

Ultrakurze Hochspannung Forschung u

Roland Glaser

Seit langem ist bekannt, dass elektrische Feldimpulse in der Größenordnung von einigen kV/m und Mikro-Sekunden Dauer in Zellsuspensionen zu einem Durchbruch der Zellmembran führen. Diese, in die Literatur als „electric breakdown“, „electroporation“ oder „electropermeabilization“ eingegangene Methode ist auf eine kurzzeitige Erhöhung des Membranpotentials der Zellen auf Beträge von über einem Volt zurückzuführen, und erfreut sich als Verfahren zur Einschleusung von Molekülen in die Zelle in verschiedenen Bereichen der Biotechnologie und Therapie breiter Anwendung. Vor einigen Jahren ging man im Labor von **U. Zimmermann** in Würzburg dazu über, Nano-Sekunden Pulse höherer Feldstärke einzusetzen, um auch kleinere Strukturen, inklusive Zellorganellen zu beeinflussen (Müller, K. J., Sukhorukov, V. L., Zimmermann, U.: Reversible electropermeabilization of mammalian cells by high-intensity, ultra-short pulses of submicrosecond duration. *J. Membrane Biol.* 2001; **184**, 161-170). Diese Verkürzung der Pulszeit und eine gleichzeitige Erhöhung der Feld-Amplitude über den Betrag von MV/m hinaus, versprechen wesentlich neue Möglichkeiten der Anwendungen dieser Methode in der Biotechnologie.

Diesem Gebiet wurde auf der diesjährigen BEMS-Tagung erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet. Unter der Überschrift: „Pulsed HV-Research“ (HV= **H**igh **V**oltage) war es durch einen Plenarvortrag von K. H. Schönbach (Center for Bioelectrics, Old Dominion Univ., Norfolk, USA) vertreten, sowie durch die Session I: „Pulsed HV Research & Applications“ mit 6 Vorträgen. Außerdem befassten sich drei Vorträge der Session V, die eigentlich mit: „THz Applications in Biolo-





ngsimpulse: nd Anwendung

gy and Medicine“ überschrieben war, dem Problemkreis der Nano-Pulse. In verschiedenen Postern wurden im wesentlichen die in den Vorträgen dargestellten Resultate in erweiterter Form präsentiert. Zusätzlich fand am Rande des Kongresses, am Nachmittag des 24. Juni, noch eine, von der US Air-Force veranstaltete „Tutorial Session“ statt, eine Marathon-Veranstaltung, in welcher über ein Dutzend Referenten in streng limitierten 5,5-Minuten-Vorträgen (!) über die Ergebnisse ihrer Forschungen im Rahmen des von der US Air-Force gesponserten „AFOSR-MURI“-Programms berichteten (MURI = „**M**ultidisciplinary **U**niversity **R**esearch **I**ntegration“). Danach fand im nicht-öffentlichen Rahmen eine Beratung über die weiteren Aktivitäten dieses Projektes statt. Im vorliegenden Bericht soll versucht werden, aus den zum Teil wiederholt, jedoch mit unterschiedlicher Betonung und Detailliertheit präsentierten Ergebnissen der verschiedenen Arbeitsgruppen einige dem Referenten wesentlich erscheinende Schwerpunkte dieser Forschungsrichtung darzustellen.

Welches Interesse hat die Armee an dieser Forschung? Diese offensichtliche Frage versuchte ein Vertreter der Air-Force zu Beginn des MURI-Symposiums mit folgender Parallele ausweichend zu erklären: Man hätte in den 50-er Jahren auch die Laser-Forschung gefördert, ohne dass damals irgendein militärischer Nutzen davon ersichtlich gewesen wäre. In diesem Zusammenhang sei der Leser allerdings auf einen deutlichen Unterschied aufmerksam gemacht, den bereits der Chairman der Session I in der Einleitung zu den Vorträgen betont hatte: Bei „Pulsed HV-Research“ handelt es sich um die Wirkung von Gleich-

spannungs-Pulsen, nicht um gepulste Mikrowellen-Strahlung. Man positioniert die Zellen in Millimeterbreiten, oder noch engeren Spalten zwischen zwei Metall-Elektroden und appliziert mehr oder weniger rechteckige kV-Pulse. Dies ist deutlich zu unterscheiden von Mikrowellen-Pulsen, die auf Entfernungen abgestrahlt werden können. Im Gegensatz zu diesen Mikrowellen-Pulsen, kann man sich eine militärische Anwendung dieser HV-Pulse tatsächlich nur schwer vorstellen.

K. H. Schönbach führte in einem instruktiven Plenarvortrag die Grundidee und die technische Realisierung dieser „Supra-Electroporation“, wie es auch genannt wurde, vor. Wenn die Pulslänge groß ist im Vergleich zu der Zeitkonstante, welche die Zellmembran in ihrer Eigenschaft als Kondensator zu ihrer elektrischen Aufladung benötigt, so ist die Änderung des Membranpotentials der applizierten äußeren Feldstärke und dem Radius der Zelle proportional. Dies gilt für Rechteck-Pulse, länger als etwa eine Mikro-Sekunde. In diesem stationären Zustand ist die Membran polarisiert, während das Zellinnere weitgehend feldfrei bleibt. Anders bei den Nano-Sekunden Pulsen. In dieser Zeitspanne beginnt sich der Membran-Kondensator gerade erst aufzuladen. Das Membranpotential der Zelle wird erst zunehmend beeinflusst. Andererseits werden die Zellorganellen, wie der Kern, die Mitochondrien und andere, membranumhüllte Bereiche, durch das elektrische Feld im Zell-Inneren belastet. Diese kleinen Vesikel haben einmal eine geringere Zeitkonstante der kapazitiven Aufladung, zum anderen sind sie durch ihre höhere Membran-Krümmung offenbar anfälliger für den elektrischen

Durchschlag. Natürlich muss die Feldstärke des Pulses entsprechend höher sein, als beim einfachen „Breakdown“ der Zellmembran. Gleichzeitig ist zu beachten, dass durch die kapazitive Kopplung des inneren Milieus mit dem äußeren Feld über die Zellmembran, aus dem monopolen Eingangspuls, ein bipolarer Puls im Inneren der Zelle wird. Schönbach zeigte die Zusammenhänge zwischen Puls-Länge und Puls-Höhe auf, die zur Manipulation der verschiedenartigen Membransysteme erforderlich sind. Wegen der Kürze des Impulses sind Temperaturänderungen über 1°K dabei nicht zu erwarten. Die tatsächliche Feldstärke im Inneren der Zelle lässt sich durch ultrakurze Laser-Fluoreszenz-Photometrie unter Einsatz entsprechender Farbstoffe nachweisen.

Interessant sind offenbar auch Kombinationen von kurz hintereinander applizierten Pulsen unterschiedlicher Länge. Wird zunächst die Zell-Membran mit einem längeren Puls geringerer Feldstärke durchbrochen, dann hat es ein darauf folgender kurzer Impuls leichter, die inneren Organellen der Zelle zu beeinflussen. An Beispielen der Freisetzung von Kalzium aus intrazellulären Vesikeln oder der Permeation von Floreszenz-Farbstoffen durch die Doppel-Membran des Kernes wurde dies experimentell belegt. Die Öffnung der Kernmembran, so nimmt man an, erfolgt nicht so sehr durch den Durchbruch der Doppel-Membran aus Lipiden, sondern hauptsächlich durch die elektrische Beeinflussung der entsprechenden Poren-Proteine. Allerdings ist man sich über die Details dieses Prozesses noch nicht im Klaren.

Im ersten Vortrag der diesem Thema gewidmeten Sektion stellte **J. C. Weaver** ein Modell vor, welches es erlaubt, die Feldverteilung in der Zelle bei Applikation von Pulsen unterschiedlicher Art darzustellen. Es handelt sich um ein vom Autor bereits mehrfach verwendetes zwei-dimensionales Modell aus einem Netzwerk kleinster RC-Kreise („transport lattice approach“), welches Membranen und Elektrolyt-Milieu der Zelle und ihrer inneren Strukturen simuliert. Im Gegensatz zu den Ausführungen Schönbachs ist Weaver jedoch der Meinung, dass die ns-Pulse auch die Zell-Membran durchbrechen können. Dies mag daran liegen,

dass trotz erst beginnender Polarisierung der Zell-Membran im Nano-Sekunden-Bereich, infolge der extrem hohen Feldstärken, dies bereits zum Durchbruch ausreicht. Die Membran der Mitochondrien ist gegenüber äußeren Pulsen offenbar relativ resistent, da sie durch ihren hohen Grad an Faltungen eine ungleich größere Kapazität aufweisen als Kern und andere Vesikel.

Die weiteren Beiträge der Sektion beinhalteten im Wesentlichen eine Erweiterung der im Plenarvortrag enthaltenen Aspekte, zeichnet doch Schönbach als Koautor der meisten Referenten. So berichten **Tseng et al.** über Gen-Expression in menschlichen HL-60 Zellen nach 3 Pulsen von 60 ns Länge und 1,5 MV/m Feldstärke. Von 20.498 untersuchten Genen wurden durch die Pulse 603 davon mindestens um das zweifache nach oben oder unten reguliert. Dies führte jedoch nicht zur Apoptose der Zellen. Auch konnten in Folge keine Änderungen der Zell-Eigenschaften nachgewiesen werden.

Beebe et al. untersuchten die Intensitäts-Schwelle derartiger Pulse, die zu Apoptose der Zellen führt. Auch sie konnten die Auslösung verschiedener Signalwege durch die applizierten Pulse erkennen.

Pakhomov et al. widmete sich der Frage nach einer quantitativen Wertung der Puls-Behandlung als Funktion von Dauer, Amplitude und Anzahl applizierter Pulse. Abgesehen von starker biologischer Variabilität der Zellen in Abhängigkeit von ihrer momentanen Position im Zell-Zyklus, unterscheiden sich natürlich auch Zellen unterschiedlicher Zell-Linien voneinander. Immerhin konnten typische Dosis-Effekt-Kurven aufgenommen werden, trägt man die Überlebensrate der Zellen gegen die absorbierte Dosis in J/g auf. Obgleich die Mechanismen der Abtötung der Zellen durch die HV-Pulse im Detail noch unklar sind, zieht der Autor zumindestens formale Parallelen zur Wirkung ionisierender Strahlung.

Auf die physikalische Charakterisierung der verwendeten Pulse und die elektrochemischen Prozesse an den Elektroden wurde in verschiedenen Postern und Kurzberichten des **MURI-Symposiums** eingegangen. Natürlich ist es aufgrund der Schaltmechanismen (MOFSET-Switch, mechanische Vorrichtungen), der Elektrodenkinetik und nicht zuletzt der dielektrischen



Eigenschaften der Zellen selbst, nicht zu erwarten, dass die Pulse tatsächlich eine Rechteck-Form aufweisen. Fourier-Analysen lassen vielmehr eine Frequenz-Summation erkennen, welche jedoch gewöhnlich die 10 MHz-Grenze nicht überschreitet. Aus diesem Grund wurde mitunter auch der Begriff „ultrawideband electromagnetic radiation“ (= UWB-EMR) verwendet (Natarajan et al.). Gemeint ist dabei natürlich das Gleiche wie mit der Bezeichnung „ns-pulse“. Analysiert wurde in diesen Untersuchungen allerdings nur die elektronisch erfassbaren Pulsformen. Berücksichtigt man, dass selbst Mess-Elektroden ihre eigene Impedanz-Kinetik aufweisen, so wird klar, dass der tatsächliche zeitliche Feldverlauf an den entsprechenden Membranen kaum genau erfassbar ist. Gleichzeitig wurden Feld-Verteilungen in den verwendeten Anlagen sowie die zu erwarteten Temperatursprünge theoretisch analysiert. Die Optimierung der elektrischen und elektrochemischen Systeme zur Applikation dieser Impulse ist eines der Schwerpunktthemen der weiteren Forschung.

Einen großen Raum nimmt in diesem Forschungsprogramm natürlich die Frage nach den eigentlichen Wirkungsmechanismen dieser Pulse ein. Dies ist einmal ein Problem der schnellen Methoden, zum Nachweis der während oder unmittelbar nach dem Puls ablaufenden Vorgänge, zum anderen eine Frage nach den Reaktionen, die zwar durch den Puls ausgelöst werden, sich allerdings erst im Verlaufe von Stunden und Tagen nach der Behandlung manifestieren. Das MURI-Symposium zeigte eindrucksvoll, wie ein aktuelles Problem, entsprechend finanziell gefördert, auf breiter multidisziplinärer Basis kooperativ angegangen wird. Es ist zu erwarten, dass dadurch die Entwicklung dieser Nano-Sekunden-Puls-Methode in ihrer biotechnologisch wichtigen Anwendung nachhaltig gefördert wird.

THz- oder T-Strahlung und ihre Anwendung in Medizin, Biologie (und Security!)

Die **Bio-Electro-Magnetics Society** hat ihren Interessenbereich im Frequenzspektrum elektromagnetischer Felder nach oben erweitert. Während man die Obergrenze: „nichtionisierender Strahlung“ zumeist auf

300GHz legte und den Bereich darüber bis zum Beginn der Ionisierung im ultravioletten Licht den Photobiologen überließ, wurde auf dieser Konferenz die Interessengrenze um zwei Zehnerpotenzen nach oben verschoben. Damit öffnete man sich einem internationalen Trend von Technik und Forschung der letzten Jahre, welche diese Terra incognita zunehmend erobert. Dieser Schritt wurde dokumentiert durch zwei Plenarvorträge und eine Sektion mit der Überschrift: „THz Application in Biology and Medicine“.

Entsprechend dem Neuheitsgrad dieses Problemkreises war zunächst eine umfassende Information erforderlich, welche die Eigenschaften dieser Strahlung, die Technik ihrer Erzeugung und Detektion, ihre Anwendung in Biologie und Medizin, und schließlich deren mögliche biologische Wirkungen betraf. Dies erfolgte durch die Referate von **M. Chamberlain**: „Application of Terahertz-Frequency Radiation in Medicine and Biology“ von der University of Durham (UK) und von **R. Oslander** (John Hopkins University, Laurel, USA) zum Thema: „THz Research: An Overview“.

In diesem Zusammenhang stellte auch **G. P. Gallera** (ENEA-UTS TechFisiche Avanzate, Frascati, Italien) das „THz-BRIDGE“-Projekt der Europäischen Union vor, welches die Zusammenarbeit von 10 Laboratorien aus 5 Ländern der EU und Israel bündelt. Die Bezeichnung BRIDGE weist nicht nur auf die Brückenfunktion dieses Frequenzbereiches zwischen GHz-Feldern und Infrarot hin, es steht auch für eine Abkürzung von: „THz-radiation in **B**iological **R**esearch, **I**nvestigation on **D**iagnostics and study on potential **G**enotoxic **E**ffects“.

Chamberlain erinnerte daran, dass der Wunsch, eine Brücke zu schlagen zwischen den Schwingungen der Elektrotechnik und den Frequenzen der Optik, schon alt ist. Er verwies auf eine Publikation mit der Überschrift: „Heat Ray of Great Wavelength“ (Phys. Rev.), in welcher **Rubens** und **Nichols** bereits 1897 über den vergeblichen Versuch klagten, dass trotz vieler Versuche die elektrischen Oszillationen nicht genügend schnell, und die Wellenlängen des infraroten Lichtes nicht genügend groß seien, um diese Lücke im Spektrum elektromagnetischer Wellen zu überbrücken. Tatsächlich, so der Referent, kommt man mit

Transistoren und ähnlichen Bauelementen der Festkörperphysik nicht über 300 GHz, d.h. 0,3 THz, während es kaum möglich ist, mit Lasern den Bereich unterhalb von 30 THz zu erreichen.

Lange Zeit blieb daher der Frequenzbereich in dieser Lücke weitgehend unerforscht. Vor etwa 10 Jahren gelang es dann, durch schnelle und intensive Laser-Pulse, THz-Pulse aus Halbleiterkristallen herauszuschlagen - ein großer Aufwand, den Chamberlain eindrucksvoll in einem Cartoon illustrierte, welcher einen Porsche zeigte, den man vor eine Mauer fuhr, um damit einige Ziegel zu herauszuschlagen. Tatsächlich handelt es sich dabei um große, raumfüllende Anlagen. Einen Durchbruch erzielte **A. Tredicucci** aus Pisa, dem es in Kooperation mit **G. Davis** von der Universität Cambridge vor wenigen Jahren gelang, mit einem THz-Laser, aufgebaut aus mehreren Nano-Schichten, Strahlung im 4,4 THz-Bereich zu erzeugen. Dieses kleine Gerät benötigt allerdings für seine Funktion die Temperatur des flüssigen Stickstoffs.

Nicht nur die Erzeugung, auch der Nachweis und die Messung von THz-Feldern ist zur Zeit ein Gebiet intensiver Forschung und Entwicklung. Osiander nannte in diesem Zusammenhang Bolometer als klassischen Indikator auf der Basis von Wärme-Entwicklung in breitem Frequenzbereich, ferner elektronische Detektoren, photoaktive Dipole und elektro-optische Kristalle.

Die ersten gescannten Bilder im THz-Bereich waren bereits geeignet, Forschungsgelder aus dem Fond der Anti-Terror-Bekämpfung zu aktivieren, ein Aspekt, der besonders im Vortrag von R. Osiander deutlich wurde. Das Maximum im Frequenzgang der Emission von Wärmestrahlung eines 300 K warmen Körpers liegt nämlich bei einigen 10 THz. Die vom menschlichen Körper auf diese Weise emittierten THz-Strahlen durchdringen die Kleidung, so dass er auf einer THz-Photographie nackt erscheint. Auf diese Weise lassen sich in der Kleidung verborgene Gegenstände nachweisen, die einer Personenkontrolle mit derzeitigen Methoden entgehen könnten.

Doch bleiben wir auf dem Gebiet der Bioelectromagnetics! Welche Eigenschaften haben diese Strahlen? Welche Möglichkeiten biomolekularer Analysen ver-

spricht deren Nutzung? Als wichtigste Eigenschaft ist die starke Absorption dieser Strahlung durch Wasser zu nennen. Dies limitiert einerseits ihre Anwendung in der Nachrichtenkommunikation und natürlich auch ihre Anwendung in Biologie und Medizin, andererseits eignet sich die THz-Spektroskopie offenbar gut dafür, den Wassergehalt von Zellen und z.B. auch von Blättern nachzuweisen. Bei den spektroskopischen Analysen und zellulären Untersuchungen ist man jedoch auf wasserfreie Präparate oder auf extrem dünne Schichten biologischen Materials angewiesen.

In feuchtem Gewebe beträgt die Eindringtiefe der T-Strahlen etwa 5-6 mm. Bei trockenem Gewebe sind es maximal 11 mm und in Fettschichten können Eindringtiefen von 20-30 mm erreicht werden. Osiander, offenbar auch wieder im Blick auf die Gelder aus dem amerikanischen Anti-Terror-Fond, präsentierte ferner Daten zur Durchdringung von THz-Feldern durch unterschiedliche Arten von Kleidung. Beide Plenarvorträge, und auch der Beitrag von **Crawley** et al. demonstrieren die Möglichkeit, Zähne zu durchleuchten und damit Bilder von Karies-Befall zu erzielen, die wesentlich höhere Auflösung erreichen als Röntgen-Aufnahmen. Allerdings erfolgten diese Aufnahmen bisher an gezogenen Zähnen. Die praktische Anwendung dieser Methode in der Zahnheilkunde ist noch Zukunftsmusik, solange weder THz-Quellen, noch -Nachweisgeräte die erforderliche Kleinheit besitzen, um Bilder der Zähne im Mund des Patienten zu liefern.

Besonders interessant sind offenbar verschiedene Methoden der THz-Spektroskopie organischer Moleküle. Die Referenten weisen auf die hohe Spezifität der Vibrations-Spektren von Aminosäuren, Proteinen und Ribonukleinsäuren hin. Darauf gingen nicht nur die Plenar-Referenten ein, sondern auch **A. Oka** et al. aus Japan, im ersten Vortrag der THz-Session. Man spricht sogar von „Fingerprint“ Rotationspektren, insbesondere in Gasphasen. Auch hier unterstreicht Osiander die Möglichkeit des Nachweises von Sprengstoff-Spuren in der Antiterror-Bekämpfung und im Auffinden von Bodenminen. Deren Sichtbarkeit im Boden soll bis auf Entfernungen von 10 m möglich sein. In diesem Zusammenhang verwies er auf die vermin-



ten Reisfelder in Kambodscha, die 300 Minen-Toten und Verletzten monatlich in Afghanistan etc.

Insbesondere verspricht der Einsatz der THz-Time Domain Spectroscopy (TDS) nicht nur neue Erkenntnisse beim Nachweis spezifischer Aminosäuren und eventuell sogar DNA-Sequenzen ohne die Notwendigkeit besonderer Markierung, sondern darüber hinaus auch wichtige Informationen über Wechselwirkungen der Proteine sowie deren Konformations-Änderungen. Dies ist wohl hauptsächlich dadurch bedingt, dass die Schwingungsfrequenz von Wasserstoffbrücken-Bindungen im Bereich der THz-Frequenzen liegt, sodass deren Nachweis und Dynamik durch TDS möglich wird. Problematisch ist natürlich auch hier die Notwendigkeit, Störungen durch zu hohen Wassergehalt weitgehend auszuschalten. Eine der Schwerpunkte des europäischen **THz-BRIDGE-Projektes** ist es, eine Datei für spektroskopische Parameter ausgewählter Biomoleküle im Frequenzbereich von 0,1 bis 20 THz zu schaffen. Ausführlich wurde über die Möglichkeit eines zukünftigen Einsatzes der THz-Strahlen in der Krebsdiagnose berichtet. So stellte z. B. **Chamberlain** die Möglichkeit des Nachweises von Melanomen und Basal-Zell-Karzinomen vor. An diesen erkrankten im Vereinigten Königreich jährlich 50.000 Patienten. Ein THz-Nachweis würde wesentlich beitragen zur Früherkennung und zur Darstellung des tatsächlich operativ zu entfernenden Areals bis zu einer Tiefe von 1 cm. Er stellte in Aussicht, dass auch andere Arten von Epithelial-Karzinomen auf diese Weise erkennbar werden könnten. Auch für die Diagnose von Mama-Karzinomen bietet sich diese Methode an. Entscheidend für die Differenzierung von gesundem und karzinösem Gewebe ist offenbar der Wassergehalt des Gewebes. Die genauen Differenzen in der Absorption und Streuung von THz-Strahlen zwischen gesundem und kranken Gewebe sind allerdings noch zu klären. In diesem Zusammenhang sprach Chamberlain bereits von der Möglichkeit der Entwicklung einer THz-Mikroskopie.

Wie hat man sich nun die Wirkung dieser Strahlung auf biologisches Gewebe vorzustellen? Diese Frage ist natürlich in engem Zusammenhang mit dem Problem der Grenzwerte und Sicherheitsbestimmungen zu sehen. In dem europäischen Projekt nehmen die

se Themen einen großen Raum ein. Natürlich kommt in Zusammenhang mit den gemessenen Absorptionsspektren der Strahlung die Frage nach speziellen Frequenzfenstern der Wirksamkeit auf. Chamberlain erinnert an die Fröhlich-Hypothese, die, 1977 aufgestellt, zunächst eine umfangreiche Suche nach scharfen Wirkungsfenstern im Mikrowellenbereich auslöste. Bekanntlich sagte diese Theorie ja derartige Frequenz-Spezifika für den hohen GHz-Bereich voraus. Trotz anfänglich positiv erscheinender Ergebnisse konnten solche Frequenzfenster im GHz-Bereich jedoch nicht bestätigt werden. Liegen sie vielleicht im Frequenzspektrum der T-Strahlung? Die weitere Forschung wird es erweisen. Erinnert sei jedoch an die Kritik der Fröhlich-Hypothese, welche der Wahrscheinlichkeit des Auffindens solcher Fenster auch in diesem Frequenzbereich entgegen steht. Trotzdem ist die alte Frage nach „nicht-thermischen“ Wirkungen in diesem Frequenzbereich neu zu stellen. Im BRIDGE-Projekt nehmen Studien zu möglichen genotoxischen Effekten dieser Strahlung einen besonderen Raum ein. Bisher liegen lediglich vorläufige Resultate vor, die es noch zu verifizieren gilt.

Die Sicherheits-Empfehlungen der ICNIRP und die entsprechenden Gesetze und Verordnungen der Länder zu nichtionisierender Strahlung betreffen lediglich den Frequenzbereich bis 300 GHz. Dieser ist natürlich angesichts der neuen Entwicklung zu erweitern, wobei dem Charakter der THz-Pulse besondere Beachtung zu schenken ist. Im BRIDGE-Projekt sind in diesem Zusammenhang Erhebungen vorgesehen über entsprechende Expositionswerte beim Personal, welches bei der Entwicklung von THz-emittierenden Geräten und deren Anwendung beteiligt ist.

Insgesamt scheint hier ein neues Gebiet eröffnet worden zu sein, welches vielleicht weniger Bedeutung in der Kommunikationstechnik, als vielmehr in der Medizin und biotechnologischen Analytik gewinnt. Entscheidend ist dabei in jedem Falle der technologische Fortschritt bei der Entwicklung kleinerer, billigerer und leistungsfähigerer THz-Quellen, sowie -Nachweisgeräte. Immerhin ist eindrucksvoll, wie bio-medizinische Forschung der technischen Entwicklung unmittelbar auf dem Fuße folgt.