

Markt, Entwicklung und Stand der Technik der Terahertz-Systeme: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft

Thomas HOCHREIN
SKZ – Das Kunststoff-Zentrum
Friedrich-Bergius-Ring 22, 97076 Würzburg
t.hochrein@skz.de

Kurzfassung. Der Ausdruck "Terahertz" ist heute in Fachkreisen und teilweise auch bereits in der zerstörungsfreien Prüfung ein geläufiger Begriff für eine neue und verheißungsvolle Technologie. Tatsächlich erzielte die Terahertz-Messtechnik in den letzten Jahrzehnten erhebliche Fortschritte. Allerdings darf nicht vergessen werden, dass bereits Technologien in früheren Jahren verfügbar waren, welche den Frequenzbereich zwischen den Mikrowellen und infraroten Licht zugänglich machen. Zu dieser Zeit wurden jedoch eher die traditionelleren Synonyme wie „Ferninfrarot“ oder „Sub-Millimeter“ anstelle von „Terahertz“ benutzt. Dennoch ist unabhängig von der verwendeten Begrifflichkeit ein starker Aufwärtstrend in der Entwicklung von derartigen Systemen und deren Märkten zu beobachten. Der Begriff "Terahertz-Technologie" steht heute meist für den aktuellen Stand der Technik mit seiner kohärenten Detektionsmöglichkeit durch vollelektronische Systeme oder optische Methoden auf Basis fotoleitender Dipolantennen.

Es wird daher ein Überblick über die Entwicklung und das Forschungsaufkommen anhand von Literatur- und Patentrecherchen gegeben. Zudem erfolgt eine Darstellung des Marktes unterschiedlicher Terahertz-Systeme und -Anbieter. Immer mehr Unternehmen werden auf die Potenziale aufmerksam, sodass in den letzten Jahren eine Verlagerung der Entwicklungsaktivitäten vom rein akademischen Bereich auch in den kommerziellen Sektor zu beobachten ist und kontinuierlich neue Systemanbieter auf dem Markt erscheinen. Dies wird sicherlich auch zu steigendem Wettbewerb führen, wobei die finalen Anwendungen und Zielmärkte meist noch nicht klar definiert sind. Der entscheidende Hebel für günstigere Systempreise werden jedoch die verkauften Stückzahlen sein, weshalb auszugsweise auf die Kostenstruktur von Terahertz-Systemen eingegangen wird. Einen wesentlichen Faktor für die Durchsetzungsfähigkeit - vor allem hinsichtlich konkreter Anwendungen - werden mögliche Alleinstellungsmerkmale gegenüber den Wettbewerbstechnologien wie z. B. anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren darstellen.

1. Einführung

Die Terahertz-Technologie zeigt mit der Nutzung des Frequenzbereichs von etwa 0,1 bis 20 THz im elektromagnetischen Spektrum eine rasant fortschreitende Entwicklung. In den letzten drei Dekaden konnten hier auf wissenschaftlichem Gebiet erhebliche Fortschritte erzielt werden. Daher rücken mittlerweile auch vermehrt mögliche industrielle Anwendungen in den Fokus, die vermehrt auch von kommerziellen Unternehmen angegangen werden [1].



Zahlreiche existierende Studien versuchen bereits, die zukünftige Marktentwicklung der Terahertz-Technologie zu prognostizieren und potenzielle Anwendungsfelder aufzuzeigen [2-4]. Diese Betrachtungen sind primär auf die Bedürfnisse der Terahertz-Systementwickler und Forschungseinrichtungen abgestimmt. Zudem ist nicht in allen Fällen die Nachvollziehbarkeit der getroffenen Annahmen gewährleistet oder unzutreffende Analogiebetrachtungen von anderen Technologien werden zur Vorhersage der zukünftigen Entwicklung der Terahertz-Messtechnik herangezogen. Meist werden bei den Prognosen für potenzielle Anwendungsbeispiele entsprechende Wettbewerbstechnologien außer Acht gelassen, die jedoch häufig für die Durchsetzungsfähigkeit der Terahertz-Technologie bestimmend und für viele angedachte Einsatzszenarien in großer Zahl vorhanden sind [5,6].

Diese hier vorliegende Ausarbeitung soll vielmehr für mögliche Anwender eine Orientierung geben, wie der aktuelle Stand der Terahertz-Technologie hinsichtlich einer kommerziellen Verfügbarkeit ist und wie diese weiter voranschreiten wird. In dieser Ausarbeitung soll daher der Blick auch in die Richtung wirtschaftlicher Aspekte gelenkt werden, da die technologischen Möglichkeiten, potenzielle Anwendungen und wissenschaftlichen Arbeiten bereits umfangreich publiziert und diskutiert werden.

2. Abgrenzung und Methodik

2.1 Untersuchungsgegenstand

Es sind in der Literatur unterschiedliche Definitionen zum Terahertz-Frequenzbereich im elektromagnetischen Spektrum zu finden. Eine allgemein akzeptierte Definition existiert nicht. In dieser Arbeit werden Systeme betrachtet, die im Frequenzbereich von 0 bis 35 THz arbeiten und eine enge Verknüpfung mit dem Kernbereich von 0,1 bis 4 THz aufweisen, z. B. indem sie diesen Bereich tangieren oder typische Eigenschaften wie eine kohärente Detektion aufweisen.

Anstelle des Begriffs „Terahertz“ wurden bereits früher die Synonyme „Ferninfrarot“ oder „Sub-Millimeter“ benutzt. Heute steht der Begriff "Terahertz-Technologie" meist auch für den aktuell verfügbaren Stand der Technik mit seiner kohärenten Detektionsmöglichkeit durch vollelektronische Systeme oder optischen Methode auf Basis fotoleitender Dipolantennen. Diese Systeme werden auch in dieser Ausarbeitung adressiert. Es werden nur aktive Terahertz-Systeme untersucht, d. h. Systeme, die selbst aktiv Terahertz-Strahlung aussenden und empfangen. Passive Systeme, die z. B. natürliche Terahertz-Strahlung nutzen, sind damit ausgeschlossen, zumal hierbei die kohärente Detektion kaum möglich ist. Somit wurden in dieser Arbeit vollelektronische, optisch gepulste und optische CW-Terahertz-Systeme (CW: continuous wave; dt: Dauerstrich) untersucht. Terahertz-Quellen mit z. B. Gas- oder Quantenkaskadenlasern und Synchrotronstrahlung wurden aufgrund der aktuell fehlenden Praxisrelevanz nicht betrachtet.

Für den Anwender ist häufig eine direkte kommerzielle Verfügbarkeit ausschlaggebend. Daher werden hier nur Anbieter ausgewertet, die eine Unternehmensform aufweisen. Universitäten oder andere Forschungseinrichtungen, die ebenfalls häufig Terahertz-Systeme auf Anfrage anbieten, sind somit aus dieser Betrachtung ausgeklammert. Es werden zudem nur Hersteller von Terahertz-Systemen berücksichtigt, deren Produkte für Prüf- und Analyseaufgaben geeignet sind und die Interesse am entsprechenden Markt zeigen. Systeme für die Kommunikationstechnik scheiden daher für diese Betrachtung aus.

2.2 Methodik

Die Datenerhebung und Informationsgewinnung erfolgte wie nachfolgend beschrieben – sofern dies an entsprechender Stelle nicht anders erwähnt wird: Die Daten wurden durch

persönliche und telefonische Interviews sowie schriftliche Anfragen gewonnen. Diese Informationen wurden meist durch eigene Recherchen von Produktdokumentationen, Datenblättern, Literatur- und Internetquellen geprüft und ergänzt. Viele Hinweise beruhen auch auf der Erfahrung und Einschätzung des Autors sowie dessen Mitarbeit in verschiedenen Gremien. Da viele Informationen auf vertraulicher Basis oder mit der Bitte um Anonymisierung gewonnen wurden, ist generell auf die Nennung von Firmennamen und informellen Quellen verzichtet worden. Die Daten entsprechen dem Stand im ersten Quartal 2013.

3. Bisherige Entwicklung

3.1 Internetsuchanfragen

In der heutigen Zeit kann der Nutzungsgrad des Internets als ein Gradmesser für das Interesse an einer Thematik dienen. Der Begriff „Terahertz“ ist kaum durch eine relevante Doppelbedeutung abseits der hier betrachteten Thematik belegt und meist direkt dieser verknüpft. Daher bietet sich eine Betrachtung der Abfragestatistik von Internetsuchmaschinen an, um die zeitliche Entwicklung des Interesses zu einem Thema zu untersuchen. Die Suchmaschine Google ist weltweiter Marktführer und bietet mit Google Trends die Möglichkeit, die Abfragehäufigkeit einzelner Suchbegriffe zeitaufgelöst wiederzugeben.

Abbildung 1 zeigt die relative Abfragehäufigkeit des Begriffs „Terahertz“. Der auf das Jahr 2004 normierte Index ist ein Maß für die relative Abfragehäufigkeit im Vergleich zu allen Suchanfragen. Die geläufige Abkürzung „THz“ wurde aufgrund ihrer Bedeutung als Einheit für vielfältige technische Größen ausgeklammert. Das Diagramm zeigt eine relative Verringerung der Suchanfragen in den letzten 9 Jahren. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass das Volumen aller Suchanfragen in den letzten 10 Jahren um rund 75 % gestiegen ist. Wird die relative Abfragehäufigkeit mit dem jährlichen Index des gesamten Suchaufkommens kompensiert, so ergibt sich ein normierter Wert für die absolute Abfragehäufigkeit. Diese ist in den letzten Jahren weitgehend konstant geblieben. Die zwei häufigsten kombinierten Suchanfragen mit „Terahertz“ betreffen Themen, die auch mit der Messtechnik in Verbindung gebracht werden: Terahertz-Bildgebung (terahertz imaging) sowie Terahertz-Spektroskopie (terahertz spectroscopy).

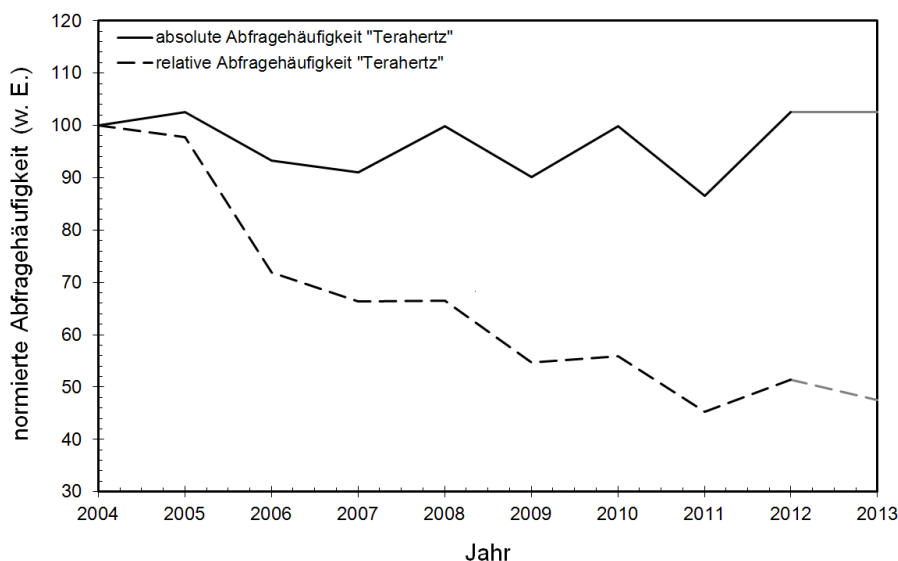


Abbildung 1: Zeitliche Veränderung der normierten Suchanfragenhäufigkeit zum Begriff „Terahertz“ relativ zum gesamten Suchaufkommen sowie absolut (Quelle: Google Trends)

Die lokale Verteilung der Suchabfragen gibt Abbildung 2 wieder. Hierbei sind drei Zentren des Interesses zu erkennen: Nordamerika, Mitteleuropa sowie Asien. Dies sind traditionell auch die Gebiete, denen starke wirtschaftliche und Forschungsaktivitäten in der Terahertz-Technologie zugeschrieben werden. Auf den vordersten Plätzen rangieren in Asien Korea vor China mit einem Suchindex von 100 bzw. 37, Deutschland in Europa und die USA in Amerika mit einem Suchindex von jeweils 25.

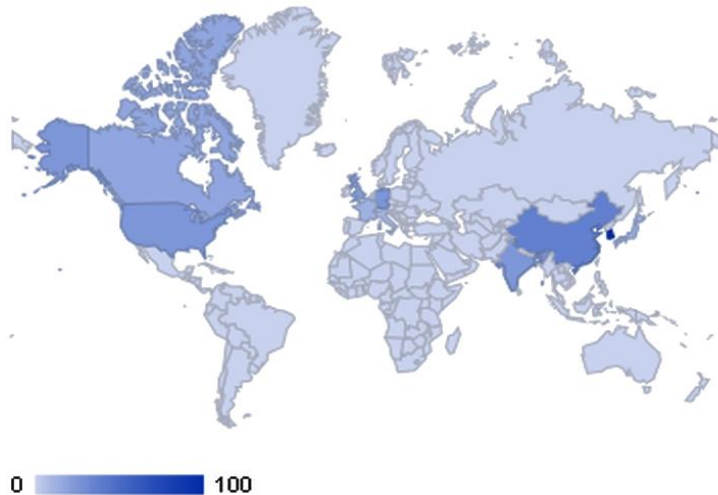


Abbildung 2: Lokale Verteilung der normierten Suchanfragenhäufigkeit zum Begriff „Terahertz“ (Quelle: Google Trends)

3.2 Veröffentlichungen

Ein eher wissenschaftlicher Gradmesser für das Interesse an einer Technologie ist die Anzahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen. Dieses Instrument wurde bereits im Jahr 2008 von Redo-Sanchez et al. genutzt [7]. Eine ähnliche Betrachtung wurde erneut mit der wissenschaftlichen Datenbank SPIN+Scitation durchgeführt. Um die Relevanz der Artikel zu den Suchbegriffen zu verbessern, wurde nach diesen nur in den Titeln, Schlüsselwörtern und Abstracts der jeweiligen Veröffentlichungen gesucht. Die absolute Anzahl der zutreffenden Veröffentlichungen muss sicherlich durch einige Mehrdeutigkeiten der Suchbegriffe kritisch betrachtet werden, die Trendaussagen sollten hingegen stimmig sein.

Um auch frühere Veröffentlichungen zu den Themen „Ferninfrarot“ und „Sub-Millimeter“ zu erfassen, die letztlich dem gleichen Spektralbereich wie „Terahertz“ entsprechen, wurden auch diese berücksichtigt. Es wurden ebenfalls die entsprechenden Abkürzungen wie „THz“, „FIR“, „sub-mm“ sowie Wortzusammensetzungen mit „Wellen“ und „Strahlen“ sowohl in englischer als auch deutscher Sprache verwendet.

Abbildung 3 zeigt den Trend der Anzahl der Veröffentlichungen seit dem Jahr 1965. Es ist klar erkennbar, dass die Anzahl der Veröffentlichungen zum Thema „Terahertz“ erst seit den 1990er Jahren signifikant zu steigen beginnt – kurz nach der Entwicklung der Anregung von Terahertz-Pulsen mittels fotoleitender Dipolantennen [8]. Dies war letztlich auch der Beginn der intensiven Nutzung der zeitaufgelösten Terahertz-Technologie. Das Diagramm zeigt aber auch, dass bereits in den Vorjahren umfangreiche Arbeiten in diesem Spektralbereich betrieben wurden, wenn auch noch unter den damals üblichen Synonymen „Ferninfrarot“ bzw. „Sub-Millimeter“. Deren Anzahl von Veröffentlichungen beginnt in den 1990er Jahren zu sinken, während die Publikationszahl zu „Terahertz“ signifikant ansteigt. Somit ist davon auszugehen, dass die älteren Begriffe weitgehend durch „Terahertz“ substituiert wurden. Die logarithmische Darstellung zeigt, dass es sich bei der Entwicklung der Veröffentlichungen zum Begriff „Terahertz“ um ein weitgehend natürliches Wachstum handelt.

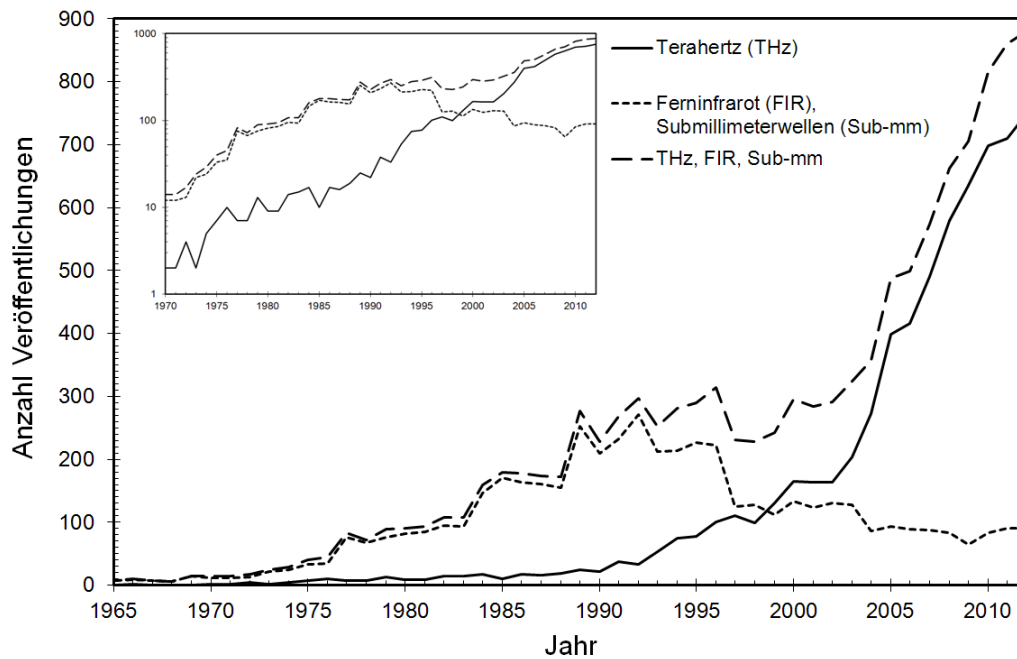


Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung der Zahl von Veröffentlichungen zum Thema „Terahertz“ sowie den traditionellen Bezeichnungen „Ferninfrarot“ und „Sub-Millimeter“. Die Box zeigt die logarithmische Auftragung seit dem Jahr 1970 (Quelle: SPIN+Scitation).

3.3 Patentanmeldungen

Nach Schätzungen sind rund 80 % des technischen Wissens in Patentliteratur niedergeschrieben. Unabhängig davon, welches Gewicht man dieser Aussage schenken mag, kann die Anzahl der Patentanmeldungen in einer Technologietrendanalyse als ein aussagekräftiges Instrument für die Beurteilung der kommerziellen Umsetzung sein [9,10]. Dies unterscheidet eine solche Analyse von der Auswertung wissenschaftlicher Veröffentlichungen, die im Wesentlichen das rein akademische Interesse widerspiegelt.

Die Analyse erfolgte mittels des Deutschen Patentinformationssystems (DEPATIS), das die umfangreichste frei zugängliche Patentdatenbank weltweit darstellt und insbesondere auch die Anmeldestaaten in den USA, Japan und die des Europäischen Patentamts berücksichtigt. Es wurden jeweils nur Patentanmeldungen bedacht, welche Begriffe wie „Terahertz“, „Ferninfrarot“ oder „Submillimeter“ bzw. deren Abkürzungen und Schreibweisen analog der Veröffentlichungsrecherche in Abschnitt 3.2 benutzen.

Abbildung 4 stellt den Verlauf der Patentanmeldungen seit dem Jahr 1970 für Deutschland und die Welt dar. Vor diesem Zeitraum ist nur eine unwesentliche Anzahl an Patentanmeldungen zu verzeichnen. Der absolute Betrag der Patentanmeldungen ist ähnlich dem der Veröffentlichungen kritisch, dessen Entwicklung jedoch als aussagekräftig zu bewerten. Im Vergleich zu den wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Thema „Terahertz“ ist bei den Patentanmeldungen ein Verzug um etwa zehn Jahre zu erkennen. Die Zahlen der letzten drei Jahre sind lediglich eigene Prognosen, da bis zur Veröffentlichung einer neuen Patentanmeldung bis zu drei Jahre nach der Einreichung vergehen können.

Im Gegensatz zur Entwicklung der Anzahl von Veröffentlichungen zeigt sich bei den Patentanmeldungen, dass bis dato kaum Aktivitäten unter der traditionellen Bezeichnung „Ferninfrarot“ oder „Sub-Millimeter-Wellen“ zu verzeichnen sind. Jedoch ist seit etwa dem Jahr 2000 ein sehr starker Anstieg beim Schlagwort „Terahertz“ zu beobachten. Dies deutet darauf hin, dass hier stärker als zuvor kommerzielle Verwertungschancen für diese Technologie gesehen werden. Dies gilt für die deutschen als auch weltweiten Aktivitäten.

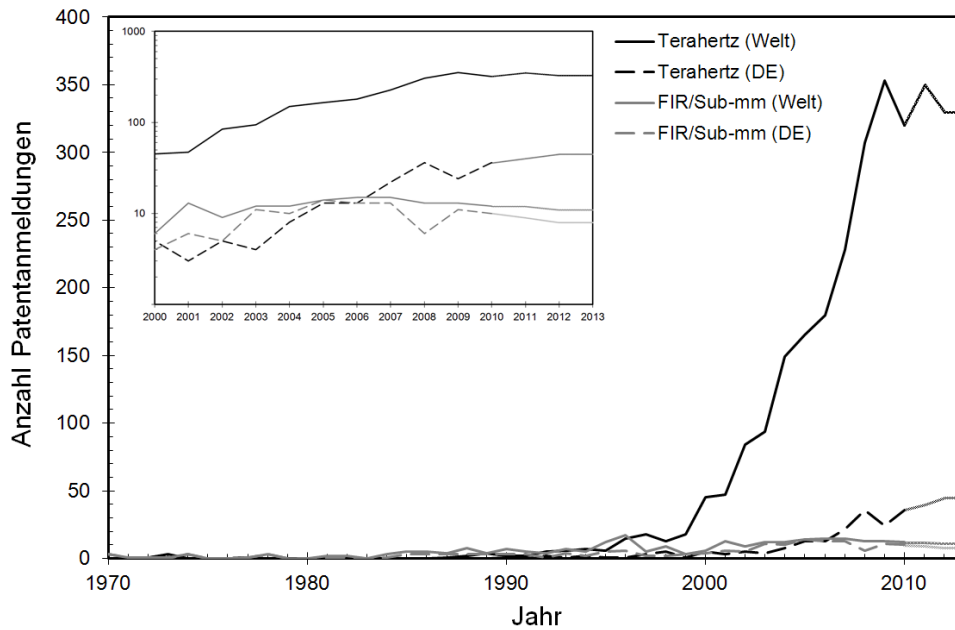


Abbildung 4: Zeitliche Entwicklung der Zahl an Patentanmeldungen zum Thema „Terahertz“ sowie den traditionellen Bezeichnungen „Ferninfrarot“ und „Sub-Millimeter“. Die Box zeigt die logarithmische Auftragung seit dem Jahr 2000 (Quelle: DEPATIS).

4. Aktuelle Marktsituation

4.1 Systemanbieter und Regionen

Im März 2013 existieren weltweit etwa 20 kommerzielle Hersteller von Terahertz-Systemen. Abbildung 5 zeigt die zeitliche Entwicklung der Unternehmen ab dem Zeitpunkt, wo sie das erste Terahertz-System offiziell in den Markt gebracht haben. Ab dem Jahr 2004 ist ein stetiger Aufwärtstrend zu beobachten. Ähnliches gilt für die Zahl der Distributoren in der DACH-Region, die sich bis zu diesem Zeitpunkt auf zehn Unternehmen erhöht hat. Vereinzelt sind Konsolidierungen durch Verlagerung der Aktivitäten oder Geschäftsaufgaben in den letzten Jahren zu beobachten, die jedoch zum derzeitigen Zeitpunkt noch keine Relevanz besitzen.

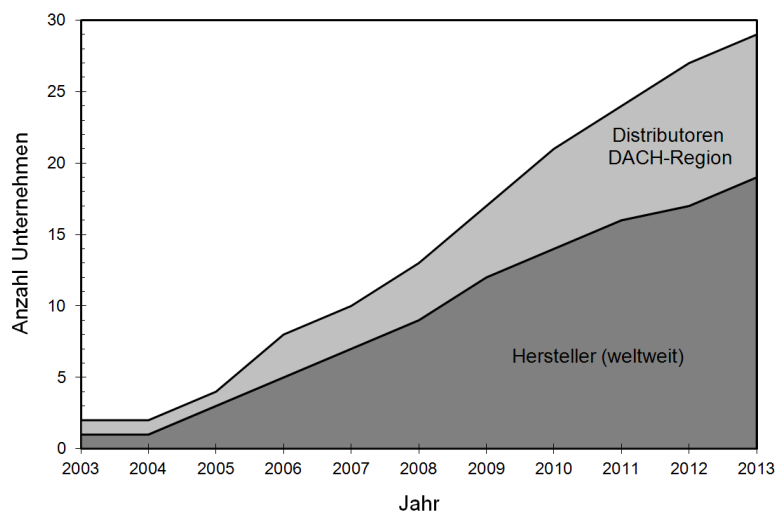


Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung der weltweiten Anzahl an Herstellerunternehmen für Terahertz-Systeme und der Distributorenanzahl für die DACH-Region. Es ist jeweils der Zeitpunkt der ersten kommerziellen Verfügbarkeit von Terahertz-Systemen und nicht die Unternehmensgründung berücksichtigt.

Betrachtet man in Abbildung 6 die örtliche Verteilung, so ist seitens der Hersteller eine Konzentration in den USA, Japan und vor allem Europa mit dem Schwerpunkt Deutschland zu erkennen. Die meisten Terahertz-Systemhersteller sind kleine und mittelständische Unternehmen und häufig Startups aus dem akademischen Umfeld. Viele deutsche Hersteller entstammen dem lasertechnischen Umfeld, da dies eine Kernkompetenz für optische Terahertz-Systeme darstellt. In einigen Fällen sind jedoch auch Großkonzerne v. a. aus Japan aktiv, die entweder selbst entsprechende Produkte anbieten oder Ausgründungen installiert haben.



Abbildung 6: Weltweite Terahertz-Systemhersteller (links) sowie europäische Hersteller und Distributoren für die DACH-Region (rechts)

Die favorisierten Zielmärkte der Hersteller sind in Abbildung 7 dargestellt. Hier spiegelt sich die örtliche Verteilung der Unternehmensstandorte in den bevorzugten Marktregionen Europa mit DACH-Region, Asien und Nordamerika wider. Die Distributoren in der DACH-Region sind vorwiegend für diese Gebiete und zu 60 % auch für Europa zuständig. In Deutschland ist eine Ballung von entsprechenden Anbietern im Münchner Großraum erkennbar.

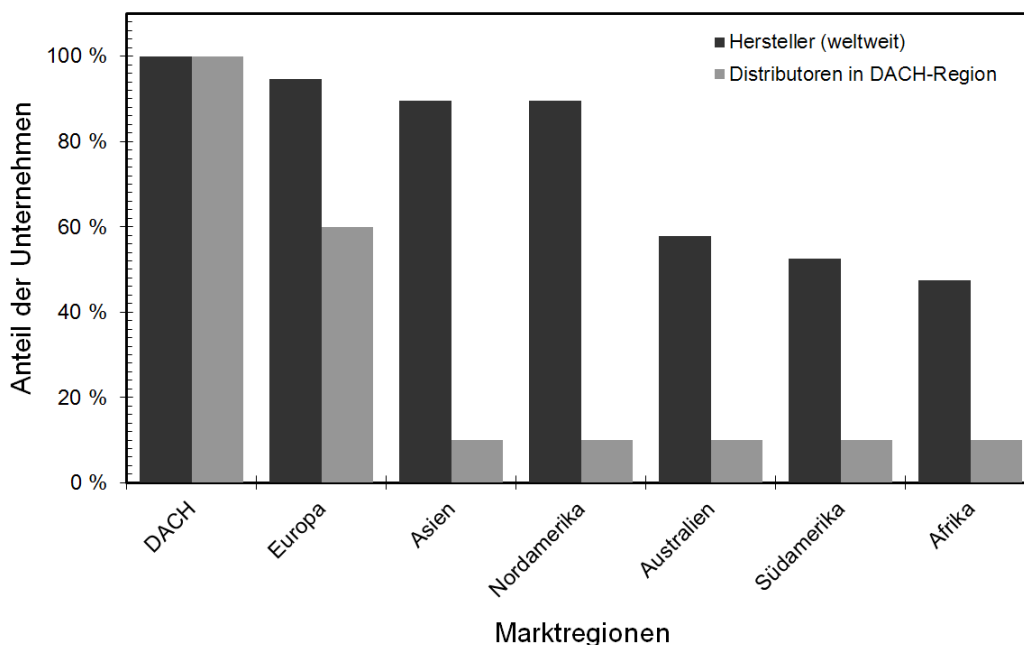


Abbildung 7: Zielregionen der Märkte für die weltweiten Hersteller sowie Distributoren der DACH-Region

4.2 Leistungs- und Systemkenndaten

Die drei relevanten Technologien zur Terahertz-Erzeugung und -Detektion (vollelektronische, optisch gepulste und optische CW-Systeme) werden von den Herstellern ausgewogen angeboten (vgl. Abbildung 8). Die beiden optischen Technologien werden auch häufig gemeinsam von den Herstellern angeboten. Nahezu alle Hersteller von optischen CW-Terahertz-Systemen bieten auch optisch gepulste Terahertz-Technologie an. Zurzeit bietet kein Hersteller mehr zugleich optische als auch vollelektronische Systeme an.

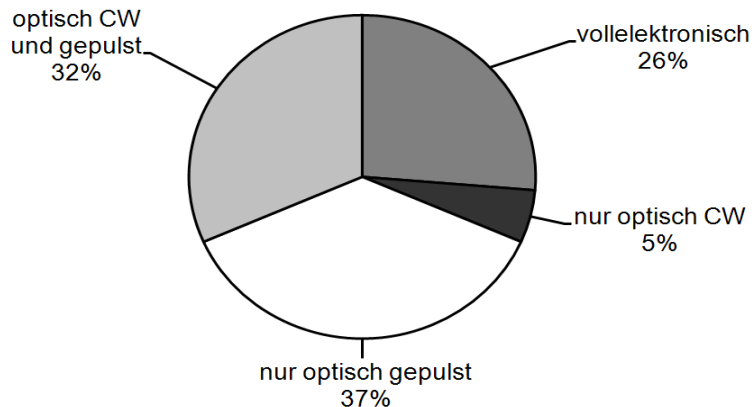


Abbildung 8: Verteilung der unterschiedlichen Terahertz-Systemfunktionsprinzipien der weltweiten Hersteller

Ein häufig benutzter technischer Kennwert für die Beurteilung der Terahertz-Systemleistungsfähigkeit ist der realisierbare Frequenzbereich sowie das Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Abbildung 9 zeigt die Verteilung des Herstelleranteils in Abhängigkeit der Frequenzbandbreite für gepulste und CW-Terahertz-Systeme. Bei den gepulsten Terahertz-Systemen betragen die minimale Frequenz 0,02 und die maximale Frequenz 10 THz, wobei der typische Bereich zwischen 0,1 und 4 THz liegt. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis für die Leistung beträgt zwischen 50 und 80 dB. Der Frequenzbereich bei den CW-Terahertz-Systemen liegt zwischen minimal 0 bis maximal 30 THz, wobei die typische Bandbreite 0 bis 2 THz beträgt. Bei CW-Systemen ist entscheidend, ob die Frequenz variiert werden kann oder fest fixiert ist. Bei 75 % kann das Spektrum durchgetrimmt werden. Dies trifft für alle optischen und teils für vollelektronische CW-Terahertz-Systeme zu. Das erzielbare Signal-zu-Rausch-Verhältnis für die Leistung beträgt zwischen 50 und 100 dB und liegt damit im Maximum über den gepulsten Systemen.

Die verfügbaren Systemvarianten, die sich u. a. durch den Integrationsgrad differenzieren lassen, sind in Abbildung 10 aufgelistet. Die meisten weltweiten Hersteller und technisch eigenständige Distributoren in der DACH-Region bieten sogenannte Turnkey-Systeme an. Dies sind Terahertz-Systeme, die ohne weitere fachliche Kenntnis bei entsprechender Einweisung betrieben werden können. Viele Anbieter stellen oder vertreiben Laborkits, die alle erforderlichen Komponenten vorkonfektioniert enthalten und somit v. a. im Forschungs- und Entwicklungssektor einen schnellen Einstieg in die Terahertz-Technologie erlauben. 57 % der Hersteller bieten ihre Technologie auch als OEM (Erstausrüster; engl. Original Equipment Manufacturer) an. Dies bedeutet, dass die Terahertz-Systeme z. B. in größere Anlagen als eine Komponente wie z. B. als Messinstrument integriert und nur in Kombination mit einem übergeordnetem Produkt eines anderen Herstellers (z. B. Anlagenbauers) verkauft werden. Das Segment der Analyseapparate (30 %) für z. B. Prüflabore sowie direkten Prozessüberwachungssysteme (35 %) wird hingegen nur von wenigen Unternehmen adressiert.

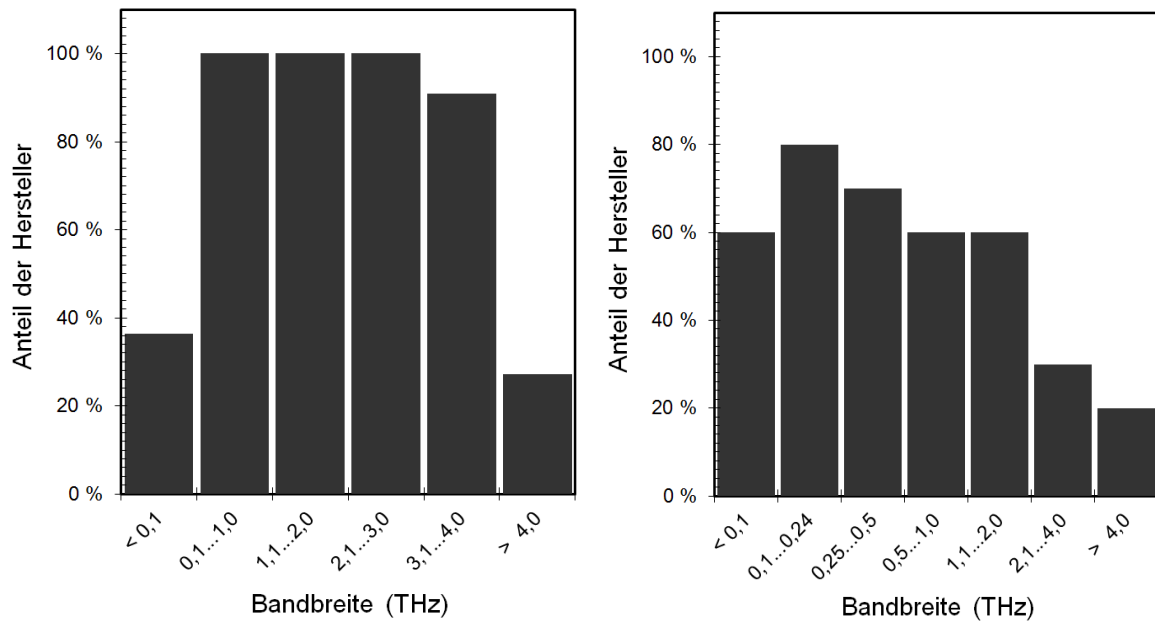


Abbildung 9: Verteilung der Bandbreite der verfügbaren Terahertz-Frequenzen der weltweiten Hersteller für gepulste (links) und CW-Systeme (rechts)

Die Baugröße von Terahertz-Systemen konnte in den letzten zehn Jahren stark reduziert werden [6,11]. Dies führt in der Regel auch zu einer Erhöhung der Robustheit. Die Abbildung 11 liefert einen Überblick über die verfügbaren Systemgrößen. Es zeigt sich eine sehr breite Spreizung, die sich u. a. durch die große Vielfalt unterschiedlicher Systemarten erklärt. Das kleinste Terahertz-System lässt sich mit einem minimalen Bauvolumen von einem Liter in der Gruppe der optischen CW-Systeme finden. Die größeren Systeme sind meist Geräte mit einer Bildgebungseinheit, die meist durch Raster-Scan-Verfahren sehr groß ausfallen. Personenscanner aus dem Sicherheitsbereich könnten ebenfalls für die zerstörungsfreie Prüfung interessant werden. Sie weisen derzeit noch ein sehr großes Bauvolumen aufgrund ihrer derzeitigen Zielanwendung auf, das jedoch für Prüfanwendungen signifikant reduziert werden könnte. Viele großvolumige Terahertz-Systeme basieren häufig auf optischer Freistrahltechnik ohne Faserkopplung. Das Bauvolumen der Terahertz-Systeme wird zudem häufig durch die Kapselung bestimmt, die z. B. für OEM-Anwendungen weggelassen werden könnte und somit den erforderlichen Bauraum signifikant reduziert.

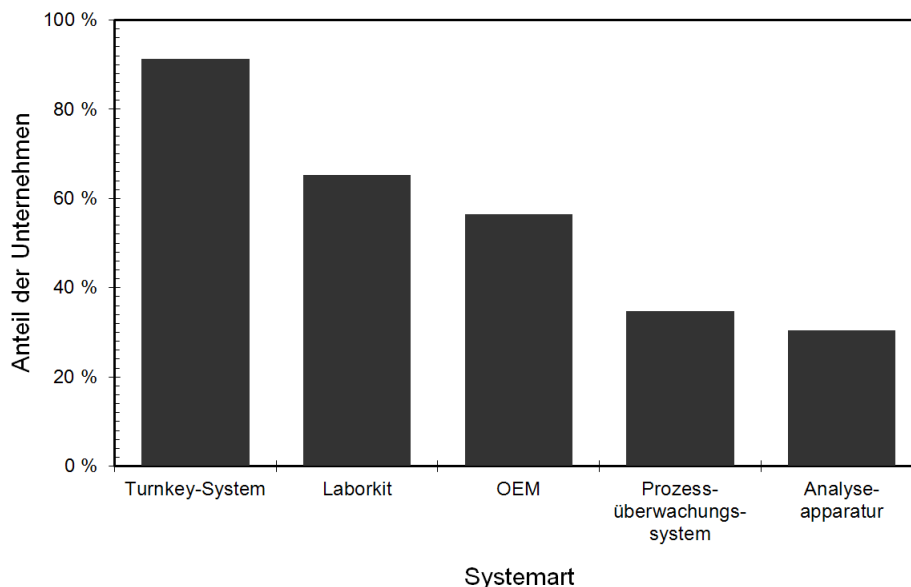


Abbildung 10: Verteilung der Terahertz-Systemarten der weltweiten Hersteller

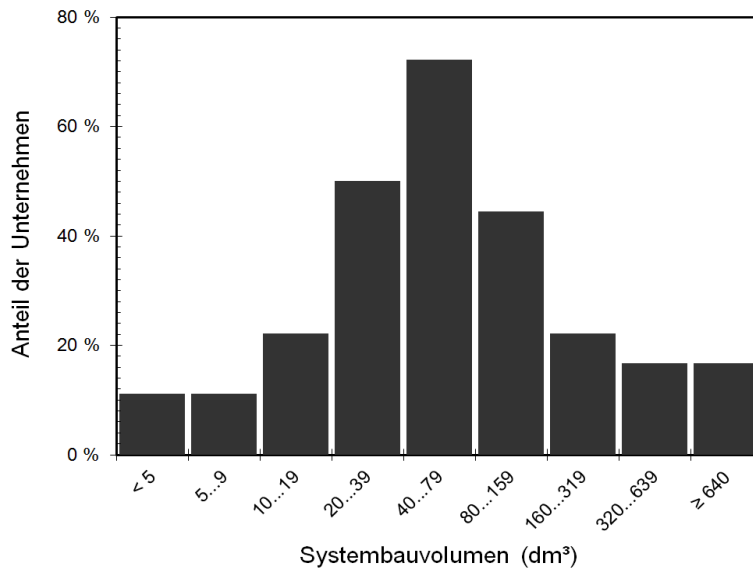


Abbildung 11: Verteilung des Terahertz-Systembauvolumens der weltweiten Hersteller

4.3 Anwendungsbereiche

Die Einsatzmöglichkeiten von Terahertz-Systemen sind vielfältig. Die Abbildung 12 bietet eine Einordnung, welche Anwendungen die weltweiten Hersteller und Distributoren der DACH-Region mit eigenen Anwendungsvorstellungen adressieren möchten. Nahezu alle Unternehmen sehen mit 91 % den wissenschaftlichen Sektor als eine Hauptanwendung. Dies erklärt sich mit dem aktuellen Entwicklungsstand der Terahertz-Technologie und den steigenden Forschungsaktivitäten (vgl. Abschnitt 3.2). Die Hersteller forcieren außerdem sehr stark analytische (74 %) und industrielle Einsatzszenarien (65 %). Die für die zerstörungsfreie Prüfung interessante Bildgebung wird mit immerhin 57 % noch vom überwiegenden Teil der Unternehmen als Anwendung gesehen. Die zerstörungsfreie Prüfung per se wird noch mit 35 % der Unternehmen adressiert. Die Sicherheitstechnik wird von vielen Experten häufig als eine Kernanwendung gesehen und wurde in den letzten Jahren stark durch öffentliche Mittel gefördert. 48 % der Unternehmen sehen hier auch einen entsprechenden Markt.

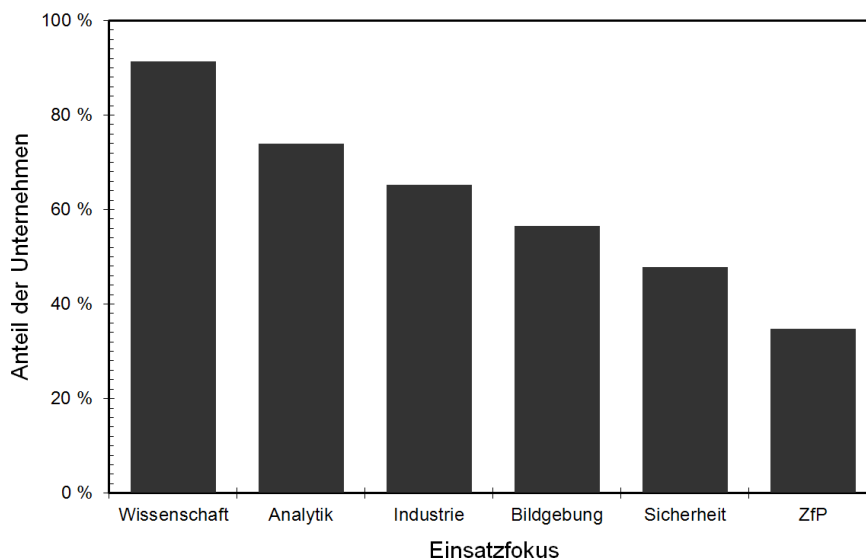


Abbildung 12: Zielanwendungen, welche die weltweiten Hersteller von Terahertz-Systemen und Distributoren der DACH-Region mit eigenen Einsatzvorstellungen adressieren möchten.

4.4 Systemkosten

Beim kommerziellen Einsatz von Terahertz-Systemen sind die Systemkosten häufig ein entscheidender Faktor. Die Abbildung 13 zeigt die Verteilung der gesamten Terahertz-Systemkosten. Das günstigste System ist ab etwa 40.000 € erhältlich. Die günstigsten Terahertz-Systeme sind häufig einfache Laborkits mit optisch gepulster oder optischer CW-Terahertz-Technik. Der Großteil der Hersteller bietet jedoch Systeme im Preissegment von 50.000 bis 200.000 € an. Hierunter fallen alle verfügbaren Systemvarianten. Die teureren Terahertz-Systeme sind meist vollgekapselte Laboranalyse- oder prozesstaugliche Geräte, die teils mobil oder mit einer Bildgebungseinheit ausgestattet sind.

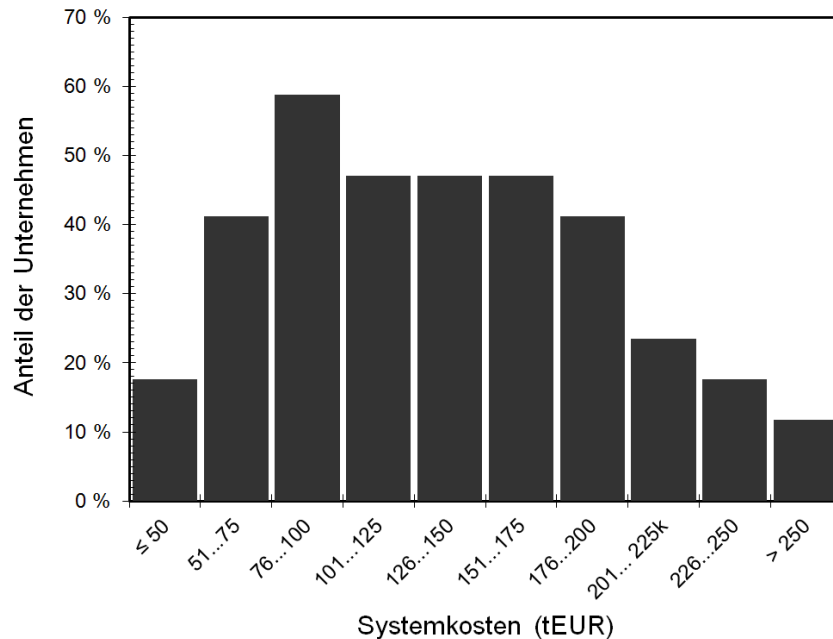


Abbildung 13: Verteilung der gesamten Terahertz-Systemkosten für alle Systemtypen der weltweiten Hersteller

Um einen Eindruck über die interne Kostenaufschlüsselung eines Terahertz-Systems zu erhalten, sind in Abbildung 14 beispielhaft die mittleren Komponentenkosten für ein optisch gepulstes Terahertz-System aufgelistet. Bei dieser Systemart ist der Hauptkostenfaktor der Ultrakurzpulslaser, der etwa die Hälfte der Gesamtkosten ausmacht. Hier ist jedoch zukünftig mit einem starken Rückgang der Kosten durch preiswertere Modelle zu rechnen. In den letzten fünf Jahren sind die Kosten für geeignete Ultrakurzpulslaser um teils über 70 % gesunken. Die Technologien für das optische Sampling (z. B. Verzögerungstechniken zur Terahertz-Pulsabtastung) sind mittlerweile sehr vielfältig und so auch deren Preisspanne. In der Zukunft dürften sich die Kosten für die Auswertesoftware etwas erhöhen, da in der geeigneten Auswertung der Terahertz-Signale noch viel Potenzial steckt und eine anwendungsspezifische Entwicklung mit Ziel einer einfachen Handhabung und Aussagequalität die unbedingte Voraussetzung für eine industrielle Akzeptanz ist.

Da die Stückzahlen verkaufter Terahertz-Systeme bei den Herstellern derzeit noch sehr gering sind, werden die Entwicklungskosten auch in entsprechend großer Höhe auf die finalen Produkte umgelegt. Die absoluten Komponentenpreise könnten bei entsprechender Absatzhöhe signifikant fallen.

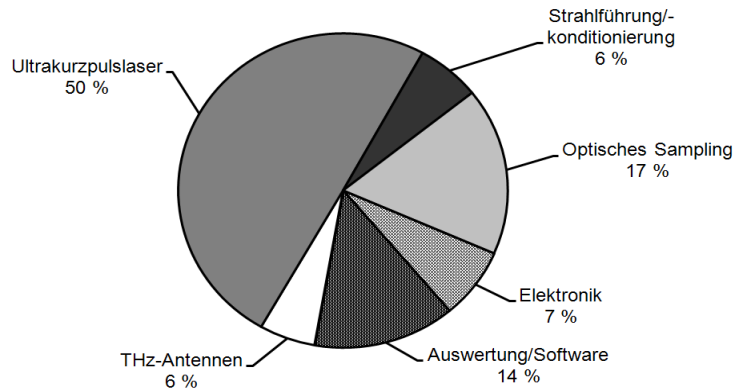


Abbildung 14: Exemplarische Kostenaufschlüsselung der Komponenten für ein optisch gepulstes Terahertz-System

5. Zukünftige Entwicklung

5.1 Systemtechnik

Aufgrund des bisherigen Entwicklungsfortschritts und den anhaltend intensiven Forschungsaktivitäten ist davon auszugehen, dass die Terahertz-Systeme zukünftig noch leistungsfähiger, kleiner und robuster werden. Bei den optischen Terahertz-Systemen werden konventionelle Freistrahlaufbauten immer häufiger durch fasergekoppelte Technologien substituiert werden. Die Fortschritte in der Sicherheitstechnik durch die Entwicklung von Körperscannern könnten die vollelektronischen Systeme attraktiver gestalten. Diese bildgebende Technologie dürfte insbesondere für die zerstörungsfreie Prüfung sehr interessant sein und ließe sich dort gut adaptieren. Es sind außerdem Trends erkennbar, dass die Leistungsfähigkeit von Terahertz-Systemen zunehmend durch konkrete Anwendungen zielgerichtet und selektiv angepasst wird.

Ein großer Nachteil für die Terahertz-Technologie im Vergleich zu anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren ist die aufwändige Bildgebung großer Bauteile. Durch die hohen Kosten für Terahertz-Sender und -Detektoren werden zumeist noch rasternde Bildgebungsverfahren eingesetzt. Somit ist die Aufnahmegeschwindigkeit meist durch die eingesetzte Verfahrenmechanik limitiert. Eine Lösung könnte der Einsatz von Gruppenstrahlertechnik sein, wie sie schon seit langem in der Ultraschalltechnik und mittlerweile auch in Körperscannern zum Einsatz kommt (vgl. Abschnitt 5.3).

5.2 Marktentwicklung

Die vorausgegangenen beschriebenen Entwicklungen deuten auf einen weiteren Aufstieg der Terahertz-Technologie hin. Dieses Verfahren und seine Möglichkeiten werden durch die rege Publikationstätigkeit immer breiter gestreut (vgl. Abschnitt 3.2), sodass auch die potenziellen Anwender vermehrt darauf aufmerksam werden. Es ist daher auch weiterhin mit einem wachsenden Angebot an Terahertz-Systemen zu rechnen.

Trotz sehr vereinzelter Geschäftsaufgaben in den letzten fünf Jahren fand bis dato noch keine nennenswerte Konsolidierung statt. Zurzeit liegt die Zahl verkaufter Terahertz-Systeme der etablierten Hersteller bei fünf bis zehn Systemen pro Jahr und Firma. Die Wachstumsrate liegt bei diesen zwischen 5 und 20 % pro Jahr. Gemessen am aktuellen Bedarf scheint das Angebot an Terahertz-Systemen jedoch noch überproportional hoch zu sein. Diese geringen Stückzahlen stellen auch eine Erklärung für die vergleichsweise hohen Terahertz-Systemkosten dar (vgl. Abschnitt 4.4). Die meisten Unternehmen schöpfen ihren Hauptertrag noch aus wissenschaftlichen und nicht-industriellen Anwendungen bzw. weiteren Geschäftsfeldern neben der Terahertz-Technologie.

5.3 Wettbewerbssituation

Es ist bereits jetzt ein zunehmender Wettbewerb der verschiedenen Anbieter zu registrieren. Dies begründet sich durch die Vielzahl der Terahertz-Systemanbieter als auch durch die zurzeit noch begrenzte Anzahl konkreter industrieller Anwendungen. Die meisten Hersteller möchten jedoch den industriellen Markt adressieren, da hier weitaus höhere Stückzahlen als im wissenschaftlichen Segment zu erwarten sind.

Ein kommerzieller Schwerpunkt der Terahertz-Technologie stellt derzeit noch die DACH-Region dar (vgl. Abschnitt 4.1). Allerdings ist der nordamerikanische Sektor bereits stärker in konkreten industriellen Anwendungen vertreten. Erste Schritte in diese Richtung zeichnen sich auch in der DACH-Region ab [1,12], dennoch sollte die Konkurrenzsituation beachtet werden. Auch die etablierten amerikanischen Unternehmen zielen bereits stark auf den europäischen Markt ab. Ein Defizit der deutschen Terahertz-Hersteller könnte hierbei darstellen, dass ihre Wurzeln zumeist in der Lasertechnik des akademischen Umfelds stammen. Ein direkter Industriebezug ist hier häufig nicht vorhanden, der jedoch eine günstige Voraussetzung für eine entsprechende Produktausrichtung und damit -akzeptanz ist. Eine Lösung könnte hier die verstärkte Zusammenarbeit mit etablierten industriellen Anbietern anderer Prüftechnologien, Transfereinrichtungen wie Industrienahmen Forschungseinrichtungen oder direkten OEM-Nehmern sein.

Ausländische Unternehmen sind zudem meist eher bereit, auf eigene Kosten und eigenes Risiko in eine Vorentwicklung und damit in Vorleistung für einen zukünftigen potenziellen Markt einzusteigen. Damit werden Produkte geschaffen, die möglichen industriellen Interessenten als verfügbare Terahertz-Systeme präsentiert werden können. Dies führt zu einer wesentlich höheren Akzeptanz und beträchtlichen Minimierung der Hemmschwelle zum Einstieg in eine unbekannt Technologie. In Deutschland wird im Gegensatz dazu häufig zuerst der potenzielle Industriekunde akquiriert, um mit ihm anschließend eine Entwicklung anzugehen oder gemeinsam öffentliche Fördermittel einzuwerben.

Es ist außerdem zunehmend zu beobachten, dass größere Unternehmen auf die Terahertz-Technologie aufmerksam werden und hier eigene Produktentwicklungen forcieren oder teilweise bereits in den Markt gebracht haben. Entgegen dem bis heute vorwiegend durch kleine- und mittelständische Unternehmen geprägten Herstellermarkt sind größere Unternehmen leichter dazu in der Lage, in umfangreiche Vorleistungen für z. B. Produktentwicklungen zu gehen, um sehr ausgereifte Produkte präsentieren zu können. Dazu zählen z. B. auch die Entwicklung ausgereifter Anwendungssoftware, spezifischer Messköpfe, einfacher Kalibrierungen sowie das Housing. Hier ist häufig zu erkennen, dass deutsche Hersteller bereits meist mit einer Vorstufe zufrieden sind und die Möglichkeiten in der Produktentwicklung für eine verbesserte Präsentation beim Kunden nicht ausreizen.

Der Markt ist durch die bisherigen Aktivitäten der kleinen und mittelständischen Unternehmen bereits gut präpariert und könnte durch technisch ausgereifte und anwenderfreundliche Produkte der großen Unternehmen umgesetzt werden. Tendenzen hierzu können bereits durch die Aktivitäten japanischer Großkonzerne beobachtet werden. In Deutschland wurden z. B. auch viele Förder- und Unternehmensmittel in die Entwicklung von Körperscannern für die Sicherheitstechnik investiert. Diese Technologie bietet sich auch für den Einsatz in der zerstörungsfreien Prüfung an. Durch günstige Serienproduktionsverfahren ist diese Technik vergleichsweise günstig und für viele Anwender sicherlich attraktiv. Hier ist mittlerweile zu beobachten, dass diese Anbieter verstärkt dieses erweiterte Einsatzfeld der zerstörungsfreien Prüfung adressieren und entsprechende Ambitionen zeigen.

Allerdings ist zu erwarten, dass auch nach wie vor die kleinen und mittelständischen Unternehmen den Terahertz-Markt prägen werden, da die Einsatzbereiche und damit auch

die Systeme sehr vielschichtig sind. Dies ist auch bei den anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren wie z. B. der Thermografie, Röntgen- oder Ultraschalltechnik zu beobachten, wo die Massenwendungen primär von den größeren und der Spezialitätenmarkt vorwiegend von kleinen und mittelständischen Unternehmen bearbeitet werden.

5.4 Preisentwicklung

Das aktuelle Preisniveau für Terahertz-Systeme wurde bereits in Abschnitt 4.4 diskutiert. Aufgrund der stärker werdenden Wettbewerbssituation sowie ersten, sich abzeichnenden Industrieanwendungen mit höheren Stückzahlen wird ein weiterer Rückgang der Terahertz-Systempreise zu beobachten sein. Damit könnten auch die zurzeit noch hohen Anteile der umgelegten Entwicklungskosten auf größere Stückzahlen umgelegt werden. Dies bestätigt auch der Trend aus der Vergangenheit. Abbildung 15 zeigt exemplarisch die normierte Preisentwicklung optisch gepulster Terahertz-Systeme in den letzten Jahren. Hier ist eine weitere Kostensenkung in der Größenordnung um 10 % pro Jahr zu erwarten.

Durch neue technische Ansätze und Fertigungsverfahren werden ebenfalls die Komponenten- und damit Gesamtsystemkosten sinken. Eine Adaption der Körperscanner-technik aus Sicherheitsanwendungen in den Prüfbereich könnte bei gleichem preislichen Niveau im Vergleich zu etablierten Terahertz-Systemen jedoch eine erhöhte technische Leistungsfähigkeit und verbesserte Handhabung erlauben.

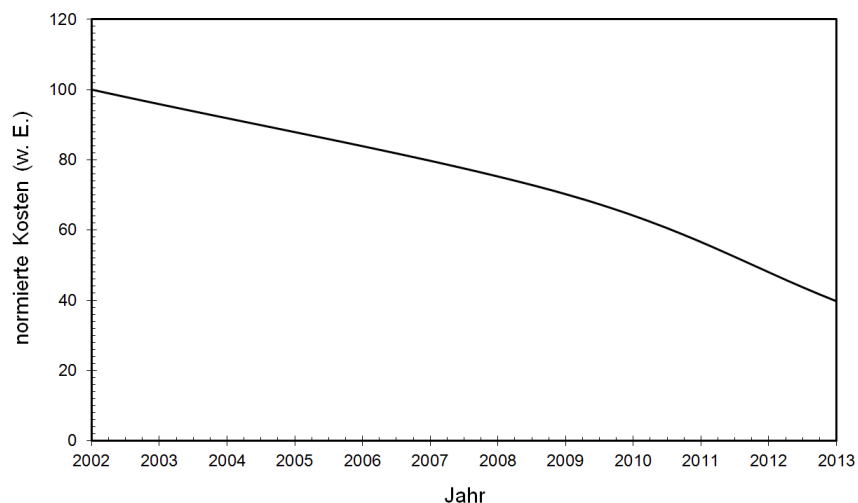


Abbildung 15: Exemplarische normierte Entwicklung der Systemkosten für ein optisch gepulstes Terahertz-System

6. Zusammenfassung

Es zeigt sich ein anhaltendes Interesse an der Terahertz-Technologie. Das wissenschaftliche Interesse ist stark gestiegen und dürfte auch zukünftig anhalten. Die Untersuchungen in diesem Spektralbereich sind jedoch nicht grundsätzlich neu. Teils werden auch traditionelle Begriffe wie „Ferninfrarot“ oder „Sub-Millimeter“ durch „Terahertz“ substituiert. Dennoch kennzeichnet diese neue Begrifflichkeit die neuen Entfaltungsmöglichkeiten, die durch die heute verfügbaren Methoden des zeitaufgelösten Messens eröffnet werden. Die kommerziellen Verwertungschancen wurden aufgrund der Patentrecherche ab dem Jahr 2000 gesehen. Hier bleibt abzuwarten, ob die steigende Tendenz der Anmeldezahlen so weiterhin Bestand hat.

Es konnte zudem der aktuelle Stand der kommerziell verfügbaren Terahertz-Technik sowie deren Marktstruktur aufgezeigt werden. Es sind bereits viele Anbieter mit unterschiedlichsten Systemen am Markt vertreten. Die Auswahl kann bereits als enorm

bezeichnet werden. Für den Anwender wird sich der Zugang zu dieser Technologie immer weiter vereinfachen. Mit sinkenden Preisen sowie für die Anwendung angepassteren Systemen ist zu rechnen.

Häufig treffen jedoch durch die Gründungshistorie vieler Herstellerunternehmen unterschiedliche Mentalitäten aufeinander. Der Dialog, die Vorstellungen und Erwartungshaltung zwischen den häufig akademisch geprägten Terahertz-Systemanbietern und den industriellen Anwendern muss auf eine gemeinsame Basis gestellt werden. Dass dies funktionieren kann, zeigt vor allem der amerikanische Markt. Der steigende Wettbewerb bietet auch den Anwendern große Chancen. Deutschland ist seitens der kleinen und mittelständischen Hersteller zurzeit stark im Terahertz-Markt vertreten. Diese Chance gilt es zu nutzen und v. a. auch zukünftig auszubauen. Ausländische Unternehmen sowie größere Konzerne könnten hier zukünftig mehr technische und preisliche Bewegung in den Markt bringen. Prinzipiell dürfen sich aufgrund der dargestellten Situation potenzielle Anwender auf motivierte Anbieter von Terahertz-Systemen freuen.

Referenzen

- [1] J. Hauck, D. Stich, P. Heidemeyer, M. Bastian, T. Hochrein: *Industrielle Prozesswanddickenmessung in der Kunststoffrohrextrusion mittels zeitaufgelöster Terahertz-Systeme*, DGZfP-Jahrestagung: Dresden 2013.
- [2] A. Hoffknecht, D. Holtmannspötter, A. Zweck: *Die Terahertz-Technologie und ihre möglichen Anwendungen*, Zukünftige Technologien Consulting der VDI-Technologiezentrum: Düsseldorf 2006.
- [3] N. N.: *Emerging Trends in Terahertz Imaging*, Frost & Sullivan: San Antonio (USA) 2008.
- [4] A. McWilliams: *Terahertz Radiation Systems: Technologies and Global Markets*, BCC Research: Wellesley (USA) 2008.
- [5] T. Hochrein, I. Alig: *Prozessmesstechnik in der Kunststoffaufbereitung*, Vogel Fachbuchverlag: Würzburg, 2011.
- [6] T. Hochrein: *Terahertz-Technologie in der Kunststofftechnik – Ein Update*, Würzburger Tagung Innovative zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) für moderne Kunststoffe, SKZ: Würzburg 2012.
- [7] A. Redo-Sanchez, X.-C. Zhang: *Terahertz Science and Technology Trends*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 14, 260 (2008).
- [8] C. Fattering, D. Grischkowsky: *Terahertz Beams*, Appl. Phys. Lett. 54, 490 (1989).
- [9] B. Wördenweber: *Technologie- und Innovationsmanagement in Unternehmen*, Springer: Berlin 2008.
- [10] R. Michaeli: *Competitive Intelligence*, Springer: Berlin 2006.
- [11] T. Hochrein, N. Krumbholz, S. Wietzke, K. Kretschmer, M. Bastian, M. Koch: *Terahertz-Spektroskopie zur Schmelzeanalyse in der Compoundierung*, GAK Gummi Fasern Kunststoffe 61, 517 (2008).
- [12] R. Klose, P. Bernhardt: *THz-basierte Wanddickenmessung in der Kunststoffextrusion*, 1. Fachseminar Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis der DGZfP: München 2013.