

Terahertz-Erkennung energetischer Materialien

**Spektroskopische Analysen und technologische
Perspektiven bildgebender Systeme**

Von der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der
Universität Siegen

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Anna Katharina Huhn
aus Kirchen (Sieg)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Experimentelle Grundlagen	5
2.1	THz Zeitbereichs-Spektroskopie	6
2.1.1	Prinzip und Messtechnik	6
2.1.2	Bandbreite, Dynamik und auswertbarer Bereich	10
2.1.3	Die dielektrischen Materialgrößen	11
2.1.4	Bestimmung der dielektrischen Materialgrößen aus THz-TDS-Messdaten	14
2.2	Leistungsgrenzen von Detektoren	16
2.3	Technologische Möglichkeiten der THz-Bildgebung	18
2.3.1	THz-Erzeugung in elektronischen Frequenzvervielfacherketten	18
2.3.2	THz-Detektion in subharmonischen Mischern	20
2.3.3	Integrierbare THz-Detektoren	24
2.3.4	Passive und aktive THz-Bildgebungssysteme für Sicherheitsanwendungen	32
3	Molekulare Resonanzen von Sprengstoffen	43
3.1	Das Lorentzsche Oszillatormodell	45
3.2	Stand der Forschung	47
4	THz-Spektroskopie von Sprengstoffen	51
4.1	Untersuchte Proben	52
4.2	THz-TDS-Messungen in Transmissionsgeometrie	54
4.2.1	Analyse mit Lorentzschers Kurvenanpassung	58
4.3	THz-TDS-Messungen in Reflexionsgeometrie	60
4.4	Abhängigkeit der Resonanzen von Additiven	62
4.5	Präparationsabhängigkeit	64
4.6	THz-TDS von Sprengstoffproben unter Textilien	70
4.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	73
5	Bildgebende THz-Systeme	75
5.1	THz-Bildgebungssystem mit subharmonischen Mischern	76
5.1.1	Strahlpfad und Beleuchtungsquelle	78
5.1.2	Heterodyndetektoren basierend auf subharmonischen Mischern	80
5.1.3	Datenerfassung und Bildberechnung	83
5.1.4	THz-Analyse der Heterodyn-Detektorzeile	85

5.2	THz-Leistungsdetektoren basierend auf Thermoelementen	87
5.2.1	Antennencharakteristik eines Pixels	90
5.2.2	THz-Charakterisierung der Thermoelement-Sensoren	92
5.3	Vergleich der Detektoren	97
6	THz-Bildgebung für Sicherheitsanwendung	99
6.1	Sequentielle Bildgebung mit THz-TDS	100
6.1.1	Messmethode und Visualisierungsarten	100
6.1.2	Spektrale Analyse der Ergebnisse	101
6.2	THz-Bildgebung mit Heterodynsystemen	107
6.2.1	Sequentielle Bildgebung bei 600 GHz	108
6.2.2	Echtzeit-Bildgebung bei 800 GHz	110
6.3	THz-Bildgebung basierend auf Thermoelementen	111
6.3.1	Messsystem	112
6.3.2	Ergebnisse	114
6.4	Einschätzung des Potentials der THz-Sprengstofferkennung	119
7	Fazit und Ausblick	123
	Literaturverzeichnis	127
	Abdruckgenehmigungen	137
	Abkürzungsverzeichnis	139
A	Phasenverlauf an einer starken Resonanz	141
B	Analyse mit Lorentz Kurvenanpassung	143
C	HFSS Modell der Thermoelement-Antennenanordnung	145