



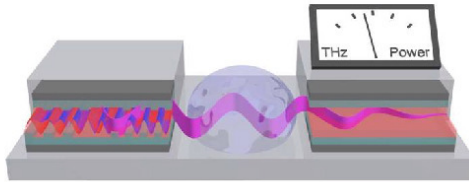
Carsten Brenner (Autor)  
**Terahertz Technologie mit Diodenlasern**

Carsten Brenner

---

**Terahertz Technologie mit Diodenlasern**

---



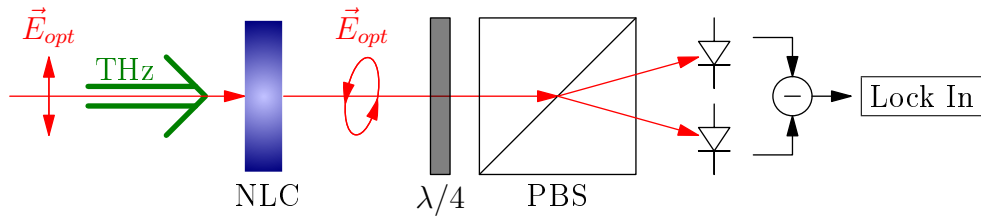
Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/891>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>



**Abb. 2.12:** THz-Detektion mittels Electro Optic Sampling.  
 NLC: Nicht Linearer Kristall, PBS: Polarisierender Beamsplitter

Source Kanals mit der eingestrahnten Frequenz ( $\omega$ ). Wird zusätzlich noch ein Kondensator zwischen Gate und Drain geschaltet, so kommt es zu einem Kurzschluss zwischen Gate und Source für hohe Frequenzen, so dass auch die Spannung ( $U_{DS}$ ) mit der THz-Frequenz moduliert wird. Die Überlagerung der beiden Modulationen führt dann zu einem Gleichstromanteil  $I = G_{DS}U_{DS} \propto \sin^2(\omega)$ . [66, 67]

### Photoleitende Antennen und Kristalle

Sämtliche bisher vorgestellten Detektoren können dabei nur eine Aussage über die Intensität der eingestrahnten THz-Welle machen, nicht jedoch über die Phase. Um die Detektion der Phase zu ermöglichen, ist es erforderlich, das zu detektierende Signal mit dem erzeugenden Signal zu mischen, wie es zum Beispiel mit photoleitenden Antennen in Abschnitt 2.2 beschrieben wurde. Zusätzlich zu der Detektion mit den Antennen ist es jedoch auch möglich, das THz-Signal mit nichtlinearen Kristallen ( $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{ZnTe}$ ,  $\text{GaSe}$ ) zu detektieren. Im Gegensatz zur photoleitenden Detektion gibt es beim sogenannten Electro Optic Sampling (EOS) keine Verzerrung des Signals durch die Frequenzcharakteristik der Empfangsantenne. [68, 69, 70]

Der typische Aufbau für das EOS ist in Abbildung 2.12 gezeigt. Zu diesem Zweck werden das Feld einer THz-Welle und ein linear polarisierter Lichtstrahl in einem nichtlinearen Kristall überlagert. Durch das  $\vec{E}$ -Feld der THz-Welle kommt es über den Pockels Effekt zu einer Änderung der doppelbrechenden Eigenschaften des Kristalls, so dass sich die Eingangspolarisation des Lichtstrahls ändert. Das nun elliptisch polarisierte Licht wird danach in einem polarisierenden Beamsplitter getrennt, so dass die beiden  $\vec{E}$ -Feld Komponenten getrennt voneinander detektiert werden können. Das Differenzsignal beider Detektoren kann dann zum Beispiel mit einem Lock-In-Verstärker gemessen werden und steht in direkten Zusammenhang mit der Amplitude des  $\vec{E}$ -Felds. Durch eine

Änderung der Wegstrecke des optischen Signals kann ein THz-Puls in dieser Weise abgerastert werden. [16]

Im Normalfall wird diese Art der Detektion vor allem bei der Detektion gepulster THz-Strahlung eingesetzt, da die erreichbaren Frequenzen deutlich oberhalb der Grenzfrequenz photoleitender Antennen liegen [71]. Dennoch ist es auch möglich, cw-Strahlung mit diesem Setup zu detektieren und die gleichen Informationen zu erhalten, wie bei dem Homodynempfang mit zwei photoleitenden Antennen [72]. Als weitere Alternative kann die cw-Strahlerzeugung mit dem EOS mittels Kurzpuls laser kombiniert werden, so dass keine Verzögerungsstrecke im Referenzpfad des Lichts benötigt wird. [73]

### **Frequenzselektivität**

Bei den bisherigen Detektoren beruht die Frequenzselektivität in erster Linie auf Resonanzeffekten (siehe Abschnitt 2.3, Seite 22) oder der Mischung mit einem optischen Signal mit fester Phasenbeziehung zur generierten THz-Strahlung (Homodynempfang, EOS). Zusätzlich können auch noch weitere Verfahren verwendet werden, um eine frequenzselektive Messung zu ermöglichen, falls die oben genannten Möglichkeiten nicht zur Verfügung stehen. Dabei kommen im Wesentlichen drei Verfahren in Frage:

**Lokaloszillator:** Wenn die ursprüngliche THz-Quelle nicht mehr für den Mischprozess zur Verfügung steht, bedient man sich eines lokalen Oszillators, der mit der entsprechenden Frequenz schwingt. Die Frequenzselektivität des Systems wird dabei durch die Linienbreite des Lokaloszillators bestimmt. Dies ist zum Beispiel für die Astronomie interessant, wobei hier hohe Anforderungen an die Linienbreite gestellt werden, um eine ausreichend hohe Messgenauigkeit zu erreichen. Dies wird unter anderem dadurch realisiert, dass ein Zwei-Farben-Laser verwendet wird, der an einen Frequenzkamm gekoppelt ist. So lassen sich Linienbreiten der Differenzfrequenz von unter 100kHz erzielen. [37, 74, 75]

**Fourier Transform Interferometer (FTIR):** In einem FTIR kann durch das Mischen des THz-Signals mit sich selbst über Interferenzeffekte ein hochaufgelöstes Spektrum aufgenommen werden. Die Auflösung wird dabei ähnlich wie bei TDS-Systemen über die Weglänge der Verschiebestrecke manipuliert. [52, 76]

**Frequenzselektives Filter:** Als letzte Möglichkeit bietet sich die Verwendung von Bandpassfiltern im THz-Bereich an. Diese bestehen aus Metallfilmen, die aufgrund ihrer Strukturierung als Metamaterialien im THz-Bereich

wirken. Die Kombination mehrerer Schichten zu Fabry-Perot Resonatoren erlaubt so das gezielte Design des Filters für eine bestimmte Wellenlänge. [77, 78]

### Fortgeschrittene Verfahren

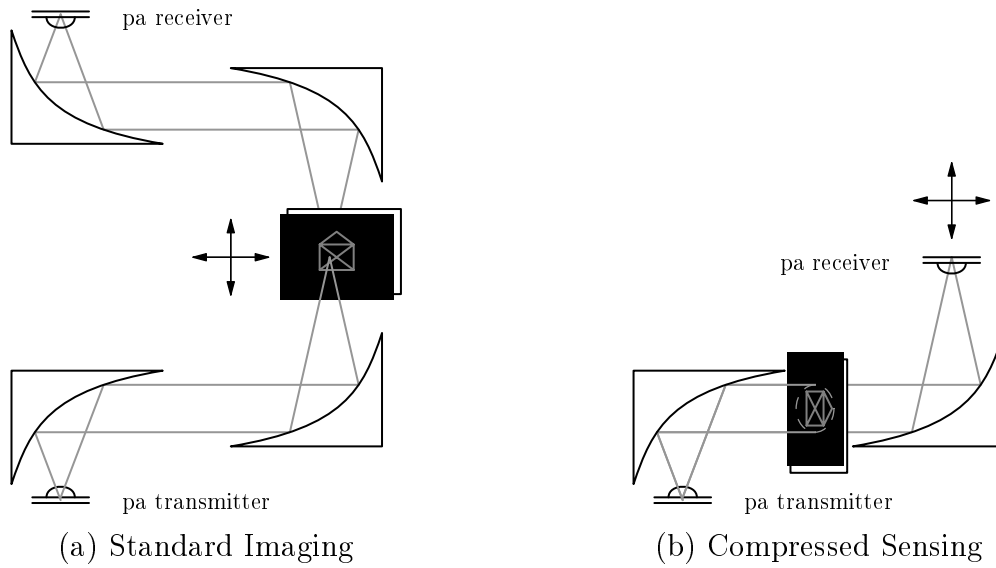
Neben der einfachen Bildgebung über ein reines Abrastern der Probe sowohl im Puls-, als auch im cw-Betrieb ([79, 42]) haben sich die Möglichkeiten zur Bildgebung in den letzten Jahren deutlich erweitert. Während die ersten THz-Videoaufnahmen sich noch auf die Charakterisierung der Strahlform beschränkten ([80, 81]), können mit modernen Microbolometer-Kameras Videos in Echtzeit erstellt werden. Die benötigte THz-Leistung wurde dabei bisher entweder durch Gaslaser oder Quantenkaskadenlaser zur Verfügung gestellt. Diese Möglichkeit der Detektion bedeutet einen großen Fortschritt in Richtung der Massen-anwendung von THz-Prüfsystemen in der Industrie., wobei dies nur im Zusammenhang mit anwendungsfreundlichen Quellen in Frage kommt. [82, 83, 84]

Stehen jedoch keine ausreichend starken Quellen und / oder Detektor-Arrays zur Verfügung, so muss auf andere Ansätze zurückgegriffen werden, um die Aufnahmegeschwindigkeit zu erhöhen. Neben der Verwendung von schnelleren Verzögerungstrecken ist seit kurzer Zeit ein Software-basierter Ansatz möglich, um die aufzunehmende Datenmenge zu reduzieren [85]:

Die Idee beim sogenannten *Compressed Sensing* liegt darin, dass ein Großteil der erhaltenen Information redundant vorhanden ist, so dass eine Reduzierung der Datenmenge die Signalqualität nur unwesentlich verschlechtert. Ähnliches findet umgekehrt bei der Bildkomprimierung mit dem JPEG-Algorithmus statt. Sämtliche Daten eines Bildes liegen vor, die für das Auge wesentlichen Informationen lassen sich allerdings durch einen Bruchteil der Informationen beschreiben.

Der Unterschied in der Aufnahme eines Bildes ist in Abbildung 2.13 dargestellt: Das Standardverfahren der Bildgebung verwendet ein 4f Verfahren, bei dem die zu untersuchende Probe im Zwischenfokus abgerastert wird. Der Detektor befindet sich im hinteren Fokus und nimmt immer nur Informationen zu einem Bildpunkt auf. Im Gegensatz dazu wird beim compressed sensing die gesamte Probe beleuchtet und der Detektor befindet sich in der Fourierebene der Linse / des Parabolspiegels hinter der Probe. Dementsprechend wird nicht ein bestimmter Punkt der Probe detektiert, sondern eine räumliche Frequenz der durch die Probe gebeugten Strahlung.

Ein komplettes Abrastern der Probe ist bei diesem Ansatz nun nicht erforderlich, da die räumlichen Frequenzen des Bildes mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht gleichmäßig verteilt sind. Schon die Aufnahme von 12% der Stützpunkte



**Abb. 2.13:** Vergleich der bildgebenden Verfahren: a) Standard  
b) Compressed Sensing.

ermöglicht eine relativ genaue Rekonstruktion des Ursprungsbildes. Die Schwierigkeit besteht nun darin, eine Matrix von Messpunkten zu finden, die unabhängig von der Probe eine ausreichend hohe Genauigkeit in der Rekonstruktion liefert. Dies ist um so einfacher, je mehr Informationen über die Struktur der Probe bekannt sind. [85, 86, 87]

