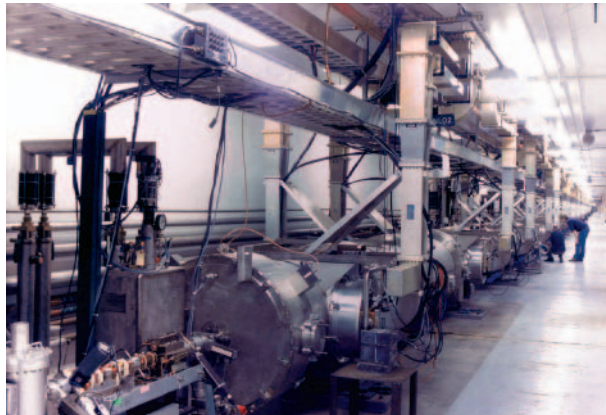


## Von den X- zu den T-Strahlen

*An Linear- oder Kreisbeschleunigern lässt sich intensive Terahertz-Strahlung erzeugen.*

Ähnlich wie Röntgenstrahlen können THz-Strahlen Materie durchleuchten und verdeckte Strukturen sichtbar machen, z. B. in Briefen, Paketen oder bei Gepäck- und Personenkontrollen. THz-Strahlen<sup>1)</sup> liegen im Übergangsbereich zwischen elektronisch erzeugbaren Mikrowellen (Radar) und thermischer Photonenstrahlung (Hohlraumstrahlung). Dazwischen klappte eine Lücke, das so genannte „THz-Gap“. Diese Lücke lässt sich zwar mit breitbandigen thermischen Quellen und seit kurzem auch mit Hilfe von fs-Table-Top-Laser schließen, je-

1) Der Frequenz 1 THz entspricht eine Wellenlänge von 0,3 mm.



Am Linearbeschleuniger des Jefferson Laboratory im amerikanischen Bundesstaat Virginia gelang es, kohärente THz-Strahlung mit bislang unerreichter Intensität zu erzeugen. (Foto: Jefferson Laboratory)

doch liefern beide Methoden keine ausreichende Intensität. Leistungsstarke Quellen wie Freie-Elektronen-Laser oder Dioden sind wiederum zu schmalbandig und damit ungeeignet für spektroskopische Untersuchungen.

Erste Arbeiten über THz-Strahlung wurden bereits vor mehr als hundert Jahren von E. F. Nichols und H. Rubens (Universität Berlin) publiziert [1]. Doch erst seit das Potenzial dieser Strahlung für bildgebende und spektroskopische Verfahren in Festkörperphysik, Biologie und Medizin erkannt wurde, wächst das Interesse an leistungsfähigen THz-Quellen. Am amerikanischen Jefferson Laboratory gelang es G. L. Carr et al. nun an einem Linearbeschleuniger (LINAC) erstmals, THz-Strahlung zu produzieren, die hunderttausendfach intensiver ist als die Strahlung gebräuchlicher Hg-Bogenlampen [2]. Die Forscher erzeugten dabei leistungsstarke und breitbandige THz-Strahlung als Teil des Synchrotron-Strahlungsspektrums.

Relativistische Elektronenpakete werden dazu in Dipolmagneten abgelenkt und emittieren breitbandige Strahlung mit Wellenlängen von der mm- bis in die Angström-Region. Der langwellige Bereich wird dabei je nach Geometrie der Vakuumkammer und der Bahnkrümmung unterdrückt. Die Phasen dieser elektromagnetischen Wellen sind nicht korreliert, und die Energie dieser inkohärenten Strahlung wächst proportional zum Elektronenstrom. Die emittierte THz-Strahlungsleistung ist dann sehr gering.

Wenn die Längen der Elektronenpakete vergleichbar mit den Wellenlängen des langwelligeren Anteils der Synchrotronstrahlung werden, ändert sich das abgestrahlte Spektrum in diesem Bereich dramatisch. Ein Elektronenpaket verhält sich dann wie ein Makroteilchen, und die langwelligeren elektromagnetischen Felder überlagern sich phasengleich. Ihre Stärke wächst proportional und die Energie der Strahlung quadratisch mit der Ladung des Makroteilchens. Da ein Elektronenpaket typischerweise  $10^8$  bis  $10^9$  Elektronen enthält, verstärkt die kohärente Überlagerung der Wellen die sonst eher schwache THz-Strahlung enorm. Diese Möglichkeit zur kohärenten Überlagerung von Synchrotronstrahlung wurde erstmals

1989 in Japan am Tohoku-300-MeV-LINAC nachgewiesen.

Im LINAC am Jefferson Laboratory wurden auf 40 MeV beschleunigte Elektronenpakete, mit einer Pulslänge von weniger als 1 ps und einer Ladung von fast  $10^9$  Elektronen, durch einen Dipol geführt. Die emittierte Synchrotronstrahlung zeigt ein Maximum im THz-Band bei einer Wellenzahl von etwa  $30 \text{ cm}^{-1}$  und eine mittlere zeitliche Leistung von 20 Watt. Dieser Spitzenwert, der um viele Größenordnungen höher liegt als bei jeder anderen bisher gebauten THz-Quelle, ließ sich durch die kurzen und intensiven Elektronenpakete erreichen. Da aber der Elektronenpuls von der Elektronenquelle jedes Mal neu erzeugt wird, kann sich von Puls zu Puls eine Ladungsvariation ergeben, die wiederum zu einer Fluktuation der THz-Intensität führt. Auch die zeitliche Wiederholrate der Pulse kann leicht variieren.

Die Erzeugung brillanter, kohärenter THz-Strahlung ist aber nicht notwendigerweise an einen LINAC gebunden, auch an Elektronenspeicherringen lässt sich diese Strahlung erzeugen. BESSY in Berlin entwickelt dazu seit etwa drei Jahren eine neuartige Technik, die auch auf der kohärenten Überlagerung von Synchrotronstrahlung be-

## KURZGEFASST...

### ■ Leitfähigkeit eines H<sub>2</sub>-Moleküls

Niederländische Physiker um Jan van Ruitenbeek von der U Leiden haben die elektrische Leitfähigkeit eines einzelnen Wasserstoff-Moleküls bestimmt<sup>1)</sup>. Zunächst konnten sie zeigen, dass das H-Molekül eine stabile Verbindung zwischen den atomfeinen Spitzen zweier Platin-Elektroden bilden kann. Der gemessene Wert für die Leitfähigkeit der „Wasserstoff-Brücke“ liegt mit  $0,94 G_0$  nahe bei den theoretischen Vorhersagen ( $G_0 = 2e^2/h$  ist die Quanteneinheit der Leitfähigkeit). Mit ihrer Methode wollen die Leidener Physiker nun auch kompliziertere Moleküle untersuchen. Interessant könnte dies für eine zukünftige „Ein-Teilchen-Elektronik“ sein.

### ■ Neues vom Biphoton

Biphotonen sind Paare verschränkter Photonen, die räumlich nahe beieinander bleiben. Ein japanisches Physiker-Team hat nun gezeigt, dass die de Broglie-Wellenlänge von Biphotonen nur halb so groß ist wie diejenige der einzelnen Photonen<sup>2)</sup>. Dafür nutzten sie die sog. Abwärtskonversion, bei der ein nichtlinearer Kristall ein UV-Photon in zwei infrarote Photonen umwandelt. Mit Hilfe eines Mach-Zehnder-Interferometers brachten die Forscher die beiden miteinander

verschränkten Photonen wieder zusammen und maßen mit Photodetektoren, ob sich die überlagerten Teilwellen verstärken oder abschwächen. Daraus ergab sich die de Broglie-Wellenlänge des Biphotons.

### ■ Bose-Einstein-Kondensation von Cäsium

Bislang entzog sich von den Alkalimetallen allein das Cäsium (Cs) der Bose-Einstein-Kondensation. Ursache dafür waren inelastischen Stöße zwischen den Cs-Atomen, bei denen ein Teil der inneren Energie der Atome in Bewegungsenergie umgewandelt wurde, sodass die Atomwolke vor der Kondensation „explodierte“. Einer Forschergruppe um Rudolf Grimm an der Uni Innsbruck ist es jetzt gelungen, mit einer magnetooptischen Falle ein Bose-Einstein-Kondensat aus etwa 16000 Cs-Atomen bei einer Temperatur von 160 nK zu erzeugen<sup>3)</sup>. Mit einem starken Magnetfeld stellten sie sicher, dass die Atome nur elastisch miteinander kollidierten. Ein Großteil der Atome verdampfte zwar, kühlte aber dadurch die verbleibenden Atome soweit ab, dass diese schließlich zum BEC kondensierten.

1) R. H. M. Smit et al., Nature **419**, 906 (2002)

2) K. Edamatsu et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 215601 (2002)

3) T. Weber et al., Science 10.1126/science.1079699



Dr. Karsten Holl-dack, Dr. Godehard Wüstefeld, Berliner Elektronenspeicher-ring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung mbH (BESSY), Albert-Einstein-Str. 15, 12489 Berlin

ruht. Neu daran ist jedoch, dass in einem Speicherring ein sehr stabiler Strahlungsprozess unter kontrollierten Bedingungen eingestellt werden kann [3]. In einem besonderen Betriebsmodus werden dann  $10^4$ - bis  $10^5$ -fach stärkere kohärente THz-Intensitäten erzeugt als beim vergleichbaren inkohärenten Prozess. Im stabilen Modus wird etwa 1 mW mittlere Leistung in einen Raumwinkel von  $60 \times 40$  mrad emittiert. Da sich hierbei die Elektronenpakete weder in Länge noch in der Form ändern, ist die Strahlung zeitlich und räumlich stabil und sehr gut für spektroskopische Experimente geeignet.

Ein erstes Experiment mit der bei BESSY erzeugten THz-Strahlung wurde kürzlich erfolgreich am Infrarot-Messplatz IRIS [4] abgeschlossen. Dabei wurden Eigenschaften von Hochtemperatur-Supraleitern untersucht, die wesentlich zum Verständnis der Supraleitung sind, jedoch bisher der Messung nicht zugänglich waren.

Erhöht man die Zahl der Elektronen pro Paket, wächst zwar die THz-Intensität, doch bei Überschreiten eines Schwellenstroms führt dies zu einem instabilen Speichermodus der Elektronen und damit zu stark schwankenden („bursting“) THz-Intensitäten. An anderen Speicherringen, z. B. an der Advanced Light Source (ALS) in Berkeley (USA), konnten bisher nur „bursting“-Intensitäten erzeugt werden, ein Hinweis darauf, dass Länge und Form der Elektronenpakete nicht konstant sind [5]. Diese Strahlung eignet sich deshalb nicht für spektroskopische Experimente.

Die Arbeiten von Carr et al. sind ein Meilenstein für die Bereitstellung breitbandiger, intensiver THz-Strahlung. Weitere solche Quellen werden durch LINACs für Freielektronen-Laser zur Verfügung stehen (z.B. BESSY, Berlin, DESY, Hamburg, ELBE, Rossendorf) [6]. Während LINAC-basierte Quellen intensiver sind, ist die THz-Strahlung von Speicherringen geeigneter für spektroskopische Untersuchungen. An der ALS wird derzeit eigens ein Speicherring für die Erzeugung kohärenter THz-Strahlung geplant. Mit beiden Wegen lässt sich das „THz-Gap“ überwinden, und so sollte in der nahen Zukunft ausreichend THz-Strahlung für neue Einsatzfelder verfügbar sein.

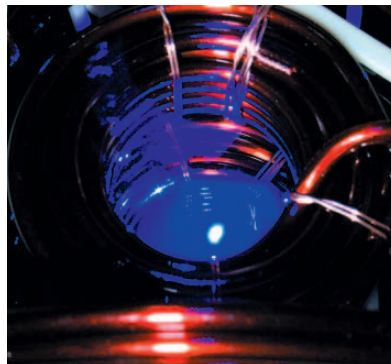
KARSTEN HOLLDAK UND  
GODEHARD WÜSTEFELD

- [1] H. Rubens, E.F. Nichols, Phys. Rev. **4**, 314 (1897)
- [2] G. L. Carr et al., Nature **420**, 153 (2002)
- [3] M. Abo-Bakr et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 254801 (2002)
- [4] U. Schade et al., Rev. Sci. Instr. **73**(3), 1568 (2002)
- [5] J. M. Byrd et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 224801 (2002)
- [6] B. Faarz et al., DESY, FIR Coherent Radiation Workshop, Hamburg (2000)

## Kalzium als Taktgeber

**Atomuhren mit kalten Kalzium-Atomen können die Genauigkeit von Cäsium-Atomuhren innerhalb deutlich kürzerer Messzeit erreichen.**

Von den ausgefeilten Pendeluhr im 18. Jahrhundert, mit denen sich erstmals die geographische Länge auf See bestimmen ließ, bis zu den heutigen Cäsium-Atomuhren beruht der Fortschritt bei Zeit- und Frequenzstandards auf immer höheren Schwingungsfrequenzen: Höhere Frequenzen erlauben es, Zeitintervalle immer feiner zu unterteilen und damit die Zeit immer genauer



In dem Experiment zur Kalzium-Uhr befinden sich ca.  $10^8$  Kalzium-Atome in einer magneto-optischen Falle. Der hellblaue Fleck zeigt die Fluoreszenz der Atome (Foto: PTB)

zu messen. Die heute zur Realisierung der Sekunde herangezogenen Atomuhren benutzen einen Hyperfein-Übergang im Grundzustand von Cäsium als Taktgeber, bei einer Übergangsfrequenz von 9,2 GHz. Mit sog. Cäsium-Fontänenuhren werden dabei mittlerweile relative Genauigkeiten im Bereich von  $10^{-15}$  erzielt – dies entspricht einer Gangabweichung von 1 Sekunde in 30 Millionen Jahren. Um die Übergangsfrequenz mit einer derart geringen Unsicherheit zu bestimmen, muss das Anregungssignal allerdings über viele Stunden gemittelt werden. Jetzt hat eine Gruppe um

Jürgen Helmcke und Fritz Riehle an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig gezeigt [1], wie sich eine solche Genauigkeit mit einer um mehrere Größenordnungen höher liegenden Schwingungsfrequenz schon in erheblich kürzerer Zeit erzielen lässt, in Zukunft womöglich innerhalb des Bruchteils einer Sekunde.

Frequenzstandards werden einerseits durch ihre Genauigkeit, d. h. ihre systematische Unsicherheit, andererseits durch ihre Stabilität charakterisiert [2]. Die Genauigkeit beschreibt die Fehlergrenzen, innerhalb derer die Ausgangsfrequenz des Standards mit der ungestörten Übergangsfrequenz der verwendeten Atome übereinstimmt, die Stabilität hingegen die Schwankungen der Ausgangsfrequenz innerhalb eines gegebenen Zeitintervalls. Eine hohe Stabilität lässt sich insbesondere mit einer hohen atomaren Referenzfrequenz, einer schmalen Linienbreite des Übergangs, einem hohen Signal-zu-Rausch-Verhältnis bzw. einer langen Mittelungszeit  $\tau$  erzielen. Im Fall von quantenlimitiertem Rauschen nimmt die sog. Allan-Varianz, ein Maß für die Stabilität, mit  $\tau^{-1/2}$  ab, jedoch nur solange, bis sich innerhalb der Mittelungszeit zeitlich variable systematische Verschiebungen der Übergangsfrequenz bemerkbar machen, die auch die Genauigkeit begrenzen. Bei den im Experiment an der PTB verwendeten Kalziumatomen wird der  $^1S_0$ - $^3P_1$ -Übergang bei einer Wellenlänge von 657 nm (natürliche Linienbreite  $\gamma/2\pi = 320$  Hz) als Referenz verwendet. Die Übergangsfrequenz liegt hier um etwa einen Faktor  $10^5$  höher als bei den Cäsium-Atomuhren. Damit lässt sich prinzipiell – auch bei einer rund 1000-fach breiteren Resonanz – eine ähnliche Stabilität wie die des Mikrowellenstandards schon in sehr viel kürzerer Mittelungszeit erhalten. Bisher waren im Experiment die Stabilität und Genauigkeit allerdings durch die verbleibende Geschwindigkeit der Kalziumatome begrenzt. Durch eine neue Kühl- und Speichertechnik unter Verwendung des schmalbandigen  $^1S_0$ - $^3P_1$ -Übergangs ist es der Gruppe an der PTB jedoch kürzlich gelungen, die Temperatur der Atome um einen Faktor 200 zu reduzieren [3].

In dem Experiment werden Kalziumatome in einer magneto-optischen Falle (MOF) gespeichert und durch Doppler-Kühlung auf einige

Dr. habil. Joachim von Zanthier, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 München