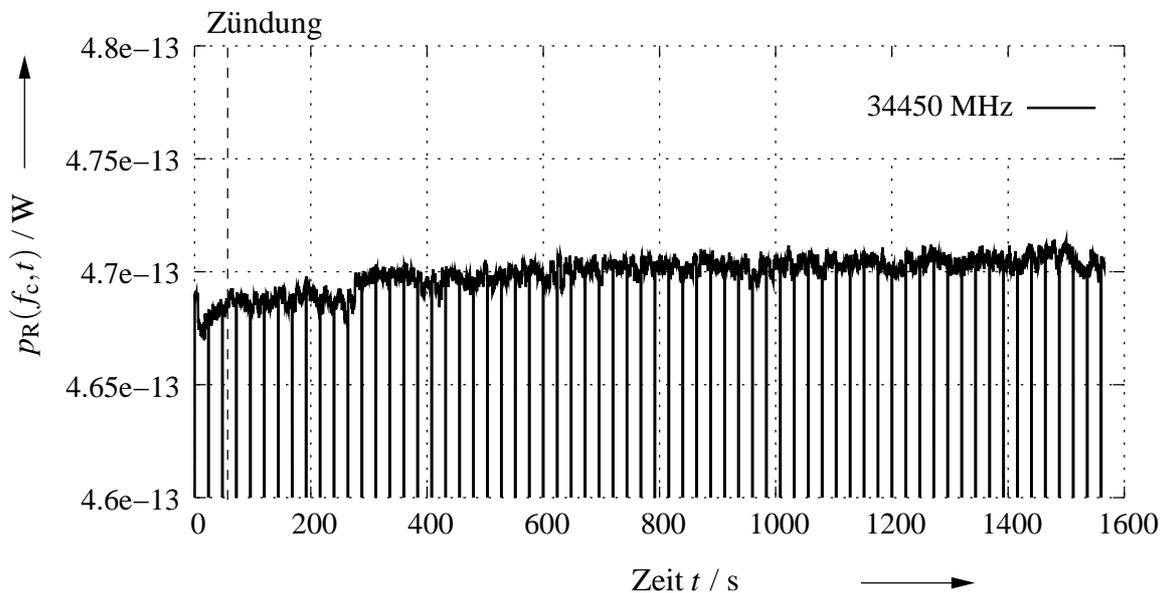


Bild 3.46: Empfangene Leistung $p_R(34.45\text{GHz},t)$ der Flammen eines TF6 außerhalb des Brandorts (ohne Reflektionen)

$t \approx 57$ s wurde der Brand gezündet. Ab ca. $t = 250$ s lässt sich ein Anstieg in der Leistung $p_R(34.45 \text{ GHz}, t)$ beobachten, der bis $t \approx 1500$ s andauert. Der Anstieg liegt etwa in der gleichen Größenordnung, wie der Anstieg von $p_R(f_c, t)$ in Bild 3.40 des Testfeuers TF5a lag, das die Messwerte des gleichen Aufbaus enthält. Folglich ist die Erhöhung der Leistung auf die Erhöhung der Raumtemperatur zurückzuführen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die maximale Leistungsdifferenz $\Delta p_{M, \text{dB}}(f_c, \Delta t_m)$ des Testfeuer TF6 groß genug ist, um detektiert werden zu können. Ein frequenzabhängiger Leistungsverlauf wurde im Frequenzbereich 26 – 40 GHz nicht beobachtet.

3.3.8 Testfeuer 7

Beim letzten betrachteten Testfeuer, dem TF7, handelt es sich ebenfalls um einen Flüssigkeitsbrand. Hier wird Decahydronaphthalin oder kurz Dekalin in einer Schale mit der Abmessung $12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ verbrannt. Damit das Dekalin zündet, muss noch 5 g Ethanol zugesetzt werden.

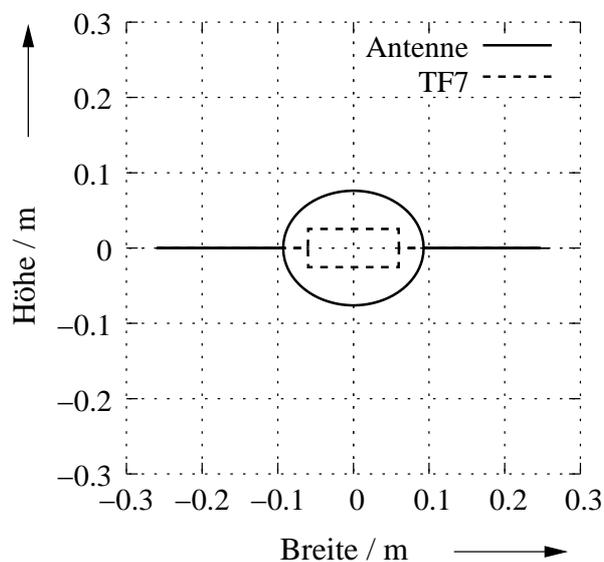


Bild 3.47: Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Fläche des Testfeuers TF7

Bild 3.47 stellt wieder die Projektion der Hauptkeule auf eine Ebene, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung im Abstand d steht, dar. Die Brandfläche des TF7 ist ebenfalls auf diese

Fläche projiziert. Bei diesem Feuer liegt die Brandfläche komplett innerhalb der Hauptkeule. Der Füllfaktor ergibt sich zu $w_F(f) = 0.28$.

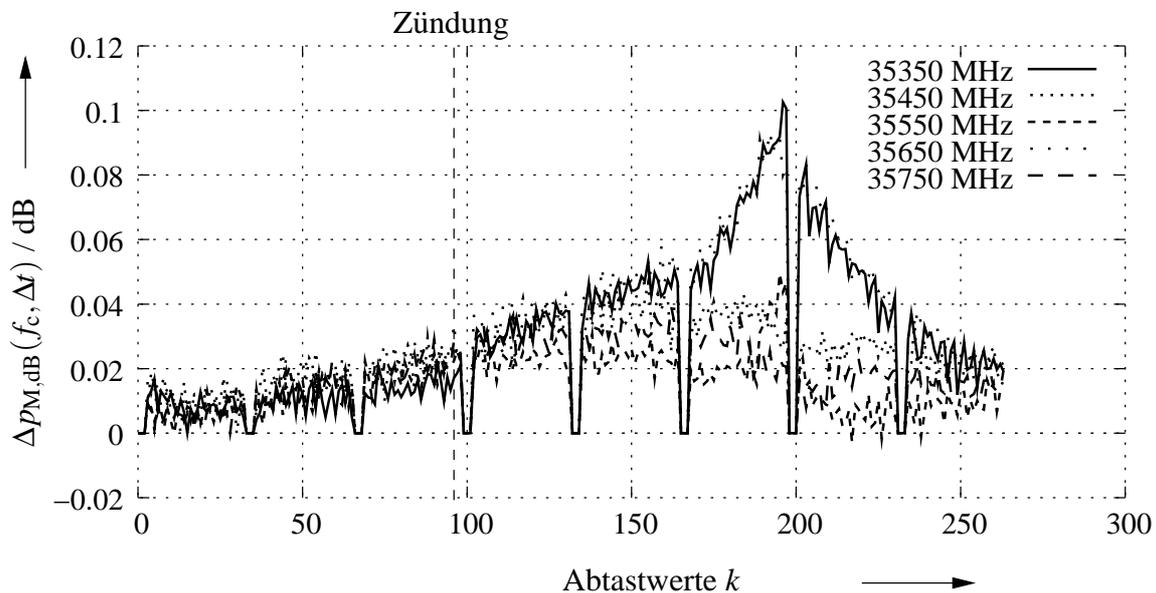


Bild 3.48: Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF7 der Messbereiche zwischen 35.35 – 35.75 GHz

Bild 3.48 stellt die über den Abtastwerten k aufgetragene Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ der Messbereiche zwischen 35.35 – 35.75 GHz dar. Die Zündung fand bei $k \approx 97$ statt, worauf ein kleiner Anstieg der Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ in den verschiedenen Messbereichen zu beobachten ist. In den Messbereichen 35.35 GHz und 35.65 GHz ist bei ca. $k = 200$ ein deutliches Maximum $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t_m)$ der Kurve zu beobachten. In den Messbereichen 35.45 GHz, 35.55 GHz und 35.75 GHz ist dieses Maximum nicht messbar, dort ist eher ein leichter Abfall der Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ zu beobachten. $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ ist wie schon beim Testfeuer TF5 sehr klein, und das zeitliche Verhalten der Kurven ist wieder stark frequenzabhängig. Aus diesem Grund kann der prozentuale Anstieg $A_p(f_c)$ nicht ausgewertet werden. Es empfiehlt sich außerdem, nur die mit Hilfe der Kalibration korrigierten Daten, also die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$, zu betrachten.

Bild 3.49 stellt die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF7 für die drei Messbereiche 36.45 GHz, 36.55 GHz und 36.65 GHz dar. Diese Kurven zeigen drei typische Verläufe der Leistung $p_R(f_c, t)$. Die automatische Zündung, die zu einer Signalspitze in $p_R(f_c, t)$ führt, fand

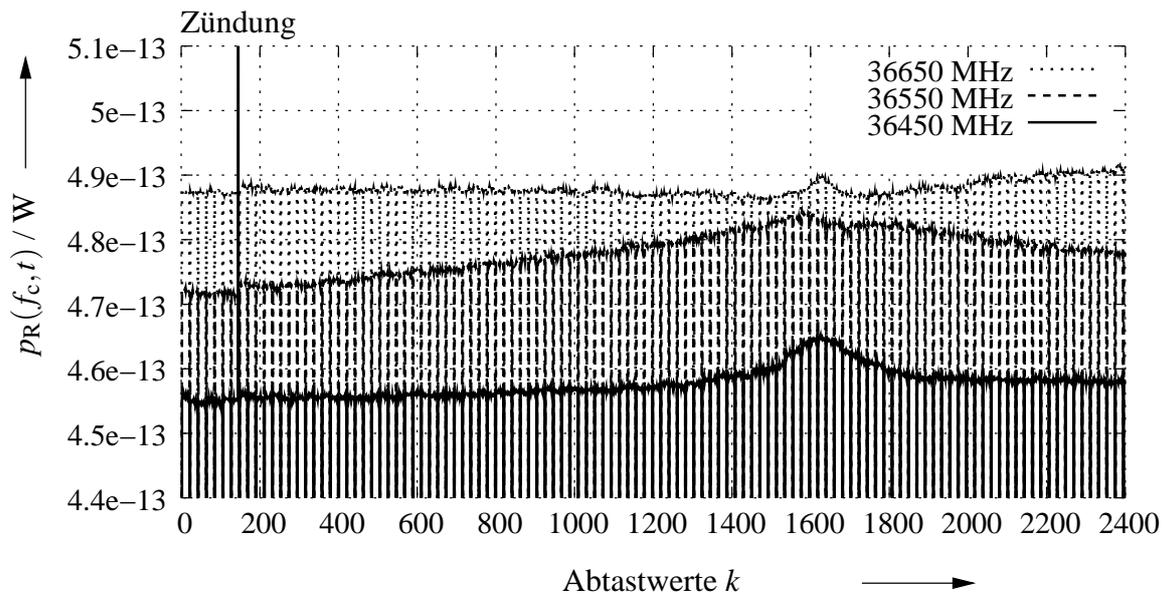


Bild 3.49: Empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF7 für die Messbereiche 36.45 GHz, 36.55 GHz und 36.65 GHz

bei $k \approx 145$ statt. Beim Messbereich 36.45 GHz folgt dann ein Anstieg der empfangenen Leistung $p_R(36.45 \text{ GHz}, t)$ mit geringer Steigung, bis sich bei ca. $k = 1600$ ein ausgeprägtes Maximum $p_R(36.45 \text{ GHz}, t_m)$ beobachten lässt. Anschließend fällt $p_R(36.45 \text{ GHz}, t)$ wieder ab. Der Leistungsanstieg im Messbereich 36.55 GHz zeigt eine größere Steigung als im Messbereich 36.45 GHz, allerdings ist das Maximum $p_R(36.55 \text{ GHz}, t_m)$ nicht ganz so ausgeprägt wie beim Messbereich 36.45 GHz.

Im Messbereich 36.65 GHz folgt der Zündung ein kleiner Sprung der Leistung $p_R(36.65 \text{ GHz}, t)$ und danach ein Bereich mit kleiner negativer Steigung. Kurz vor und kurz nach dem Maximum $p_R(36.65 \text{ GHz}, t_m)$ fällt die Leistung sogar unter den zu Raumtemperatur korrespondierenden Wert. Im Gegensatz zu den anderen Messbereichen steigt $p_R(36.65 \text{ GHz}, t)$ ab $k \approx 1800$ sogar an, bis $p_R(36.65 \text{ GHz}, t)$ einen nahezu konstanten Wert erreicht. Die Ursachen für dieses Verhalten sind nicht bekannt und können mit dem verwendeten Messaufbau nicht erforscht werden.

Bild 3.50 stellt die korrigierte empfangene Leistung $p_R(32.45 \text{ GHz}, t)$ über der Zeit t dar. Bei $t = 49 \text{ s}$ wurde der Brand gezündet. Ab $t \approx 100 \text{ s}$ ist ein kleiner Anstieg in $p_R(32.45 \text{ GHz}, t)$ zu beobachten. Bei $t \approx 600 \text{ s}$ wird die Steigung größer und bei ca. $t = 750 \text{ s}$ erreicht

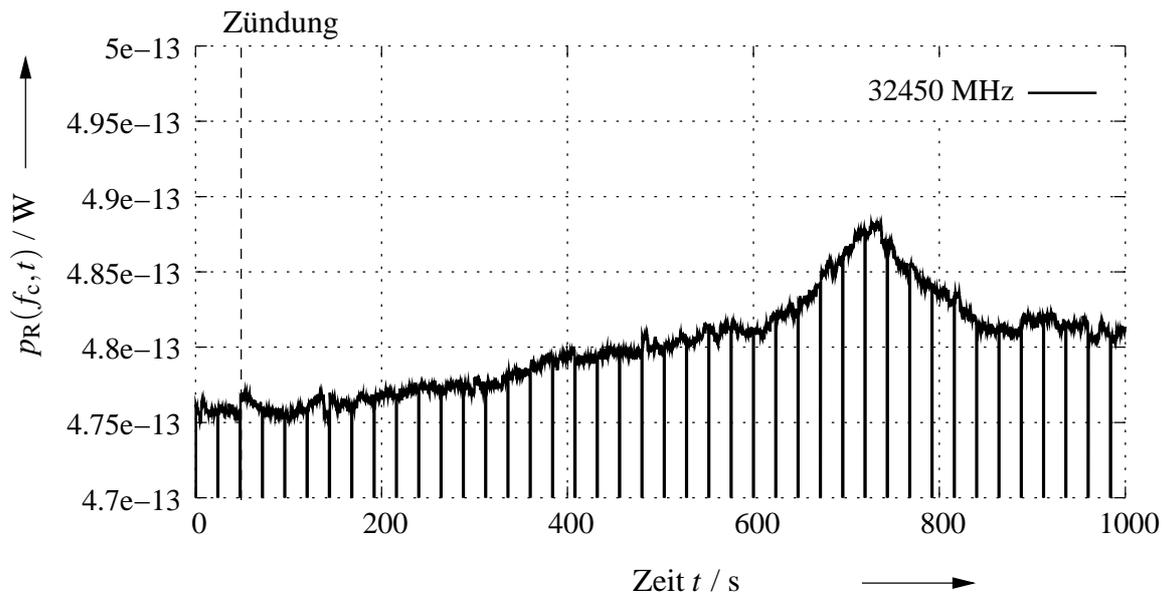


Bild 3.50: Empfangene Leistung $p_R(32.45 \text{ GHz}, t)$ eines TF7

$p_R(32.45 \text{ GHz}, t)$ sein Maximum. Danach fällt $p_R(32.45 \text{ GHz}, t)$ wieder ab, bis der Wert ab $t \approx 900 \text{ s}$ nahezu konstant bleibt. Dieser Leistungsverlauf spiegelt den beobachtbaren Brandverlauf wieder, denn das Dekalin wird mittels Ethanol gezündet. Nach der Zündung entsteht eine kleine Flamme, die mit fortschreitender Dauer langsam größer wird. Gegen Ende des Brandes wird die Verbrennung sehr heftig und verlöscht sehr schnell.

Bild 3.51 stellt die empfangene Leistung $p_R(31.05 \text{ GHz}, t)$ eines TF7 für den Aufbau eines TF5a dar, um den Einfluss der Flammen auf $p_R(31.05 \text{ GHz}, t)$ beurteilen zu können. Bei $t \approx 78 \text{ s}$ wurde der Brand gezündet. Danach steigt $p_R(31.05 \text{ GHz}, t)$ leicht an. Bei dieser Messung ist kein ausgeprägtes Maximum der empfangenen Leistung $p_R(31.05 \text{ GHz}, t)$ erkennbar, trotzdem ist ein Einfluss der Flammen in $p_R(31.05 \text{ GHz}, t)$ zu beobachten. Die maximale Leistungsdifferenz $\Delta p_R(31.05 \text{ GHz}, \Delta t_m)$ zwischen Start- und Maximalleistung ist aber geringer als beim herkömmlichen Versuchsablauf. Der Anteil der Flammen bzw. der Flüssigkeit an der empfangenen Leistung $p_R(31.05 \text{ GHz}, t)$ kann aber wie schon bei TF5 und TF6 mit dem Messaufbau nicht bestimmt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass auch das TF7 eine kleine maximale Leistungsdifferenz $\Delta p_R(f_c, \Delta t_m)$ zwischen der Start- und Maximalleistung aufweist. Eine Detektion des TF7 ist aber durch den frequenzabhängigen zeitlichen Verlauf der Leistung $p_R(f_c, t)$ möglich.

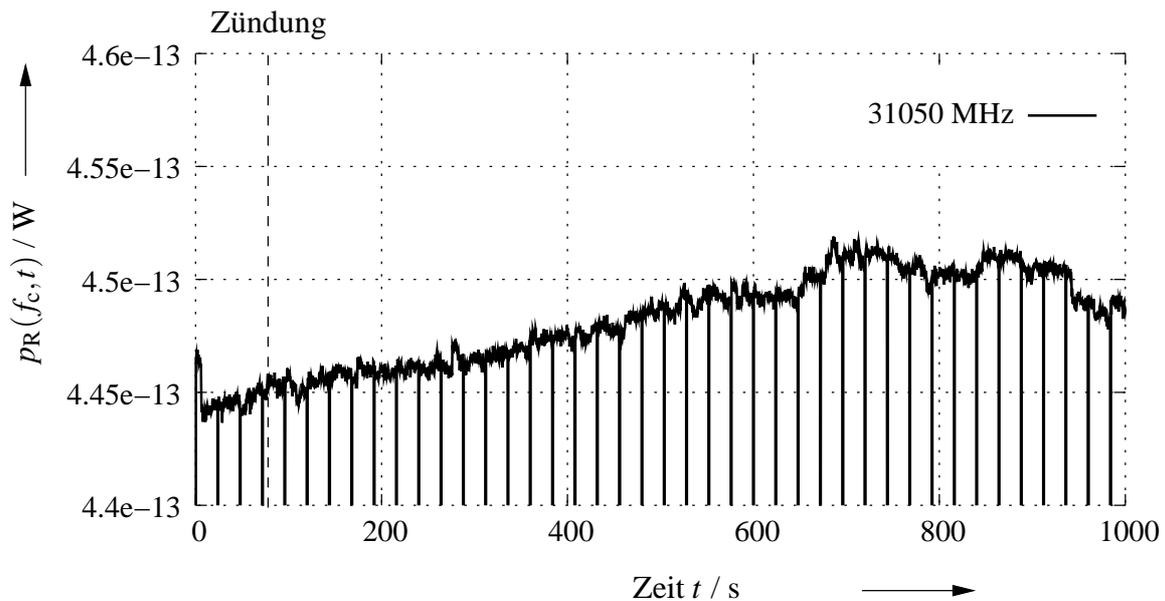


Bild 3.51: Empfangene Leistung $p_R(31.05 \text{ GHz}, t)$ der Flammen eines TF7

3.3.9 Zusammenfassung

Die Messungen der unterschiedlichen Testfeuer im Frequenzbereich von 26 GHz bis 40 GHz zeigt, dass die emittierte Leistung $p_F(f, T_F, A_F)$ der Wärmestrahlung von Feuern im Mikrowellenbereich geeignet ist, um diese Feuer zu detektieren. Es gibt dabei Unterschiede, die auf das Brandmaterial zurückzuführen sind, daher lassen sich die Brände, bei denen Feststoffe (TF1, TF2, TF2neu, TF3) verbrannt werden, leichter detektieren als Flüssigkeitsbrände (TF5, TF6, TF7). Zum einen ist die Leistungsdifferenz $\Delta p_R(f_c, \Delta t)$ größer als bei den Flüssigkeitsbränden und zum anderen sind nur geringe, frequenzabhängige Unterschiede im zeitlichen Verlauf der empfangenen Leistung $p_R(f_c, t)$ zu beobachten. Mit dem verwendeten Mess-System ist es nicht möglich, Messbereiche zu finden, in denen eine Detektion dieser Feuer wahrscheinlicher ist als in anderen Bereichen. Zwar ergeben sich in einigen Messbereichen größere maximale Leistungsdifferenzen $\Delta p_R(f_c, \Delta t_m)$ zwischen dem Wert der Startleistung $p_R(f_c, t_0)$ und der Maximalleistung $p_R(f_c, t_m)$, doch sind diese Unterschiede nicht sehr groß und auch von den verbrannten Materialien abhängig. In diesen Fällen ist außerdem der Einfluss des Mess-Systems, der beispielsweise durch nichtlineare Verstärker hervorgerufen wird, nicht zu vernachlässigen. Für die Schwelbrände TF2, TF2neu und TF3 sind Hinweise vorhanden, dass eine Detektion möglicherweise früher möglich ist als mit den zur Zeit verbreiteten Rauch- bzw. Gasdetektions-

methoden, da sich Unterschiede von mehreren Minuten in der Reaktionszeit der Messverfahren ergeben. Dies muss aber erst durch einen Detektor, der auf dem Prinzip der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich beruht, bestätigt werden.

Das Testfeuer TF4 steht zwischen den Feststoff- und den Flüssigkeitsbränden. In der Phase, in der das Material schmilzt, zeigt das Feuer eine große Leistungsdifferenz $\Delta p_R(f_c, \Delta t)$, so wie es bei den Feststoffbränden zu beobachten ist. Gegen Ende, in der Flüssigkeitsphase, wird die Leistungsdifferenz $\Delta p_R(f_c, \Delta t)$ dann kleiner, und ein frequenzabhängiges Zeitverhalten der Leistung $p_R(f_c, t)$ ist erkennbar, wie es bei den Flüssigkeitsbränden zu beobachten ist. Die Entstehungsphase eines Feuers spielt für eine Detektion eine große Rolle, deshalb ist das TF4 den Feststoffbränden zuzuordnen.

Die reinen Flüssigkeitsbrände sind mittels ihrer Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich schwerer zu entdecken, da die Leistungsdifferenzen $\Delta p_R(f_c, \Delta t)$ kleiner sind als für die Feststoffbrände. Ferner ist bei den Flüssigkeitsbränden TF5 und TF7 eine starke Frequenzabhängigkeit des zeitlichen Verlaufs der empfangenen Leistung $p_R(f_c, t)$ zu beobachten. Es kommt dabei sogar vor, dass in einigen Messbereichen die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ unter den Wert $p_R(f_c, t_0)$ zu Beginn der Messung fällt. Dies ist wahrscheinlich durch den Aufbau der Materialien bzw. durch die Vorgänge innerhalb der Materialien bei der Verbrennung zu erklären, da durch die Verbrennung der Aufbau der Materialien und damit der Emissionsgrad $w_\varepsilon(f_c, T)$ verändert wird. Die Erforschung der Ursachen ist mit dem Messaufbau allerdings nicht möglich. Das Messprinzip der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich könnte aber wichtige Rückschlüsse ermöglichen, da das Prinzip zur spektralen und dynamischen Analyse von Verbrennungen oder deren Kontrolle eingesetzt werden kann.

Das Messprinzip der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich liefert für alle verwendeten Testfeuer charakteristische Messdaten, die es möglich machen, die Feuer anhand der Messkurven auf den ersten Blick zu unterscheiden. Die Messdaten lassen sich durch Gleichung (1.11), die die empfangene Leistung $p_R(f_c, 100\text{MHz}, t)$ der Wärmestrahlung von Körpern beschreibt, erklären. Für ein Messband mit der Mittenfrequenz f_c und der Bandbreite Δf gilt:

$$p_R(f_c, \Delta f, t) = \frac{kAT}{8\pi^2 d^2} w_\varepsilon(f_c, T) G(f_c) \Delta f,$$

wobei der Körper durch seine strahlende Oberfläche A , seine Temperatur T und seinen Emissionsgrad $w_\varepsilon(f_c, T)$ beschrieben wird. Das frequenzabhängige Zeitverhalten der empfangenen

Leistung $p_R(f_c, 100\text{MHz}, t)$, wie es hauptsächlich bei den Flüssigkeitsbränden zu beobachten ist, hängt demnach nur vom Emissionsgrad ab, da $w_\varepsilon(f_c, T)$ der einzige Parameter ist, der sich während eines Feuers in Abhängigkeit der Frequenz f und, indirekt über die Brandtemperatur T , mit der Zeit t verändert. Die Abhängigkeit von der Oberfläche A des betrachteten Körpers ist für die Wärmestrahlung besonders zu betonen, da diese im Brandfall sehr schnell zunehmen kann. Entgegen der Erwartung, dass die Wärmestrahlung von Flammen eine größere emittierte Leistung $p_F(f, T_F, A_F)$ besitzt als die Wärmestrahlung glühenden Holzes, zeigen die Messergebnisse der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich aber, dass die empfangene Leistung $p_R(f_c, 100\text{MHz}, t)$ des glühendes Holzes viel größer als die empfangene Leistung $p_R(f_c, 100\text{MHz}, t)$ der Flammen ist. Dieser Widerspruch lässt sich zum einen durch die Oberfläche A auflösen, da das Holz eine sehr viel größere Oberfläche als die Moleküle der Brandgase innerhalb einer Flamme besitzt. Zum anderen darf bei Gasen der Einfluss des Emissionsgrades $w_\varepsilon(f_c, T)$ nicht vernachlässigt werden, der dazu führt, dass nur in bestimmten Frequenzbereichen Strahlung emittiert wird und eine Mittelung der empfangenen Leistung $p_R(f, 100\text{MHz}, t)$ des Feuers über die Bandbreite Δf des Mess-Systems daher eine Reduzierung der gemessenen Leistung $p_M(f_c, 100\text{MHz}, t)$ bewirkt.

3.4 Frequenzbereich 18 - 26 GHz

Dieser Abschnitt behandelt den Frequenzbereich 18 – 26GHz. Zu Beginn werden die Probleme diskutiert, die während der ersten Messungen erkannt wurden und die Änderungen bzw. Auswirkungen beschrieben, die sich daraus ergaben. Anschließend wird kurz auf die erzielten Messergebnisse, die sich von denen des Frequenzbereiches 26 – 40GHz unterscheiden, eingegangen.

Bereits bei den ersten Messungen innerhalb des Frequenzbereiches stellte sich heraus, dass nur sehr geringe Differenzen $\Delta p_M(f_c, \Delta t_m)$ zwischen der Start- und Maximalleistung gemessen wurden. Die Hauptursache dafür war die eingesetzte Antenne, die innerhalb des Frequenzbereiches 18 – 26GHz nur einen Gewinn von $G(f) = 15\text{dB}$ aufwies. Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, ist der Antennengewinn, bzw. sind die Halbwertsbreiten $\theta_{3\text{dB}}$ und $\phi_{3\text{dB}}$ ein Maß für die Richtwirkung der Antenne. Ist der Gewinn groß, weist die Antenne auch eine große Richtwirkung, also eine schmale Antennenhauptkeule auf. Bei kleinem Gewinn ist die Richt-

wirkung schwächer und daher die Hauptkeule breiter.

f / GHz	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$G(f) / \text{dB}$	13.5	13.9	14.4	14.8	15.2	15.5	15.9	16.2	16.6
$\theta_{3\text{dB}} / ^\circ$	41	39	37	35	33	32	31	29	28
$\phi_{3\text{dB}} / ^\circ$	41	38	37	35	33	32	30	29	28

Tabelle 3.3: Datenblatt der Hornantenne des Frequenzbereiches 18 – 26GHz

In Tabelle 3.3 ist der Gewinn, die vertikale Halbwertsbreite $\theta_{3\text{dB}}$ oder Halbwertsbreite der E-Ebene und die horizontale Halbwertsbreite $\phi_{3\text{dB}}$ (H-Ebene) für die eingesetzte Antenne aufgelistet. Mit steigender Frequenz f nimmt der Antennengewinn $G(f)$ zu, und die Halbwertsbreiten nehmen ab. $\theta_{3\text{dB}}$ und $\phi_{3\text{dB}}$ sind annähernd gleich groß, d. h. die Projektion der Hauptkeule auf eine Fläche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung ist für diese Antenne in erster Näherung ein Kreis, im allgemeinen Fall ergibt die Projektion eine Ellipse.

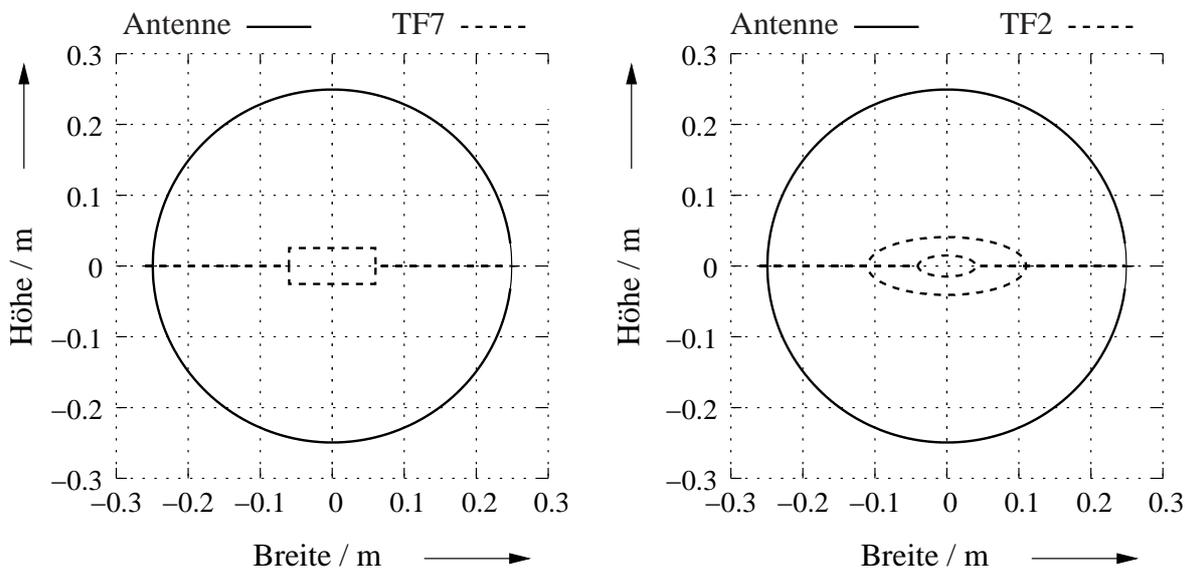


Bild 3.52: Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Fläche der Testfeuer TF7 (links) und TF2 (rechts)

Bild 3.52 stellt die Projektion der Hauptkeule auf einer Ebene dar, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung im Abstand d steht, also am Ort des Brandes. Das Mess-System fokussiert

den Brand unter einem bestimmten Winkel, deshalb sind die Brandflächen ebenfalls auf diese Fläche projiziert. Auf der linken Seite wird die Hauptkeulenprojektion (durchgezogene Linie) und die Grundfläche eines TF7 (gestrichelt) für die Frequenz 26 GHz gezeigt, d. h. für die kleinstmögliche Hauptkeule dieser Antenne. Die rechte Seite stellt die Projektion des TF2 dar, bei dem die Holzquader so auf der Heizplatte verteilt werden, dass sich ungefähr ein Ring ergibt. Aus diesem Bild wird deutlich, dass die Feuer nur einen Bruchteil der beobachteten Antennenfläche ausmachen, was durch den Füllfaktor $w_F(f)$ beschrieben wird. Tabelle 3.4 führt die Füllfaktoren $w_F(f)$ der unterschiedlichen Testfeuer für die verwendete Antenne auf. Der Füllfaktor $w_F(f)$ ergibt sich im günstigsten Fall zu ca. 53 %, im ungünstigsten Fall zu ca. 3 %.

Die Auswirkung des Füllfaktors $w_F(f)$ auf die empfangene Leistungsdifferenz $\Delta p_R(f_c, \Delta t)$ wird durch Gleichung (2.9): $\Delta p_R(f, \Delta t) = w_F(f) \cdot \Delta p_{R,F}(f, \Delta t)$ beschrieben.

Testfeuer	TF1	TF2	TF3	TF4	TF5	TF6	TF7
$w_F(f) / \%$ (für 26 GHz)	53	6	11	53	23	41	3

Tabelle 3.4: Füllfaktoren $w_F(f)$ der Testfeuer im Frequenzbereich 18 – 26 GHz

Die Leistungsdifferenz $\Delta p_{R,F}(f, \Delta t)$ der empfangenen Feuerleistung im Frequenzbereich 26 – 40 GHz kann aus der empfangenen Leistung $p_R(32.45 \text{ GHz}, t)$ bestimmt werden, da $w_F(26 – 40 \text{ GHz})$ für diesen Frequenzbereich bekannt ist. Unter der Voraussetzung, dass sich die Leistungsdifferenz $\Delta p_{R,F}(f, \Delta t)$ der empfangenen Feuerleistung im Frequenzbereich 18 – 26 GHz nicht ändert, kann $\Delta p_R(18 – 26 \text{ GHz}, \Delta t)$ wie folgt berechnet werden:

$$\Delta p_R(18 – 26 \text{ GHz}, \Delta t) = \frac{w_F(18 – 26 \text{ GHz})}{w_F(26 – 40 \text{ GHz})} \cdot \Delta p_R(26 – 40 \text{ GHz}, \Delta t),$$

d. h. die empfangene Leistungsdifferenz $\Delta p_R(18 – 26 \text{ GHz}, \Delta t)$ entspricht der empfangenen Leistungsdifferenz $\Delta p_R(26 – 40 \text{ GHz}, \Delta t)$, gewichtet mit dem Verhältnis der Füllfaktoren der beiden Frequenzbereiche. Für das TF7 ergibt sich beispielsweise ein Verhältnis der Füllfaktoren von

$$\frac{w_F(18 – 26 \text{ GHz})}{w_F(26 – 40 \text{ GHz})} = 0.11,$$

d. h. $\Delta p_R(18 – 26 \text{ GHz}, \Delta t)$ beträgt bei gleicher Differenz $\Delta p_{R,F}(f, \Delta t)$ der empfangenen Feuerleistung nur 11 % der Leistungsdifferenz $\Delta p_R(26 – 40 \text{ GHz}, \Delta t)$.

Der Aufbau des Mess-Systems wurde deshalb verändert, indem eine Antenne mit größerem Gewinn $G(f)$ eingesetzt wurde. Die Position der Antenne innerhalb des Mess-Systems wurde außerdem geändert, um die Leitung zwischen der Antenne und dem ersten Schalter verkürzen zu können. Die zweite Antenne hat einen nominalen Gewinn von $G(f) = 20\text{dB}$. In Tabelle 3.5 sind wichtige Parameter dieser Antenne aufgelistet.

f / GHz	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$G(f) / \text{dB}$	18.3	18.7	19.2	19.6	19.9	20.3	20.6	20.9	21.3
$\theta_{3\text{dB}} / ^\circ$	23	22	21	20	19	18	17	16	16
$\phi_{3\text{dB}} / ^\circ$	22	21	20	19	18	18	17	16	16
Testfeuer			TF1	TF2	TF3	TF4	TF5	TF6	TF7
$w_F(f) / \%$	(für 26 GHz)		87	20	45	87	61	74	10

Tabelle 3.5: Datenblatt der zweiten Hornantenne des Frequenzbereiches 18 – 26 GHz

Das Verhältnis der Füllfaktoren für ein TF7 mit der neuen Antenne ergibt sich zu:

$$\frac{w_F(18 - 26 \text{ GHz})}{w_F(26 - 40 \text{ GHz})} = 0.36,$$

was eine deutliche Vergrößerungen der Leistungsdifferenz $\Delta p_R(18 - 26 \text{ GHz}, \Delta t)$ der empfangenen Leistung bewirkt. Die Messungen mit der zweiten Antenne bestätigen diese Verbesserung, aber auch nach dem Umbau ergeben sich Messbereiche, in denen keine Änderungen in der gemessenen Leistung $p_M(f_c, t)$ beobachtet werden können, und zwar die Bereiche zwischen 18.45 – 19.45 GHz und über 25 GHz. Am Ende des Frequenzbereiches treten wahrscheinlich dieselben Schwierigkeiten auf, wie sie im Frequenzbereich 26 – 40 GHz zu beobachten waren. Die meisten eingesetzten Bauelemente (z.B. rauscharme Verstärker, Leitungen) haben zum Ende ihres Arbeitsbereiches eine etwas schlechtere Leistungsfähigkeit, was in der Summe dann zu größeren Einbußen führt. Die Messung der Streuparameter (siehe Anhang B) der Antenne ergab, dass der Betrag $|\underline{s}_{11}|$ des Streuparameters \underline{s}_{11} , der dem Reflektionsfaktor \underline{r} entspricht, im Bereich 18.45 – 19.45 GHz einen Wert nahe eins hatte. Dies hat zur Folge, dass die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ fast vollständig an der Antenne reflektiert wird und nicht in das Mess-System gelangt.

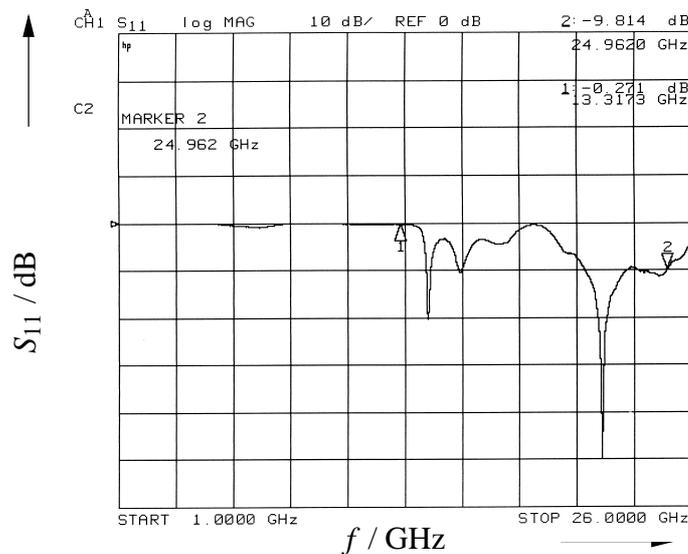


Bild 3.53: Betrag S_{11} des Streuparameters der zweiten Antenne des Frequenzbereiches 18 – 26 GHz

Bild 3.53, ein Abbild des Bildschirms des Netzwerkanalysators, stellt den logarithmierten Betrag $S_{11} = 20 \log(|s_{11}|)$ des Streuparameters in dB über der Frequenz dar. Im Bereich zwischen 18.45 – 19.45 GHz ist S_{11} nahe 0 dB, was bedeutet, dass der Betrag des Streuparameters nahe eins ist. Bei ca. 22 GHz ist S_{11} am kleinsten, d. h. bei dieser Frequenz empfängt die Antenne die meiste Leistung $p_R(f_c, t)$.

Bild 3.54 stellt die Leistungswerte $p_M(f_c, t_0)$ zu Beginn der Messung – korrespondierend mit der Raumtemperatur – und im Maximum $p_M(f_c, t_m)$ gegenüber, da diese Kurven prinzipiell das Verstärkungsverhalten $G_{MS}(f)$ des Mess-Systems im Bereich 18 – 26 GHz beschreiben. Die Frequenzabhängigkeit von $G_{MS}(f)$ ist wieder deutlich erkennbar. Innerhalb der Messbereiche, die aufgrund des Streuparameters s_{11} nicht funktionieren, sind die Leistungen $p_M(f_c, t_0)$ und $p_M(f_c, t_m)$ zu null gesetzt. Bild 3.54 zeigt, dass die Gesamtverstärkung $G_{MS}(f)$ mit zunehmender Frequenz f kleiner wird.

Ein weiterer Nachteil, der sich innerhalb dieses Frequenzbereiches gezeigt hat, ist die verwendete Kalibrierlast. Es handelt sich dabei um einen Abschlusswiderstand für den Frequenzbereich 2 – 26 GHz, der über eine ca. 1 m lange Teflonleitung an den ersten Schalter angeschlos-

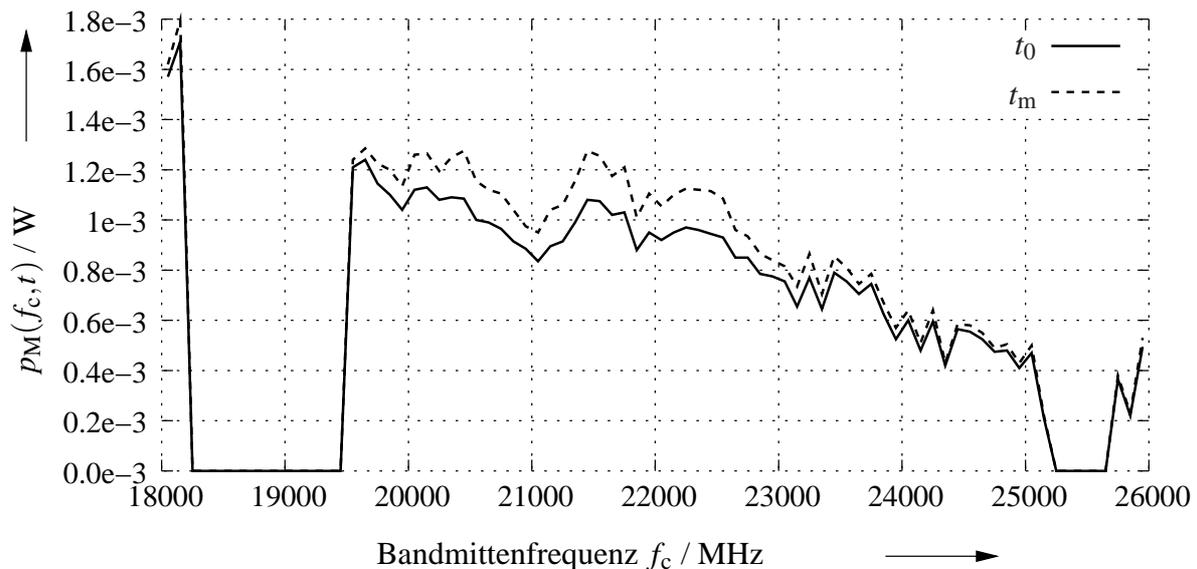


Bild 3.54: Startleistung $p_M(f_c, t_0)$ und Maximalleistung $p_M(f_c, t_m)$ eines TF1

sen ist. Die lange Teflonleitung ist notwendig, um die Temperaturisolierung der Kalibrierlast zu gewährleisten. Bei dem Abschlusswiderstand des Frequenzbereiches 26 – 40 GHz handelt es sich um einen Hohlleiterwiderstand, dessen Temperaturisolierung durch ein kurzes Stück Delrinhohlleiter erreicht wird. Die Temperaturisolierung bewirkt eine entsprechende Dämpfung der Leistung $p_{KL}(f, t)$ der Kalibrierlast, die im Frequenzbereich 2 – 26 GHz deutlich größer ist als im Frequenzbereich 26 – 40 GHz. Deshalb sind die absoluten Werte der korrigierten Leistung $p_R(f_c, t)$ in dem Frequenzbereich 2 – 26 GHz nicht mit $p_R(f_c, t)$ im Frequenzbereich 26 – 40 GHz vergleichbar, sondern nur die zeitlichen Verläufe der Leistungen $p_M(f_c, t)$ bzw. $p_R(f_c, t)$. Dabei wurde Folgendes festgestellt.

Im Gegensatz zum Frequenzbereich 26 – 40 GHz ist für das Testfeuer TF6 ein frequenzabhängiges zeitliches Verhalten der gemessenen Leistung $p_M(f_c, t)$ im Frequenzbereich zwischen 18 – 26 GHz zu beobachten.

Bild 3.55 stellt die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ eines TF6 des Messbereiches 20.95 GHz dar. Die Zündung fand bei $t \approx 86$ s statt, was zu einer kleinen Signalspitze in der empfangenen Leistung $p_R(20.95 \text{ GHz}, t)$ führt. Danach nimmt $p_R(20.95 \text{ GHz}, t)$ bis ca. $t = 170$ s ab. Es folgt ein Abschnitt, in dem $p_R(20.95 \text{ GHz}, t)$ wieder ansteigt und bei $t \approx 600$ s die Leistung $p_R(20.95 \text{ GHz}, t_0)$ zu Beginn der Messung erreicht. Im weiteren Verlauf fällt $p_R(20.95 \text{ GHz}, t)$

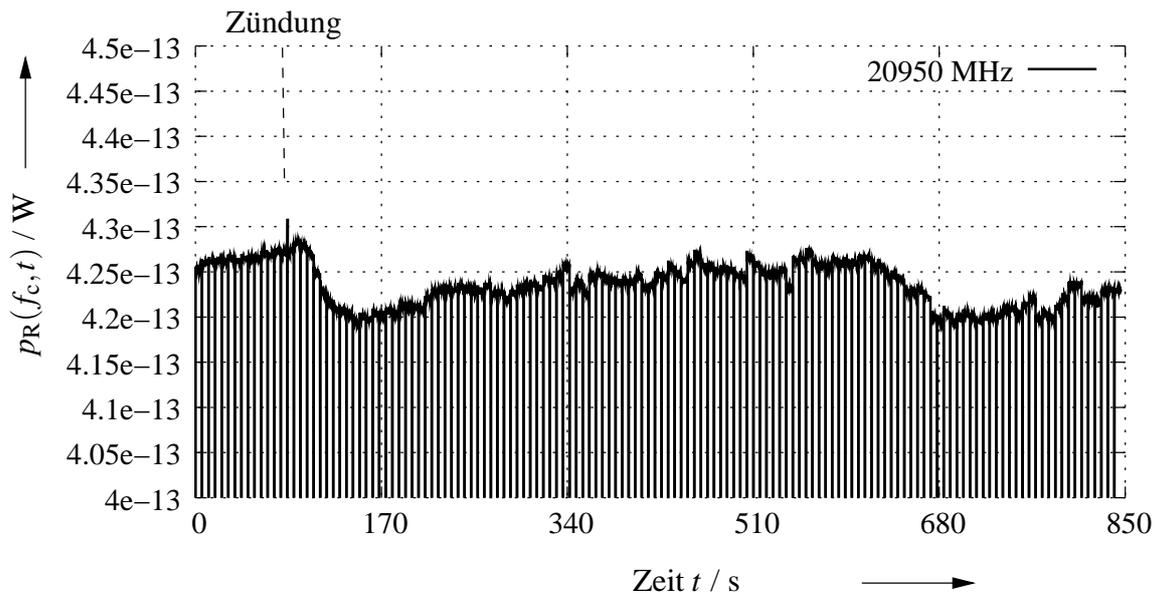


Bild 3.55: Empfangene Leistung $p_R(20.95 \text{ GHz}, t)$ eines TF6

ab und erreicht erst wieder nach Ende des Feuers den Wert der Startleistung $p_R(20.95 \text{ GHz}, t_0)$. Das zeitliche Verhalten der empfangenen Leistung $p_R(f_c, t)$ in anderen Messbereichen entspricht dem des Frequenzbereiches 26 – 40 GHz.

Das zeitliche Verhalten von $p_R(f_c, t)$ des TF4 weist ebenfalls Unterschiede zum Frequenzbereich 26 – 40 GHz auf, die in der ersten Phase, also beim Schmelzen des Polyurethans, zu beobachten sind. In einigen Messbereichen fällt hier die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ kurz nach der Zündung unter die Startleistung $p_R(f_c, t_0)$, bevor der Anstieg von $p_R(f_c, t)$ zu beobachten ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass auch im Frequenzbereich 18 – 26 GHz die Testfeuer typische Änderungen in der emittierten Leistung $p_F(f, T_F, A_F)$ der Wärmestrahlung aufweisen. Die Leistungsdifferenzen $\Delta p_R(f_c, \Delta t)$ sind allerdings nicht so deutlich wie im Frequenzbereich 26 – 40 GHz, was u. a. auf den kleineren Füllfaktor $w_F(f)$ bzw. den kleineren Antennengewinn $G(f)$ und die größere Dämpfung durch die Leitung zwischen Antenne und erstem Schalter zurückzuführen ist.

3.5 Frequenzbereich 12 - 18 GHz

Dieser Abschnitt beschreibt die Eigenschaften des Mess-Systems im Frequenzbereich 12 – 18 GHz und zeigt Messergebnisse, die von denen im Frequenzbereich 26 – 40 GHz abweichen.

Die verwendete Hornantenne hat einen nominalen Gewinn von $G(f) = 20\text{dB}$. Dies entspricht dem Gewinn $G(f)$ der zweiten Antenne des Frequenzbereiches 18 – 26 GHz. Es ergeben sich daher ähnliche Füllfaktoren $w_F(f)$ wie im nächst größeren Frequenzbereich. Tabelle 3.6 listet die maximalen Füllfaktoren $w_F(f)$ auf, die sich für die kleinsten Halbwertsbreiten (bei 18 GHz) ergeben.

Testfeuer	TF1	TF2	TF3	TF4	TF5	TF6	TF7
$w_F(f) / \%$ (18 GHz)	89	23	47	89	63	80	11

Tabelle 3.6: Füllfaktoren $w_F(f)$ der Testfeuer im Frequenzbereich 12 – 18 GHz

Bild 3.56 stellt die Leistungswerte $p_M(f_c, t_0)$ eines TF1 zu Beginn der Messung – korrespondierend mit der Raumtemperatur – und im Maximum $p_M(f_c, t_m)$ gegenüber, da diese

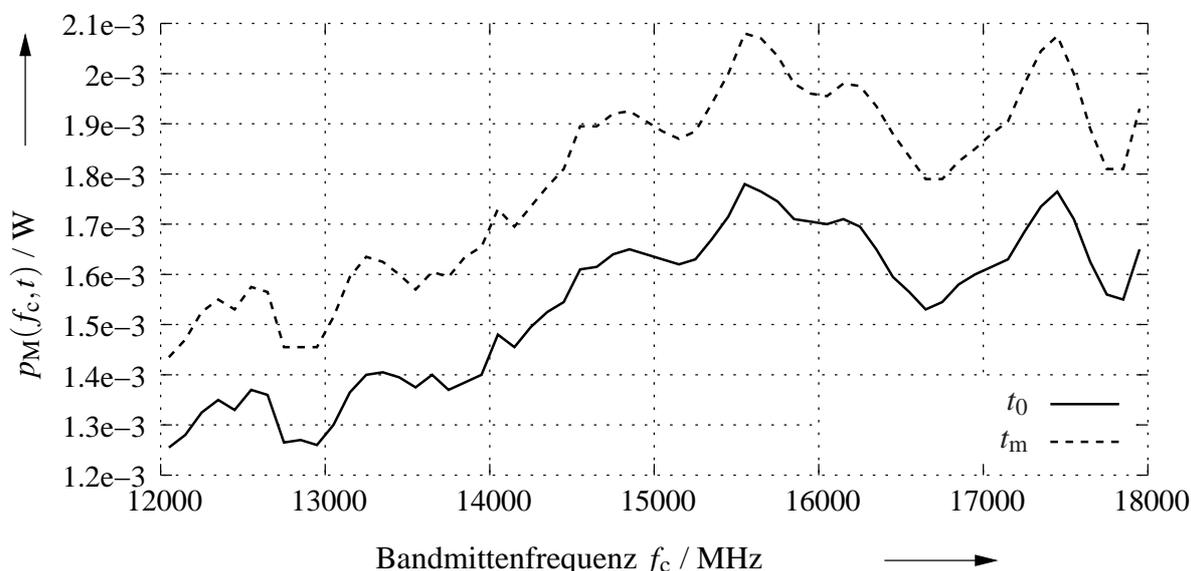


Bild 3.56: Startleistung $p_M(f_c, t_0)$ und Maximalleistung $p_M(f_c, t_m)$ eines TF1

Kurven prinzipiell das Verstärkungsverhalten $G_{MS}(f)$ des Mess-Systems im Bereich zwischen

12 – 18 GHz beschreiben. Die Frequenzabhängigkeit von $G_{MS}(f)$ ist wieder deutlich erkennbar. Die maximale Leistungsdifferenz $\Delta p_M(f_c, \Delta t_m)$ ist in allen Messbereichen nahezu gleich, und gegen Ende des Frequenzbereiches fällt $G_{MS}(f)$ auch nicht ab. Die eingesetzten Bauteile weisen eine Grenzfrequenz von $f_g = 26$ GHz auf, deshalb ist auch kein Abfall ihrer Leistungsfähigkeit zu erwarten.

Die Messergebnisse für die Testfeuer TF1, TF2neu, TF3 und TF6 weisen große Ähnlichkeit mit den Ergebnissen im Frequenzbereich 26 – 40 GHz auf. Unterschiede ergeben sich aber für die Feuer TF4, TF5 und TF7. Beim Testfeuer TF4 kann kein frequenzabhängiges Verhalten während der Flüssigkeitsphase festgestellt werden. Die Leistungsdifferenz $\Delta p_M(f_c, \Delta t)$ ist in der Flüssigkeitsphase sehr klein, so dass sich $p_M(f_c, t)$ in dieser Phase kaum von der Startleistung $p_M(f_c, t_0)$, die der Raumtemperatur entspricht, unterscheidet.

Auch für die Feuer TF5 und TF7 gilt, dass kaum Veränderungen in der gemessenen Leistung $p_M(f_c, t)$ zu beobachten sind.

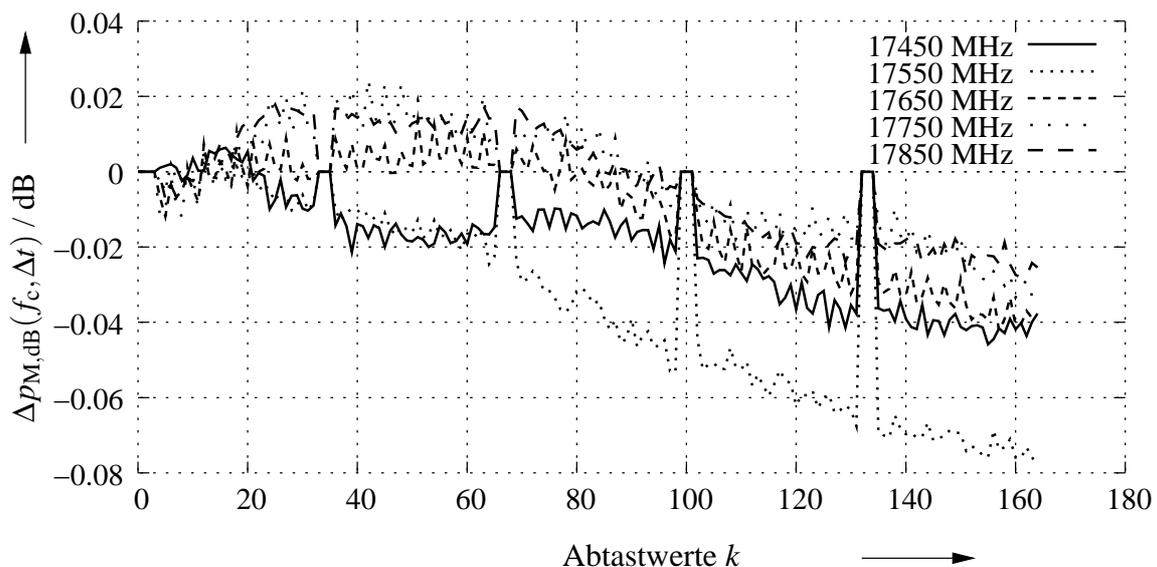


Bild 3.57: Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF5 der Messbereiche zwischen 17.45 – 17.85 GHz

Bild 3.57 stellt die Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ eines TF5 für die Messbereiche zwischen 17.45 – 17.85 GHz über den Abtastwerten k dar. In den Messbereichen 17.75 GHz und 17.85 GHz kann im Bereich $10 \leq k \leq 90$ eine sehr kleine Erhöhung der Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ beobachtet werden. Das Mess-System funktioniert im Bereich zwischen 12 –

18 GHz besser als im Frequenzbereich 18 – 26 GHz. Dort sowie im Frequenzbereich 26 – 40 GHz ist eine Erhöhung der Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ sichtbar, daher scheinen die Flüssigkeiten im Frequenzbereich 12 – 18 GHz weniger Leistung $p_F(f, T_F, A_F)$ der Wärmestrahlung zu emittieren.

3.6 Frequenzbereich 2 - 12 GHz

Dieser Abschnitt schildert die Probleme, die sich im Frequenzbereich 2 – 12 GHz ergeben haben. Schon bei den ersten Testmessung fiel auf, dass die gemessene Leistung $p_M(f_c, t)$ nicht von der Wärmestrahlung des beobachteten Körpers, einem Mikrowellenabsorber mit der Grundfläche $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$, abhängt.

Bild 3.58 stellt die gemessene Leistung $p_M(f_c, t)$ für die Mittenfrequenz $f_c = 11.55\text{ GHz}$ dar. Zwischen der zweiten und dritten Kalibration wurde der Absorber, der ca. Raumtemperatur hatte, vor die Antenne gehalten. Zu den anderen Zeiten wurde die Umgebung der Antenne gemessen. Die Messung dieses Versuchsablaufs sollte eine nahezu konstante Leistung $p_M(11.55\text{ GHz}, t)$ liefern. Der Verlauf der gemessenen Leistung $p_M(11.55\text{ GHz}, t)$ widerspricht dieser Erwartung völlig. Die Leistung $p_M(11.55\text{ GHz}, t)$ während der Messung des Absorbers, also für $650 \leq k \leq 1200$, liegt deutlich unterhalb der Leistung $p_M(11.55\text{ GHz}, t)$ für $k < 650$ bzw. $k > 1200$ bei der Umgebungsmessung. Dies lässt auf eine Störquelle schließen, die die empfangene Leistung $p_{R,F}(f, t)$ der Wärmestrahlung des Feuers bei weitem übertrifft. Die Störquelle wurde als Mobilfunk identifiziert, der in den Bereichen um etwa 900 MHz (D-Netz), 1800 MHz (E-Netz) bzw. 2000 MHz (UMTS) zur mobilen Telefonie und um 2450 MHz (Bluetooth bzw. WLAN) und in Zukunft um 5200 MHz und 5600 MHz (WLAN) zur Datenübertragung genutzt wird. Ein Hochpassfilter mit der Grenzfrequenz $f_g = 3000\text{ MHz}$ wurde eingesetzt, um die Störquellen auszublenden.

Bild 3.59 stellt die Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, t)$ der Messbereiche zwischen 7.45 – 7.85 GHz nach dem Einbau des Filters für einen weiteren Absorbersversuch dar. Dabei wurde der Absorber über einen Heizlüfter, der 30 s nach Beginn der Messung (ca. $k = 50$) eingeschaltet wurde, aufgeheizt. Der Heizlüfter wurde nach 180 s (ca. $k = 350$) abgeschaltet. Die gemessene Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ entspricht diesem Versuchsablauf in allen Messbereichen, d. h. durch das Filter konnte die Störstrahlung unterdrückt werden. An diesem Beispiel wird

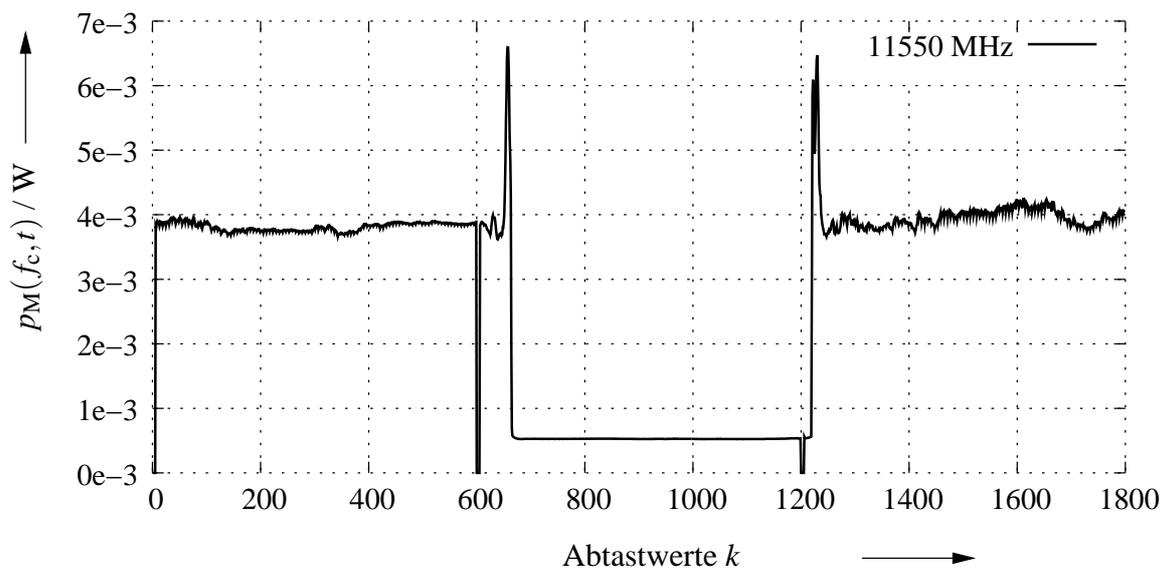


Bild 3.58: Gemessene Leistung $p_M(11.55 \text{ GHz}, t)$ des Absorberversuches

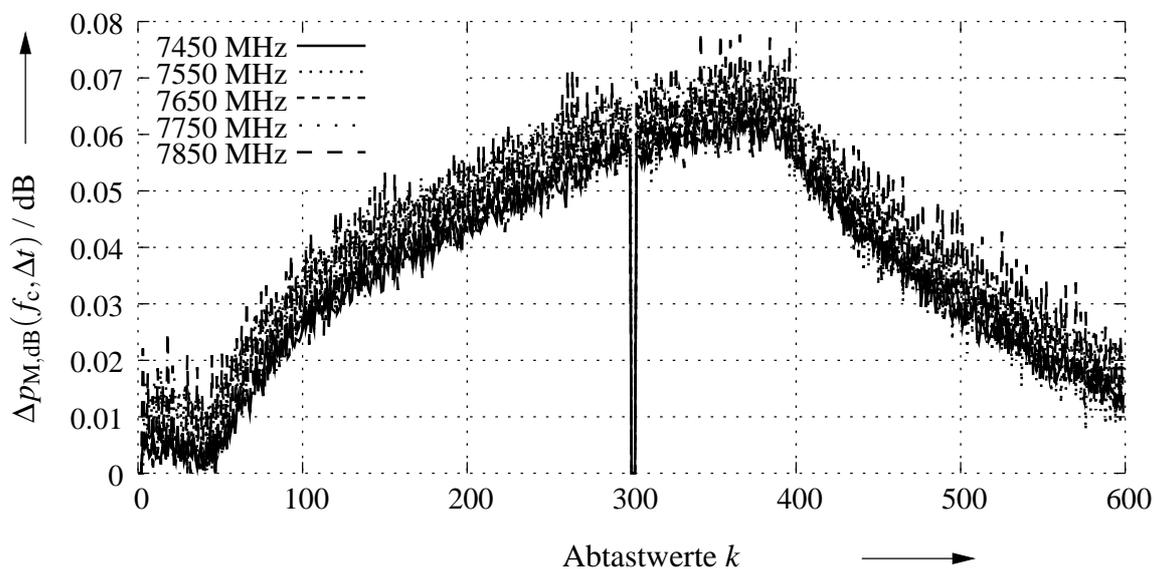


Bild 3.59: Leistungsdifferenz $\Delta p_{M,dB}(f_c, \Delta t)$ der Wärmestrahlung eines Absorbers mit unterschiedlicher Temperatur der Messbereiche zwischen 7.45 – 7.85 GHz

deutlich, dass Störquellen, die Leistung im Mikrowellenbereich aussenden, die automatische Detektion von Feuern in diesen Bereichen erheblich erschweren.

Das nächste Problem innerhalb dieses Frequenzbereiches stellt die verwendete Antenne dar, deren Gewinn $G(f)$ zwischen 9 dB und 14 dB schwankt. $G(f)$ ist kleiner als der Gewinn der ersten Antenne im Frequenzbereich 18 – 26 GHz, deren Füllfaktor $w_F(f)$ zu klein war, um die Wärmestrahlung der Feuer messen zu können. Antennen mit für diese Anwendung ausreichendem Gewinn $G(f)$ sind in diesem Frequenzbereich schwer zu bauen, da diese dann sehr groß werden würden. Mit zunehmender Größe wird auch der notwendige Abstand zur Einhaltung der Fernfeldbedingung größer, der in diesem Frequenzbereich schon nicht eingehalten werden konnte. Es war daher nicht möglich, die emittierte Leistung $p_F(f, T_F, A_F)$ der Wärmestrahlung der Testfeuer in diesem Frequenzbereich zu messen.

3.7 Zusammenfassung

Die Messergebnisse in den Frequenzbereichen 12 – 18 GHz, 18 – 26 GHz und 26 – 40 GHz zeigen, dass die Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich zur automatischen Brandentdeckung eingesetzt werden kann. Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich ergänzt dabei die bestehenden Methoden zur automatischen Brandentdeckung, da eine bisher nicht genutzte Größe herangezogen wird. Die Messungen innerhalb des Frequenzbereiches 2 – 12 GHz zeigen aber, dass andere Strahlungsquellen im Mikrowellenbereich eine Detektion, dort wo diese Störer senden, erheblich erschweren.

Die Überlegung, dass brennende Festkörper leichter zu detektieren sind als Flüssigkeitsbrände, hat sich durch die Messungen bestätigt. Flüssigkeitsbrände können aber anhand der gemessenen Leistung $p_M(f_c, t)$ der Wärmestrahlung in unterschiedlichen Frequenzbändern charakterisiert werden. Es erscheint somit möglich, im Mikrowellenbereich spektroskopische Methoden zur Ermittlung des brennenden Materials erfolgreich einzusetzen.

Anhand der zeitlichen Änderungen innerhalb der gemessenen Leistung $p_M(f_c, t)$ scheint es auch möglich, Rückschlüsse auf den Verbrennungsprozess und die damit verbundenen molekularen Veränderungen innerhalb des Materials zu ziehen. Um diese These zu untermauern, bedarf es allerdings weiterer Anstrengungen, dazu zählt der Aufbau eines kalibrierten Messsystems, das den Vergleich der absoluten Leistungswerte $p_R(f_c, t)$ zu allen Zeiten und für alle

Messbänder ermöglicht. Die Leistungswerte sollten ferner unabhängig vom Füllfaktor $w_F(f)$ sein, was einen geänderten Versuchsaufbau erfordert. Dieser sollte es auch gestatten, die Leistungsanteile zu separieren, die durch Flammen bzw. Brandmaterial hervorgerufen werden.

Kapitel 4

Anwendungsbeispiel

Dieses Kapitel stellt ein mögliches Anwendungsbeispiel für die automatische Brandentdeckung durch Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich vor. Es handelt sich dabei um die Überwachung von Förderbändern, die Güter, wie z. B. Kohle, transportieren (siehe Bild 4.1). Die Umgebung solcher Förderbänder ist meist sehr verschmutzt und verstaubt, was für die herkömmlichen Brandentdeckungsmethoden problematisch ist.

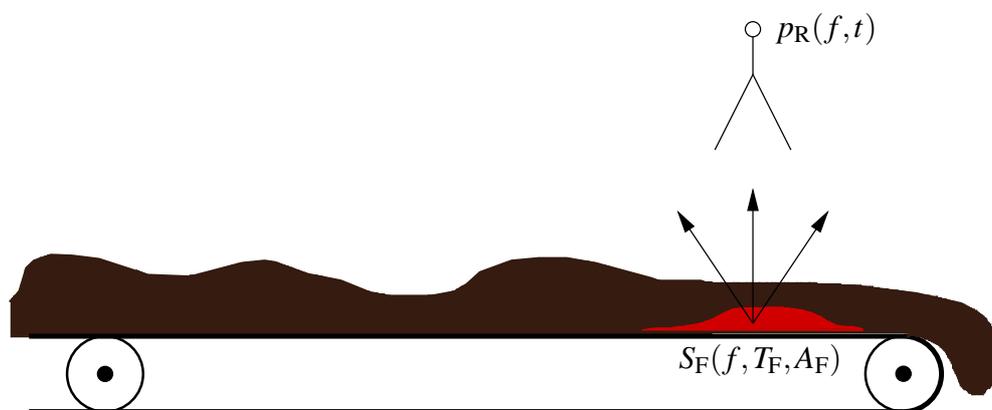


Bild 4.1: Schmelzbrand auf einem Kohlenförderband

Aus diesem Grund wird versucht, Entstehungsbrände auf Förderbändern mittels Gassensoren zu detektieren [24]. In [10] wird die Überwachung eines Förderbandes innerhalb einer Zementfabrik mit neun Gassensoren beschrieben. Durch die verschmutzte und feuchte Umgebung mussten die Detektorköpfe alle 3 Monate ausgetauscht werden.

Die automatische Brandentdeckung mittels Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich stellt

in diesen Bereichen eine Alternative dar. Die Position des Brandes ist auf das Förderband beschränkt, deshalb kann der mögliche Brand leicht fokussiert werden, d. h. es ist kein zusätzlicher Aufwand zur Suche des Brandorts nötig. Ferner kann ein Gehäuse, wie es auch beim eingesetzten Mess-System verwendet wird, zum Schutz vor Staub und Dreck verwendet werden, ohne dass die Detektionsfähigkeit dadurch beeinträchtigt wird.

Um die Eignung des Messprinzips der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich für dieses Einsatzgebiet zu demonstrieren, wurde ein Förderband nachgebildet, auf dem Versuche mit Braunkohlenstaub im Brandentdeckungslabor der Universität Duisburg-Essen durchgeführt wurden. Die Nachbildung des Förderbandes besteht aus einer runden Metallschale mit einem Durchmesser d_s von ca. 32 cm, die, mittels Motor, mit unterschiedlichen Drehzahlen n gedreht werden kann.

Die Winkelgeschwindigkeit $\omega_s = 2\pi n$, mit der sich jeder Punkt der Schale dreht, ergibt sich durch Multiplikation der Drehzahl n mit 2π . Der Betrag $|\vec{v}|$ der tangentialen Bahngeschwindigkeit berechnet sich aus der Winkelgeschwindigkeit ω_s zu $|\vec{v}| = \pi n d_s$. Diese Geschwindigkeit entspricht der Transportgeschwindigkeit $|\vec{v}|$ eines Förderbandes, das sich allerdings in der Regel gradlinig bewegt.

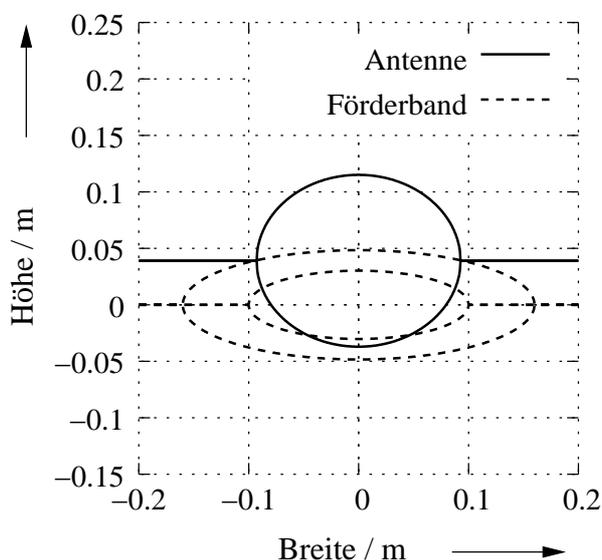


Bild 4.2: Projektion der Antennenhauptkeule auf eine Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung mit projizierter Braunkohleschicht

Das nachgebildete Förderband wurde ebenfalls auf das Podest gestellt, auf dem auch die anderen Brandversuche durchgeführt wurden. Der Abstand d zwischen dem Mess-System und dem Nachbau des Transportbandes betrug wieder ca. $d = 1$ m. Für den ersten Versuch wurde eine 6 cm breite und 0.8 cm dicke Schicht Braunkohlenstaub am Rand der Schale zum Schwelen gebracht. Bild 4.2 stellt die Projektion der Antennenhauptkeule und der Kohleschicht auf einer Ebene senkrecht zur Empfangsrichtung im Abstand d zum Mess-System dar.

Bei diesem Versuch wurde ein ca. 20 cm langes und durch den Beobachtungswinkel schmales Stück der Kohleschicht beobachtet, was im Frequenzbereich 26 – 40 GHz zu einem Füllfaktor von $w_F(f) = 0.13$ führt. Dieser ist somit kleiner als der Füllfaktor $w_F(f)$ des TF7.

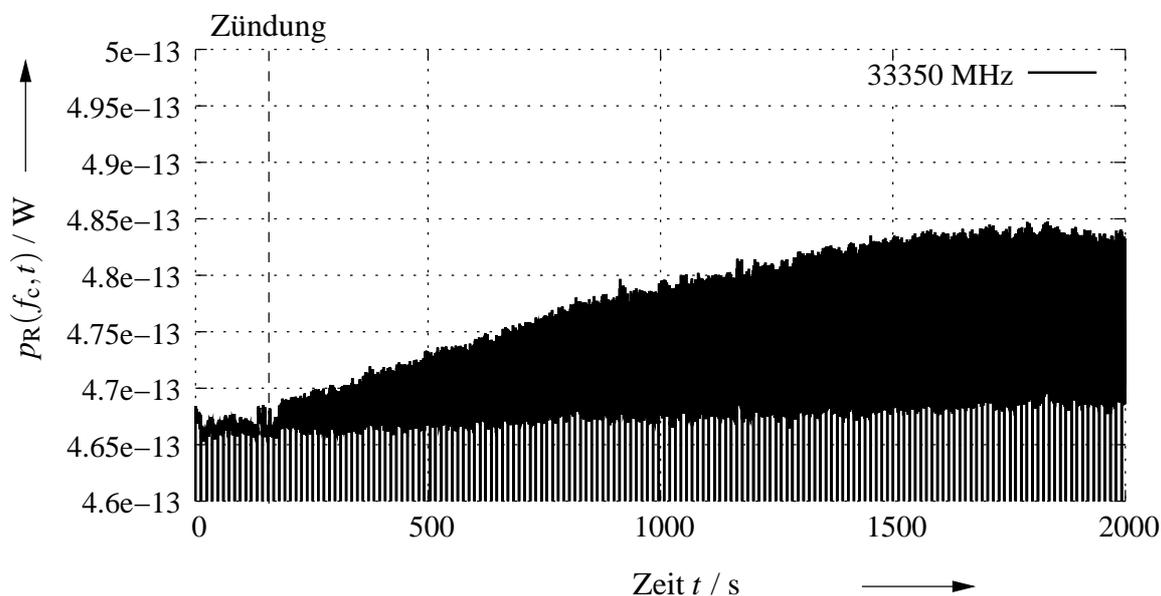


Bild 4.3: Empfangene Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ eines Braunkohleschwelbrandes auf dem nachgebildeten Förderband

Bild 4.3 stellt die empfangene Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ eines Braunkohleschwelbrandes auf dem nachgebildeten Förderband dar. Die Schale rotierte mit einer Drehzahl $n = 1$ U/s, was einer Transportgeschwindigkeit von $|\vec{v}| = 1$ m/s entspricht. Bei ca. $t = 160$ s wurde ein Segment der Braunkohle mittels Ethanol gezündet. Die empfangene Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ steigt bis $t \approx 1800$ s nahezu linear an, was darauf zurückzuführen ist, dass die schwelende Oberfläche immer größer wird und daher mehr Leistung $p_F(f, T_F, A_F)$ emittiert wird. Bild 4.4 zeigt Vergrößerungen der empfangenen Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ des Braunkohleschwelbrandes. Auf

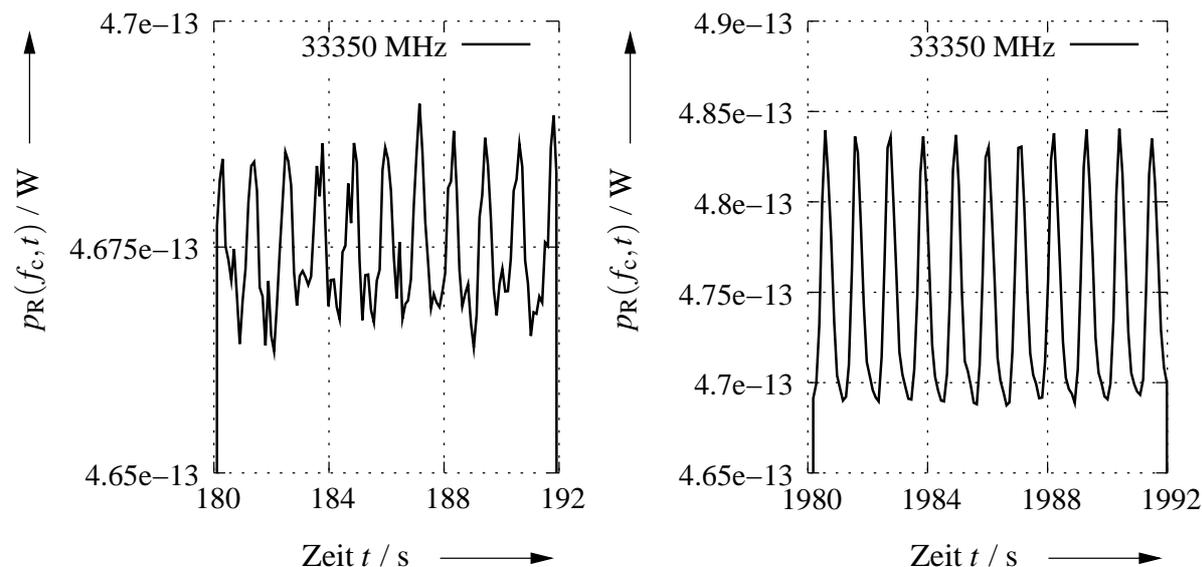


Bild 4.4: Empfangene Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ eines Braunkohleschwelbrandes auf dem nachgebildeten Förderband (Vergrößerungen)

der linken Seite ist $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ für einen Abschnitt kurz nach der Zündung dargestellt. Die rechte Seite zeigt die empfangene Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ in der Umgebung der Maximalleistung. Die Diagramme zeigen jeweils ein Ausschnitt zwischen zwei Kalibriermessungen. In beiden Diagrammen sind periodische Signale mit einer Periodendauer von ca. 1 s zu erkennen, was dem Kehrwert der Drehzahl $n = 1 \text{ U/s}$ entspricht. Der Unterschied von $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ kurz nach der Zündung und in der Umgebung des Maximums besteht in der Höhe der Signalmaxima, die anfangs kleiner sind.

Um den Einfluss unterschiedlicher Drehzahlen n bzw. Transportgeschwindigkeiten $|\vec{v}|$ zu demonstrieren, wurde die Drehzahl zwischen $0.23 \text{ U/s} \leq n \leq 1.67 \text{ U/s}$ variiert. Der Durchmesser d_s der Schale beträgt 32 cm, deshalb ist der Wert der Drehzahl n ungefähr gleich dem Betrag der Transportgeschwindigkeit, so dass dieser sich zwischen $0.23 \text{ m/s} \leq |\vec{v}| \leq 1.67 \text{ m/s}$ ändert. Diese Spanne deckt alle mit dem Nachbau des Förderbandes möglichen Geschwindigkeiten ab. Die Geschwindigkeit $|\vec{v}_2| = 1.67 \text{ m/s}$ ist aber kleiner als die Geschwindigkeiten, mit denen Kohlenförderbänder üblicherweise arbeiten. Bild 4.5 zeigt die empfangene Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ für die Geschwindigkeiten $|\vec{v}_1| = 0.23 \text{ m/s}$ (links) und $|\vec{v}_2| = 1.67 \text{ m/s}$ (rechts). Auf der linken Seite beträgt die Periodendauer ca. 4.3 s, was wieder dem Kehrwert der Drehzahl entspricht. Auf der rechten Seite beträgt die Periode ungefähr 0.6 s. Die Signalform

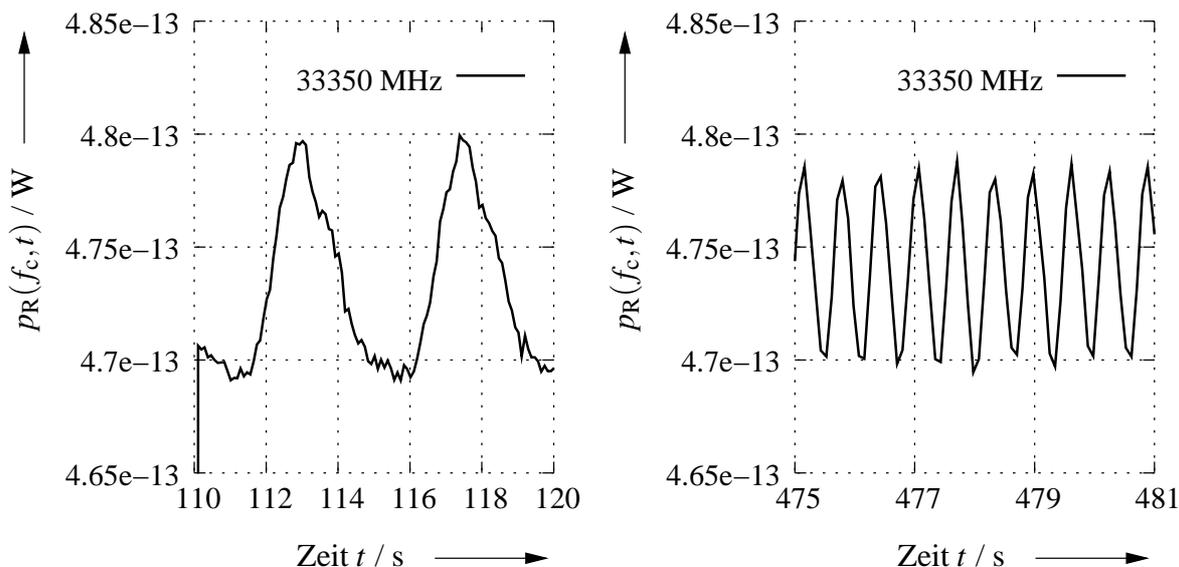


Bild 4.5: Empfangene Leistung $p_R(33.35\text{ GHz}, t)$ eines Braunkohleschmelbrandes auf dem nachgebauten Förderband mit unterschiedlichen Drehzahlen

rechts ist im Vergleich zur linken Seite tieffrequenter, der Verlauf ist also glatter. Die Minimal- und Maximalwerte rechts erreichen auch nicht ganz die entsprechenden Werte der linken Seite. Dies deutet auf ein Unterabtastung hin, d. h. die Transportgeschwindigkeit $|\vec{v}_2|$ ist so groß, dass der genaue zeitliche Verlauf der empfangenen Leistung $p_R(33.55\text{ GHz}, t)$ nicht gemessen werden kann.

Eine weitere Erhöhung der Transportgeschwindigkeit $|\vec{v}|$ führt dazu, dass das Glutnest nur für die Dauer t_g , die ein Bruchteil der Messdauer τ ist, innerhalb der Antennenhauptkeule verbleibt. Die empfangene Leistung $p_R(f, t)$ ergibt sich dann aus der Mittelung der empfangenen Leistung $p_{R,F}(f, t)$ des Feuers und der empfangenen Leistung $p_{R,K}(f, t)$ der nichtglühenden Braunkohle innerhalb der Hauptkeule zu

$$p_R(f, t) = w_t(t_g, \tau, x_0) \cdot p_{R,F}(f, t) + (1 - w_t(t_g, \tau, x_0)) \cdot p_{R,K}(f, t), \tag{4.1}$$

wobei der Zeitfaktor $w_t(t_g, \tau, x_0)$ die prozentuale Aufenthaltsdauer des Glutnests innerhalb der Hauptkeule bezogen auf die Messdauer τ repräsentiert. $w_t(t_g, \tau, x_0)$ hängt außerdem noch von der Position x_0 des Glutnests relativ zur Hauptkeule bei Beginn der Messung ab. Im ungünstigsten Fall wird während des Durchlaufs des Glutnests durch die Hauptkeule die Messung neu gestartet, so dass sich die Aufenthaltsdauer t_g des Glutnests auf zwei Messungen und so auf die

doppelte Messdauer aufteilt, d. h. es gilt:

$$w_{t,\min}(t_g, \tau) = \frac{t_g}{2\tau} - \left(\frac{t_g - 2\tau}{2\tau} \right) \cdot s(t_g - 2\tau) \quad \text{mit} \quad s(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}. \quad (4.2)$$

Der zweite Term, der die Sprungfunktion $s(t_g - 2\tau)$ enthält, stellt sicher, dass der minimale Zeitfaktor $w_{t,\min}(t_g, \tau)$ für Aufenthaltsdauern $t_g \geq 2\tau$ den Wert eins nicht überschreitet.

Die Aufenthaltsdauer t_g kann für die verwendeten Antennen aus der Transportgeschwindigkeit $|\vec{v}|$ des Förderbandes und der durchlaufenden Strecke $|\vec{s}|$ der Hauptkeule bestimmt werden, wobei letztere aus dem Abstand d zwischen Antenne und Förderband und der – in diesem Fall – horizontalen Halbwertsbreite $\phi_{3\text{dB}}$ der Antenne näherungsweise berechnet werden kann. Es gilt:

$$t_g = \frac{|\vec{s}|}{|\vec{v}|} \approx \frac{2d \tan\left(\frac{\phi_{3\text{dB}}}{2}\right)}{|\vec{v}|}.$$

Für die gezeigten Versuchsergebnisse bei der Geschwindigkeit $|\vec{v}_2|$ ergibt sich eine Aufenthaltsdauer innerhalb der Hauptkeule von $t_g \approx 112\text{ ms}$ bzw. ein Zeitfaktor $w_{t,\min}(112\text{ ms}, 75\text{ ms}) = 0.746$. Der Eindruck, dass eine Unterabtastung vorliegt, wird somit bestätigt.

Die maximale Geschwindigkeit v_{\max} , bei der noch keine Unterabtastung stattfindet, d. h. $w_{t,\min}(t_g, \tau) = 1$ gilt, ergibt sich für den Fall $t_g = 2\tau$ zu:

$$v_{\max} = \frac{|\vec{s}|}{2\tau} \approx \frac{d \tan\left(\frac{\phi_{3\text{dB}}}{2}\right)}{\tau}, \quad (4.3)$$

und liefert für die verwendete Versuchsanordnung $v_{\max} = 1.25\text{ m/s}$, was unterhalb der maximalen Geschwindigkeit $|\vec{v}_2| = 1.67\text{ m/s}$ des Förderbandnachbaus liegt. Gleichung (4.3) zeigt, dass die Geschwindigkeit v_{\max} , bei der noch keine Unterabtastung stattfindet, umso größer sein kann, je größer die Strecke $|\vec{s}|$ ist. Dies steht im Widerspruch zum räumlichen Auflösungsvermögen. Die Strecke $|\vec{s}|$ sollte möglichst klein sein, damit auch kleine Glutnester einen großen Füllfaktor $w_F(f)$ ergeben und somit ein gutes räumliches Auflösungsvermögen resultiert. Für die praktische Anwendung ist also ein Kompromiss zwischen zeitlichem und räumlichem Auflösungsvermögen zu finden.

Liegt die glühende Braunkohle zudem unter einer Schicht nicht glühender Braunkohle, kann die resultierende empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ des abgedeckten Glutnests mit Formel (1.12) aus Abschnitt 1.4 berechnet werden, und es gilt:

$$p_R(f_c, t) = p_{R,F}(f_c, t) \exp(-w_\alpha(f_c)x) + p_{R,K}(f_c, t) \cdot [1 - \exp(-w_\alpha(f_c)x)], \quad (4.4)$$

d. h. die empfangene Leistung $p_R(f_c, t)$ des abgedeckten Glutnests ergibt sich aus der gedämpften empfangenen Leistung $p_{R,F}(f_c, t)$ des Feuers (hier: der Glut) und der empfangenen Leistung $p_{R,K}(f_c, t)$ der Kohle über der Glut. x ist dabei die Schichtdicke der abdeckenden Kohle.

Bild 4.6 zeigt die empfangene Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ für einen weiteren Braunkohleschwelbrand.

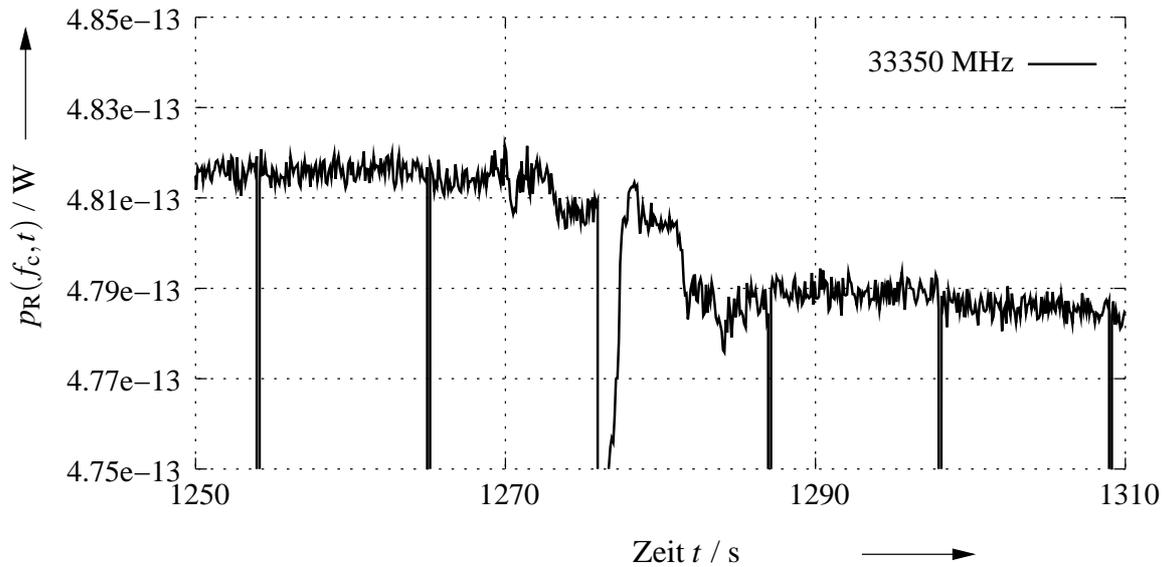


Bild 4.6: Empfangene Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ eines Braunkohleschwelbrandes mit zwischenzeitlicher Abdeckung

Die Braunkohle wurde als Scheibe mit einem Durchmesser von ca. 10 cm und einer Höhe von ungefähr 1.5 cm auf den Förderbandnachbau aufgebracht und anschließend zum Schwelen gebracht. Als die Glut sich über die ganze Kohlenfläche ausgebreitet hatte, wurde eine weitere Schicht Braunkohle mit einer Dicke von ca. 1 cm aufgebracht. Zwischen $1270 \text{ s} \leq t \leq 1285 \text{ s}$ ist das Aufbringen in der empfangenen Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ zu beobachten. Ein Vergleich der Leistungswerte vor und nach dem Aufbringen der Abdeckschicht ergibt eine Leistungsdifferenz von ca. $\Delta p_R(33.35 \text{ GHz}, \Delta t) = 26 \cdot 10^{-16} \text{ W}$. Aus dieser Messung lässt sich der Absorptionskoeffizient $w_\alpha(33.55 \text{ GHz})$ über

$$w_\alpha(33.55 \text{ GHz}) = \frac{1}{x} \cdot \ln \left(\frac{p_R(33.55 \text{ GHz}, 1260 \text{ s}) - p_R(33.55 \text{ GHz}, t_0)}{p_R(33.55 \text{ GHz}, 1290 \text{ s}) - p_R(33.55 \text{ GHz}, t_0)} \right)$$

zu $w_\alpha(33.55 \text{ GHz}) = 23.3 \text{ m}^{-1}$ abschätzen. Dabei wurde die Leistungen aus Gleichung 4.4 folgendermaßen aus der Messungen gewonnen: $p_R(f_c, t) = p_R(33.55 \text{ GHz}, 1290 \text{ s})$, $p_{R,F}(f_c, t) =$

$p_R(33.55 \text{ GHz}, 1260 \text{ s})$ und $p_{R,K}(f_c, t) = p_R(33.55 \text{ GHz}, t_0) = 4.69 \cdot 10^{-13} \text{ W}$. Die Abschätzung liefert nur die Größenordnung des Absorptionskoeffizienten $w_\alpha(33.55 \text{ GHz})$, da alle Leistungen aus den Messungen entnommen wurden und die Abdeckschicht nicht gleichmäßig aufgebracht werden konnte.

Bild 4.7 stellt die empfangene Leistung $p_R(33.55 \text{ GHz}, t)$ des abgedeckten Glutnests über der Schichtdicke x dar. Zur Berechnung wurde Gleichung (4.4) mit dem gerade abgeschätzten Absorptionskoeffizienten $w_\alpha(33.55 \text{ GHz})$ sowie die zur Bestimmung desselbigen genutzten Leistungen $p_{R,F}(33.55 \text{ GHz}, t)$ und $p_{R,K}(33.55 \text{ GHz}, t)$ verwendet.

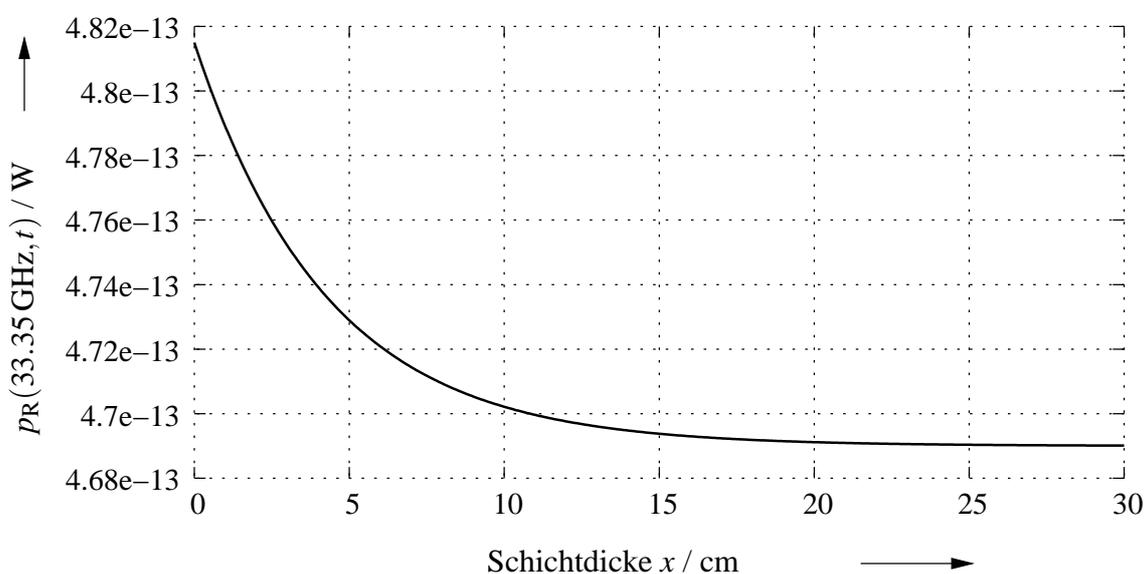


Bild 4.7: Empfangene Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ des abgedeckten Braunkohleschmelbrandes über der Schichtdicke x

Die empfangene Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ fällt mit steigender Schichtdicke x monoton ab. Bei ca. $x = 10 \text{ cm}$ hat die Leistung $p_R(33.35 \text{ GHz}, t)$ nahezu den Wert der nichtglühenden Kohle erreicht. Die Schichtdicke x einer abdeckenden Kohleschicht hat dementsprechend einen großen Einfluss auf die messbare Leistungsdifferenz $\Delta p_R(f_c, \Delta t)$. Sie muss deshalb beim Entwurf eines Branddetektors für Transportbänder berücksichtigt werden.

Werden alle auftretenden Phänomene zur Beschreibung der Wärmestrahlung auf einem Transportband zusammengefasst, ergibt sich die empfangene Leistung $p_R(f, t)$ zu:

$$p_R(f, t) = w_F(f) \cdot w_t(t_g, \tau, x_0) \cdot \exp(-w_\alpha(f)x) \cdot p_{R,F}(f, t) +$$

$$\begin{aligned}
& + w_F(f) \cdot [1 - w_t(t_g, \tau, x_0) \cdot \exp(-w_\alpha(f)x)] \cdot p_{R,K}(f, t) + \\
& + [1 - w_F(f)] \cdot p_{R,U}(f, t),
\end{aligned} \tag{4.5}$$

mit der empfangenen Leistung $p_{R,F}(f, t)$ des Feuers, $p_{R,K}(f, t)$ der empfangenen Leistung der nichtglühenden Kohle und $p_{R,U}(f, t)$ der empfangenen Leistung der Umgebung des Förderbandes.

Das Beispiel des Transportbandes zeigt, dass die automatische Brandentdeckung durch Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich für spezielle Einsatzgebiete schon jetzt interessante Lösungsalternativen bietet. Für eine allgemeinere Anwendbarkeit dieses Verfahrens ist es aber erforderlich, das Prinzip so zu erweitern, dass es die Detektion von Bränden mit unbekannter Position durch Messung der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich erlaubt. Dadurch wird der Realisationsaufwand zwar erhöht, aber ein entsprechendes System hätte dann den Vorteil, dass mit der Detektion auch sofort der Brandort bekannt ist. Dies ist bei der Bekämpfung von Feuern bzw. der Vermeidung von Fehlalarmen vorteilhaft. Daher ist die Bestimmung des Brandorts mit Hilfe anderer Messverfahren Gegenstand der aktuellen Forschung. In [2] wird beispielsweise der Brandort mittels mehrerer Temperatursensoren geschätzt.

Zusammenfassung

Erstmals wurde die Leistung der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums von standardisierten Testfeuern gemessen, um die Eignung dieser Methode zur automatischen Detektion von Bränden zu untersuchen. Ausgehend von der Idee zur Nutzung der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich in der automatischen Brandentdeckung, wurden die physikalischen Grundlagen der bestimmenden Phänomene beschrieben, ein Messsystem zur breitbandigen Messung der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich entwickelt und aufgebaut, dessen wesentlichen Eigenschaften dargestellt und entsprechende Messungen durchgeführt.

Die neuartige Anwendung des Messprinzips, das aus der Radioastronomie bekannt ist, im Bereich der automatischen Brandentdeckung ermöglichte die Messung der spektralen Verteilung der Leistung der Wärmestrahlung von Verbrennungsprozessen unterschiedlicher Materialien innerhalb des Frequenzbereiches 2 – 40 GHz.

Die Messungen zeigen, dass sich die Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich zur automatischen Brandentdeckung eignet. Es wurde festgestellt, dass diese Methode eine Unterteilung von Feuern in die Klassen Feststoff- und Flüssigkeitsbrände erlaubt. Bei Feststoffbränden ist ein deutlicher Anstieg in der gemessenen Leistung der Wärmestrahlung im Verlauf des Feuers zu beobachten, der eine Detektion von Bränden ermöglicht. Dieser Leistungsanstieg ist unabhängig von der Messfrequenz, d. h. er lässt sich im gesamten Frequenzbereich beobachten. Das Messprinzip der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich ermöglicht außerdem eine frühere Detektion von Schwelbränden, einer bestimmten Form der Feststoffbrände. Im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahren der automatischen Brandentdeckung kann dieser Unterschied bis zu einigen Minuten betragen.

Bei Flüssigkeitsbränden ist der Anstieg der gemessenen Leistung der Wärmestrahlung im

Verlauf des Feuers kleiner als bei den Feststoffbränden. Im Gegensatz zu den Feststoffbränden zeigt sich bei den Flüssigkeitsbränden außerdem eine Frequenzabhängigkeit der gemessenen Leistung. Für diese Brände ist daher die Anwendung spektroskopische Methoden zur Bestimmung des Brandmaterials möglich.

Alle betrachteten Feuer weisen außerdem einen charakteristischen zeitlichen Verlauf der gemessenen Leistung auf, der in der Regel mit dem Brandverlauf übereinstimmt. Die Methode der Messung der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich könnte daher allgemein – über die Brandentdeckung hinaus – zur dynamischen bzw. spektroskopischen Analyse von Verbrennung eingesetzt werden.

In diesem Zusammenhang ergaben die Messungen, dass es mit dem aufgebauten Mess-System nicht möglich ist, die physikalischen Phänomene zu erforschen, die Verbrennungsprozessen zugrunde liegen, bzw. Eigenschaften der Brandmaterialien im Mikrowellenbereich zu bestimmen. Von besonderem Interesse ist dabei die Frage, aus welchem Grund die gemessene Leistung der Wärmestrahlung in wenigen Messbereichen und nur bei einigen Flüssigkeiten zeitweise unter den Wert zu Beginn des Feuers sinkt. Die Antwort darauf könnte das Verständnis vom Aufbau der Materie vertiefen. Ein vollständig kalibriertes Mess-System, das es erlaubt in allen Messbereichen den absoluten Wert der gemessenen Leistung zu messen, bildet eine Voraussetzung für solche Untersuchungen.

Der Aufbau eines Branddetektors, der auf der Methode der Messung der Wärmestrahlung im Mikrowellenbereich beruht, erfordert ebenfalls weitere Anstrengungen. Das wichtigste Problem, das zur allgemeinen Anwendung des Messprinzips in der automatischen Brandentdeckung gelöst werden muss, ist dabei die Lokalisierung des Brandes. Ein möglicher Detektor muss stark fokussieren, damit Entstehungsbrände mit anfangs kleinen Abmessungen auf einen großen Füllfaktor führen und somit entdeckt werden können. Die Überwachung eines kompletten Raumes erfordert dann die Veränderung des Detektorbrennpunktes, was generell durch den Einsatz von Antennengruppen erreicht werden kann. Eine konkrete Lösung dieses Problems steht aber aus.

Literaturverzeichnis

- [1] P. Bhartia, I. J. Bahl: *Millimeter Wave Engineering and Applications*, Wiley, New York, 1984 – ISBN 0-471-87083-8.
- [2] M. Berentsen, T. Kaiser, S. Wang: *Advanced Signal Processing on Sensor Arrays for Fire Location Estimation*, Tagungsband 13. Internationale Konferenz über Automatische Brandentdeckung, AUBE '04, Duisburg, Deutschland, 2004.
- [3] I. N. Bronstein, K. A. Semendjajew, G. Musiol, H. Mühlig: *Taschenbuch der Mathematik*, Harri Deutsch, Thun, 1997 – ISBN 3-8171-2003-6.
- [4] E. R. Brown, O. B. McMahon, T. J. Murphy, G. G. Hogan, G. D. Daniels, G. Hover: *Wide-Band Radiometry for Remote Sensing of Oil Films on Water*, Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 46, No. 12, 1998.
- [5] CEN Europäisches Komitee für Normung: *EN 54 Teil 9, Bestandteile automatischer Brandmeldeanlagen, Erprobungstest*, 1984.
- [6] CEN Europäisches Komitee für Normung: *EN 54 Teil 7, Brandmeldeanlagen, Rauchmelder – Punktförmige Melder nach dem Streulicht-, Durchlicht- oder Ionisationsprinzip*, 2001.
- [7] CEN Europäisches Komitee für Normung: *EN 54 Teil 20, Brandmeldeanlagen, Ansaugrauchmelder*, 2003.
- [8] CEN Europäisches Komitee für Normung: *EN ISO 9288, Wärmeübertragung durch Strahlung, Physikalische Größen und Definitionen*, 1996.
- [9] R. K. Crane: *Propagation Handbook for Wireless Communication System Design*, CRC Press, Boca Raton, 2003 – ISBN 0-8493-0820-8.

- [10] M. Debliquy, A. de Haan, F. Groulard: *Fire Protection Based on Gas Sensors for Dusty Industries. Validation Tests in a Cement Factory*, Tagungsband 13. Internationale Konferenz über Automatische Brandentdeckung, AUBE '04, Duisburg, Deutschland, 2004.
- [11] P. J. DiNenno et al. (Editors): *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Second Edition, National Fire Protection Association, Quincy, 1995 – ISBN 0-87765-354-2.
- [12] H. Dreizler: *Fourier Transform Microwave Spectroscopy – An Improved Tool for Investigation of Rotational Spectra*, Berichte der Bunsengesellschaft für Physikalische Chemie, Vol. 99, No. 12, 1995.
- [13] C. Gerthsen: *Physik*, Springer-Verlag, Berlin, 1966.
- [14] F. Gockel: *Ein allgemeines Modell für Brandsensoren im Gehäuse*, Dissertation, Fachbereich Elektrotechnik, Gerhard-Mercator Universität Duisburg, 2001.
- [15] W. Göpel, C. Ziegler: *Struktur der Materie*, Teubner, Stuttgart, 1994 – ISBN 3-8154-2110-1.
- [16] P. F. Goldsmith: *Focal Plane Imaging Systems for Millimeter Wavelength*, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 41, No. 10, 1993.
- [17] N. Gopalsami, S. Bakhtiari, A. C. Raptis, S. L. Dieckman, F. C. DeLucia: *Millimeter-Wave Measurements of Molecular Spectra with Application to Environmental Monitoring*, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 45, No. 1, 1996.
- [18] N. Gopalsami, A. C. Raptis: *Millimeter-Wave Radar Sensing of Airborne Chemicals*, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 49, No. 4, 2001.
- [19] W. B. Grant, R. H. Kegann, W. A. McClenny: *Optical Remote Measurement of Toxic Gases*, Journal Air Waste Manage. Assoc., Vol. 42, No. 1, 1992.
- [20] N. C. Haslam, A. R. Gillespie, G. T. Haslam: *Aperture Synthesis Thermography – A New Approach to Passive Microwave Temperature Measurements in the Body*, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-32, No. 8, 1984.

- [21] H. Hellsten, J. Kjellgren, G. Stenstroem, A. Sume: *A Scanning Airborne Radiometer for 30 GHz and 90 GHz*, Infrared and Millimeter Waves, Millimeter Components and Techniques, Vol. 15, No. 6, 1986.
- [22] D. J. E. Ingram: *Hochfrequenz- und Mikrowellen-Spektroskopie*, Franzis-Verlag, München, 1978 – ISBN 3-7723-6351-2.
- [23] T. Kaiser, T. Kempka: *Is Microwave Radiation Useful for Fire Detection?*, Tagungsband 12. Internationale Konferenz über Automatische Brandentdeckung, AUBE '01, Gaithersburg, USA, 2001.
- [24] J. Kelleter: *Detection of Smoldering Fires in Dust Load Areas by Sensing of Specific Gas Emissions*, Tagungsband 13. Internationale Konferenz über Automatische Brandentdeckung, AUBE '04, Duisburg, Deutschland, 2004.
- [25] T. Kempka, T. Kaiser, K. Solbach: *Microwaves in Fire Detection*, Tagungsband 13. Internationale Konferenz über Automatische Brandentdeckung, AUBE '04, Duisburg, Germany, 2004.
- [26] M. Kerker: *The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation*, Academic Press, New York, 1969 – ISBN 0-12-404550-2.
- [27] D. E. Kerr: *Propagation of Short Radio Waves*, Boston Technical Publishers, 1964.
- [28] L. A. Klein: *Millimeter-Wave and Infrared Multisensor Design and Signal Processing*, Artech House, Inc., Boston, 1998.
- [29] J. E. Knox: *Millimeter Wave Propagation in Smoke*, Tagungsband IEEE EASCON-79 electronics and aerospace systems conference, Arlington, USA, 1979.
- [30] J. D. Kraus: *Antennas*, second edition, McGraw-Hill, New York, 1988 – ISBN 0-07-035422-7.
- [31] R. Lentz: *Rauschen in Empfangsanlagen*, UKW-Berichte, Heft 3, 1975.
- [32] S. P. Levine, G. M. Russwurm: *Fourier Transform Infrared Optical Remote Sensing for Monitoring Airborne Gas and Vapor Contaminants in the Field*, Trends in Analytical Chemistry, Vol. 13, No. 7, 1994.

- [33] P. A. Lindsay: *Introduction to Quantum Electronics*, Pitman, London, 1975 – ISBN 0-273-00289-9.
- [34] H. Luck: *Grundlagen der Nachrichtentechnik 1-4*, Vorlesungsskript, Universität Duisburg-Essen, 2003.
- [35] R. J. Mailloux: *Phased Array Antenna Handbook*, Artech House, Boston, 1994 – ISBN 0-89006-502-0.
- [36] H. H. Meinke, F.-W. Gundlach: *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik Bd1-3*, Springer, Berlin, 1986 – ISBN 3-540-15394-2 (Bd.1) : 3-540-15395-0 (Bd. 2) : 3-504-15396-9 (Bd. 3).
- [37] C. R. Nave: *HyperPhysics*,
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>.
- [38] National Institute of Standards and Technology: *Microwaves Molecular Spectral Databases*, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/MolSpec/index.html>.
- [39] E. Nyfors, P. Vainikainen: *Industrial Microwave Sensors*, Artech House, Norwood, 1989 – ISBN 0-89006-397-4.
- [40] J. Pearce, D. M. Mittleman: *Propagation of Single-Cycle Terahertz Pulses in Random Media*, Optics Letters, Vol. 26, Nr. 24, 2001.
- [41] H. M. Pickett, R. L. Poynter, E. A. Cohen, M. L. Delitsky, J. C. Pearson, and H. S. P. Muller: *Submillimeter, Millimeter, and Microwave Spectral Line Catalog*, J. Quant. Spectrosc. & Rad. Transfer, Vol. 60, Nr. 5, 1998, <http://spec.jpl.nasa.gov/>.
- [42] R. L. Poynter, H. M. Pickett: *Submillimeter, Millimeter and Microwave Spectral Line Catalog*, JPL Publication 80-23, Rev. 2, 1983.
- [43] L. Roth, U. Weller: *Chemie-Brände*, ecomed, Landsberg/Lech, 1990 – ISBN 3-609-67780-5.
- [44] B. Schiek: *Grundlagen der Hochfrequenz-Meßtechnik*, Springer, Berlin, 1999 – ISBN 3-540-64930-1.

- [45] B. Schiek, H.-J. Siweris: *Rauschen in Hochfrequenzschaltungen*, Hüthig, Heidelberg, 1990 – ISBN 3-7785-2007-5.
- [46] R. Siebel: *Ein LOW-COST Flammenmelder mit guten Alarm- und Falschalarmeigenschaften*, Tagungsband 11. Internationale Konferenz über Automatische Brandentdeckung AUBE '99, Duisburg, Deutschland, 1999 – ISBN 3-926875-31-3.
- [47] K. Solbach: *Hochfrequenz-Elektronik*, Vorlesungsskript, Universität Duisburg-Essen, 2004.
- [48] V. Storm, H. Dreizler, D. Consalvo, J. U. Grabow, I. Merke: *A Newly Designed Molecular Beam Fourier Transform Microwave Spectrometer in the Range 1-4 GHz*, Review of Scientific Instruments, Vol. 67, No. 8, 1996.
- [49] E. Tamm, A. Mimre, U. Sievert, D. Franken: *Aerosol Particle Concentration and Size Distribution Measurements of Test-Fires as Background for Fire Detection Modelling*, Tagungsband 11. Internationale Konferenz über Automatische Brandentdeckung AUBE '99, Duisburg, Deutschland, 1999.
- [50] L. Tsang, J. A. Kong, R. T. Shin: *Theory of Microwave Remote Sensing*, Wiley, New York, 1985 – ISBN 0-471-88860-5.
- [51] F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung: *Microwave Remote Sensing Vol.1 Fundamentals and Radiometry*, Addison-Wesley, Reading, 1981 – ISBN 0-201-10759-7.
- [52] Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., Tagungsband, *Jubiläumsfachtagung 2000*, Stuttgart, Deutschland, 2000.
- [53] M. Vogel: *Heating with Wood: Principles of Combustion*, MSU Extension Service, 2003.
- [54] E. Voges: *Hochfrequenztechnik 1*, Hüthig, Heidelberg, 1991 – ISBN 3-7785-2014-8.
- [55] B. Vowinkel: *Passive Mikrowellenradiometrie*, Vieweg, Braunschweig, 1988 – ISBN 3-528-08959-8.
- [56] J. Warnatz, U. Maas, R. W. Dibble: *Verbrennung*, Springer, Berlin, 2001 – ISBN 3-540-42128-9.

- [57] W. Wiesbeck: *Antennen und Antennensysteme*, Vorlesungsskript, Universität Karlsruhe, 2000.
- [58] I. Wolff, *Maxwellsche Theorie*, Springer, Berlin, 1997 – ISBN 3-540-63012-0.
- [59] O. Zinke, H. Brunswig: *Lehrbuch der Hochfrequenztechnik 1*, Springer, Berlin, 1990 – ISBN 3-540-51421-X.
- [60] O. Zinke, H. Brunswig: *Lehrbuch der Hochfrequenztechnik 2*, Springer, Berlin, 1994 – ISBN 3-540-55084-4.

Anhang A

Rauschbetrachtungen an linearen Zweitoren

Betrachtet wird das rauschende, lineare Zweitor in Bild A.1 mit der Rauschzahl F sowie dem Verstärkungsfaktor G . Am Eingang liegen die Signalleistung P_{S1} und die Rauschleistung P_{R1} . Am Ausgang des linearen Zweitores ergeben sich die Leistungen P_{S2} und P_{R2} .

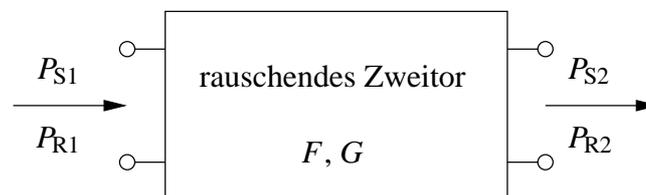


Bild A.1: Rauschendes Zweitor

Der Verstärkungsfaktor G gibt das Verhältnis der Ausgangssignalleistung P_{S2} zur Eingangssignalleistung P_{S1} an [34]:

$$G = \frac{P_{S2}}{P_{S1}}. \quad (\text{A.1})$$

Der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsleistung wird häufig durch das Verstärkungsmaß G_{dB} beschrieben, und es gilt:

$$G_{\text{dB}} = 10 \cdot \log(G).$$

Die Rauchzahl F ist nach FRIIS definiert als das Verhältnis des Signal-zu-Rauschleistungsverhältnisses $\text{SNR}_1 = P_{S1}/P_{R1}$ am Eingang des linearen Zweitors zum Signal-zu-Rauschleistungsverhältnis $\text{SNR}_2 = P_{S2}/P_{R2}$ am Ausgang des linearen Zweitors [34, 36]:

$$F = \frac{\text{SNR}_1}{\text{SNR}_2} = \frac{P_{S1} \cdot P_{R2}}{P_{R1} \cdot P_{S2}}. \quad (\text{A.2})$$

In der Regel verschlechtert ein lineares System das Signal-zu-Rauschleistungsverhältnis SNR_1 , daher ist die Rauchzahl F meist größer eins. Die Größe [31]

$$F_{\text{dB}} = 10 \cdot \log(F)$$

wird als Rauschmaß bezeichnet. Es besitzt die Einheit Dezibel (dB). Mit den logarithmierten Signal-zu-Rauschleistungsverhältnissen

$$\text{SNR}_{i,\text{dB}} = 10 \cdot \log(\text{SNR}_i), \quad \text{mit } i \in [1, 2]$$

kann Gleichung A.2 in die folgende Form gebracht werden:

$$\text{SNR}_{2,\text{dB}} = \text{SNR}_{1,\text{dB}} - F_{\text{dB}},$$

d. h. das Signal-zu-Rauschleistungsverhältnis $\text{SNR}_{2,\text{dB}}$ am Ausgang des linearen Zweitors entspricht dem um das Rauschmaß F_{dB} reduzierten Signal-zu-Rauschleistungsverhältnis $\text{SNR}_{1,\text{dB}}$ am Eingang des Zweitors.

$$\underline{b}_i = \frac{1}{2\sqrt{Z_L}} [\underline{U}_i(z_i) - Z_L \underline{I}_i(z_i)], \quad \text{mit } i \in [1, 2].$$

Unter Verwendung der vor- ($\underline{U}_i^+(z_i), \underline{I}_i^+(z_i)$) und rücklaufenden ($\underline{U}_i^-(z_i), \underline{I}_i^-(z_i)$) Strom- bzw. Spannungswellen, die über die Gleichungen

$$\begin{aligned} \underline{U}_i(z_i) &= \underline{U}_i^+(z_i) + \underline{U}_i^-(z_i) \\ \underline{I}_i(z_i) &= \underline{I}_i^+(z_i) - \underline{I}_i^-(z_i), \quad \text{mit } i \in [1, 2] \end{aligned}$$

mit den Strom- bzw. Spannungswellen verknüpft sind, lassen sich die Wellengrößen \underline{a} und \underline{b} folgendermaßen angeben:

$$\begin{aligned} \underline{a}_i &= \frac{1}{\sqrt{Z_L}} \underline{U}_i^+(z_i) = \sqrt{Z_L} \underline{I}_i^+(z_i) \\ \underline{b}_i &= \frac{1}{\sqrt{Z_L}} \underline{U}_i^-(z_i) = \sqrt{Z_L} \underline{I}_i^-(z_i), \quad \text{mit } i \in [1, 2], \end{aligned}$$

d. h. die \underline{a}_i beschreiben die vorlaufenden Wellen und die \underline{b}_i die rücklaufenden Wellen. Die Wellengrößen haben die Einheit \sqrt{W} .

Die Streuparameter eines Zweitores werden damit wie folgt definiert [47, 54]:

$$\underline{b}_1 = \underline{s}_{11} \cdot \underline{a}_1 + \underline{s}_{12} \cdot \underline{a}_2 \tag{B.1}$$

$$\underline{b}_2 = \underline{s}_{21} \cdot \underline{a}_1 + \underline{s}_{22} \cdot \underline{a}_2. \tag{B.2}$$

Der Streuparameter \underline{s}_{11} gibt den Reflektionsfaktor an Tor 1 bei Anpassung an Tor 2 an und \underline{s}_{22} gibt den Reflektionsfaktor an Tor 2 bei Anpassung an Tor 1 an. Der Streuparameter \underline{s}_{12} ist der Übertragungsfaktor von Tor 2 zu Tor 1 bei Anpassung von Tor 1 an. Der umgekehrte Fall wird durch \underline{s}_{21} beschrieben. Die Streuparameter sind im Allgemeinen komplex und frequenzabhängig.

Anhang C

Formelverzeichnis

Die behandelten Themen entstammen verschiedenen Disziplinen der Naturwissenschaften. Daher gibt es, je nach Quelle, unterschiedliche Notationen. In dieser Arbeit wird in den meisten Fällen die in der Elektrotechnik übliche Nomenklatur verwendet. Um Missverständnissen vorzubeugen, werden alle verwendeten Formelzeichen und die zugehörigen Größen im Folgenden aufgelistet.

Physikalische Konstanten

$c_0 = 2,9979 \cdot 10^8$ m/s	–	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	Seite 6
$h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ Js	–	PLANCK'sches Wirkungsquantum	Seite 6
$k = 1,3806 \cdot 10^{-23}$ Js/K	–	BOLTZMANN Konstante	Seite 6

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

Formelzeichen		Einheit	Seite
A	strahlende Körperoberfläche	m^2	6
A_F	strahlende Feueroberfläche	m^2	3
A_{FK}	strahlende Festkörperoberfläche	m^2	16

Formelzeichen		Einheit	Seite
$A_e(f)$	effektive Antennenwirkfläche	m^2	11
$A_p(f_c)$	prozentualer Leistungsanstieg	%	49
$A_{p,\min}(f_c)$	minimaler prozentualer Leistungsanstieg	%	49
$A_{p,\max}(f_c)$	maximaler prozentualer Leistungsanstieg	%	49
d	Abstand	m	10
d_p	Aerosolpartikeldurchmesser	m	13
d_s	Schalendurchmesser des Förderbandnachbaus	m	105
f	Frequenz	Hz	3
f_c	Mittenfrequenz	Hz	7
F	Rauschzahl	1	26
F_{dB}	Rauschmaß	dB	26
$F_n(f, \theta, \phi)$	normiertes Antennenrichtdiagramm	1	28
F_{MS}	Rauschmaß des Mess-Systems	dB	26
G	Verstärkungsfaktor	1	27
$G(f)$	Antennengewinn	1	12
G_{dB}	Verstärkungsmaß	dB	27
$G_{\text{MS}}(f)$	Gesamtverstärkung des Mess-Systems	1	25
$h_I(t)$	Impulsantwort des Kurzzeitintegrators	s^{-1}	34
$H_{\text{MS}}(\omega)$	Übertragungsfunktion des Mess-Systems	1	36
I	Strahlstärke	W sr^{-1}	5
$I_{\text{BB}}(f, T, A)$	Strahlstärke der Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers	W sr^{-1}	6
$I_{\text{F}}(f, T_{\text{F}}, A_{\text{F}})$	Strahlstärke der Wärmestrahlung von Feuern	W sr^{-1}	8
$I_{\text{RB}}(f, T, A)$	Strahlstärke der Wärmestrahlung eines realen Körpers	W sr^{-1}	8
$I_{\text{RJ}}(f, T, A)$	Strahlstärke nach RAYLEIGH-JEANS-Approximation	W sr^{-1}	7
k	Abtastwerte	1	34

Formelzeichen		Einheit	Seite
l_i	Leitungslängen	m	28
$m_{\text{UR}}^{(2)}$	quadratischer Mittelwert der Rauschspannung	V^2	23
n	Drehzahl des Förderbandnachbaus	U s^{-1}	105
p	Leistung – Strahlleistung	W	3
$p_{\text{BB}}(f, T, A)$	Leistung der Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers	W	25
$p_{\text{F}}(f, T_{\text{F}}, A_{\text{F}})$	emittierte Leistung der Wärmestrahlung des Feuers	W	3
$p_{\text{I}}(t)$	Leistung nach der Kurzzeitintegration	W	34
$p_{\text{KL}}(f, t)$	verfügbare Rauschleistung der Kalibrierlast	W	23
$p_{\text{LT}}(t)$	Leistung hinter dem linearen Tor	W	34
$p_{\text{M}}(f, t)$	gemessene Leistung	W	25
$p_{\text{R}}(f, t)$	empfangene Leistung einer Antenne	W	11
$p_{\text{R,F}}(f, t)$	empfangene Leistung der Wärmestrahlung eines Feuers	W	16
$p_{\text{R,FK}}(f, t)$	empfangene Leistung der Wärmestrahlung eines Festkörpers	W	16
$p_{\text{R,G}}(f, t, \theta, \phi)$	aus allen Raumrichtungen empfangene Leistung	W	28
$p_{\text{R,K}}(f, t)$	empfangene Leistung der Wärmestrahlung von Kohle	W	108
$p_{\text{R,U}}(f, t)$	empfangene Leistung aus der Umgebung eines Brandes	W	29
$P_{\text{M}}(\omega)$	FOURIER-Transformierte der gemessenen Leistung	W Hz^{-1}	36
$P_{\text{R}}(\omega)$	FOURIER-Transformierte der empfangenen Leistung	W Hz^{-1}	36
R	nichtauschender Widerstand der Kalibrierlast	Ω	22
R_{L}	reeller Wellenwiderstand	Ω	22

Formelzeichen		Einheit	Seite
$ \vec{s} $	gradlinige Streckenlänge innerhalb der Antennenhauptkeule	m	109
S	spektrale Strahlstärke	$\text{W sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$	5
\underline{s}_{11}	komplexer Streuparameter	1	95
S_{11}	logarithmierter Betrag von \underline{s}_{11}	dB	95
$S_{\text{URUR}}(f)$	Rauschleistungsdichte	$\text{V}^2 \text{ Hz}^{-1}$	23
$S_{\text{BB}}(f, T, A)$	spektrale Strahlstärke der Wärmestrahlung eines <i>schwarzen Körpers</i>	$\text{W sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$	6
$S_{\text{F}}(f, T_{\text{F}}, A_{\text{F}})$	spektrale Strahlstärke der Wärmestrahlung eines Feuers	$\text{W sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$	11
$S_{\text{RB}}(f, T, A)$	spektrale Strahlstärke der Wärmestrahlung eines realen Körpers	$\text{W sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$	5
$S_{\text{RJ}}(f, T, A)$	spektrale Strahlstärke nach RAYLEIGH-JEANS-Approximation	$\text{W sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$	7
t	Zeit	s	3
t_0	Zeitpunkt der Startleistung	s	45
t_{g}	Aufenthaltsdauer in der Antennenhauptkeule	s	109
t_{m}	Zeitpunkt der Maximalleistung	s	48
T	Temperatur	K	3
T_{a}	Abtastperiode	s	34
T_{A}	äquivalente Temperatur am Leitungsanfang	K	28
T_{E}	äquivalente Temperatur am Leitungsende	K	28
T_{F}	physikalische Temperatur eines Feuers	K	3
T_{FK}	physikalische Festkörpertemperatur	K	15
T_{KL}	physikalische Temperatur der Kalibrierlast	K	21
T_{Li}	physikalische Leitungstemperatur	K	28
T_{MS}	äquivalente Rauschtemperatur des Mess-Systems	K	26
T_{O}	äquivalente Temperatur des Messobjekts	K	26

Formelzeichen		Einheit	Seite
$u_R(t)$	äquivalente Rauschspannung der Kalibrierlast	V	22
$u_{KL}(t)$	verfügbare Spannung der Kalibrierlast	V	22
$ \vec{v} $	Transportgeschwindigkeit	m s^{-1}	105
$w_t(t_g, \tau, x_0)$	Zeitfaktor	1	108
$w_{t,\min}(t_g, \tau)$	minimaler Zeitfaktor	1	109
$w_F(f)$	Füllfaktor der Antennenkeule	1	30
$w_\alpha(f)$	Absorptionskoeffizient	m^{-1}	15
$w_\varepsilon(f, T)$	Emissionsgrad	1	5
x	Dicke des dämpfenden Materials	m	15

Griechische Buchstaben

Formelzeichen		Einheit	Seite
α_i	Leitungsdämpfungsfaktoren	m^{-1}	28
δ	Abstandsunterschied	m	32
Δ	Ableseungenauigkeit	W	50
ΔE	Energiedifferenz	Ws	10
Δf	Bandbreite	Hz	7
Δt	Zeitdifferenz	s	30
Δt_m	Zeitdifferenz zwischen Maximum und Startwert der Leistung	s	46
ΔT_O	Temperaturauflösung des Mess-Systems	K	26
$\Delta p_M(f_c, \Delta t)$	Leistungsdifferenz der gemessenen Leistung	W	45
$\Delta p_{M,\text{dB}}(f_c, \Delta t)$	Leistungsdifferenz der gemessenen Leistung	dB	46
Δp_O	Leistungsauflösung des Mess-Systems	W	26
$\Delta p_R(f, \Delta t)$	Leistungsdifferenz der empfangenen Leistung	W	30
$\Delta p_{R,F}(f, \Delta t)$	Leistungsdifferenz der empfangenen Feuerleistung	W	30
$\Delta \varphi$	Phasenunterschied	rad	32

Formelzeichen		Einheit	Seite
θ	Elevationswinkel	rad	28
$\theta_{3\text{dB}}$	vertikale Halbwertsbreite	rad	29
λ	Wellenlänge	m	11
τ	Messdauer	s	26
ϕ	Azimutwinkel	rad	28
$\phi_{3\text{dB}}$	horizontale Halbwertsbreite	rad	29
ω	Kreisfrequenz	s^{-1}	36
ω_s	Winkelgeschwindigkeit des Förderband- nachbaus	rad s^{-1}	105
Ω	Raumwinkel	sr	5
Ω_A	Öffnungsraumwinkel der Antenne	sr	11, 29
$\Omega_{A,F}(f)$	Raumwinkel des Brandes innerhalb der Antennenkeule	sr	29
$\Omega_{A,U}(f)$	Raumwinkel der Umgebung innerhalb der Antennenkeule	sr	29