

Vom Spektrophon zur OA-Tomographie

Christoph Haisch, Thomas Schmid, Reinhard Nießner

Wie zahlreiche andere spektroskopische Techniken, die heutzutage unter der Verwendung von Lasern eingesetzt werden, reicht der Ursprung der optoakustischen (OA) oder photoakustischen Spektroskopie wesentlich weiter zurück als die Erfindung des Lasers im Jahre 1960. Bereits 1881 schlug A. G. Bell sein „Spektrophon“ vor (Abbildung 1), „for the purpose of the examination of the absorption spectra of bodies in those portions of the spectrum that are invisible“ [1]. Die Grundlagen für dieses „Gerät zur Absorptionsmessung von unsichtbarer Strahlung“ stammt aus seinen Arbeiten zur kabellosen Übertragung von Schall. Über mehr als ein halbes Jahrhundert wurde der OA Effekt weder zur Schallübertragung noch für spektroskopische Messungen in größerem Rahmen eingesetzt. Mitte der 70er Jahre wurden von A. Rosencwaig und A. Gersho die theoretischen Grundlagen des OA Effekts in der nach ihnen benannten RG-Theorie beschrieben und damit die Grundstein für eine breitere Anwendung dieser Technik gelegt [2].

Die optothermische (OT) Spektroskopie kennt zahlreiche verschiedene Variationen für die Messung von Absorptionen in Festkörpern, Gasen und Flüssigkeiten, die alle auf einem grundlegenden Prinzip basieren (siehe Abbildung 2): Optische Strahlung wird in der jeweiligen Probe absorbiert und führt über nichtstrahlende Relaxation zu einer Änderung des thermischen Zustandes dieser Probe. Die Messgröße ist dann die Änderung von Druck, Temperatur oder Dichte. In diesem Sinne kann die OT-Spektroskopie als indirekte Messmethode für die Absorption

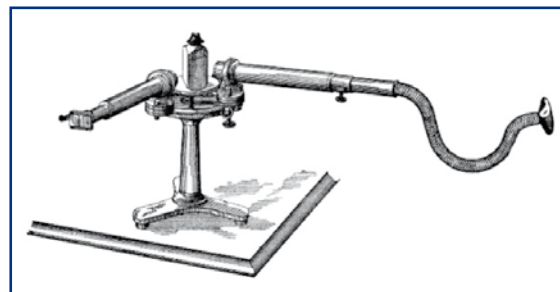


Abbildung 1: Das „Spektrophon“ von Alexander Graham Bell aus dem Jahre 1881.

betrachtet werden. Allerdings ermöglicht auch eine klassische Absorptionsmessung mittels UV-Vis-Spektrometer keine direkte Erfassung der absorbierten Energie; die Messgröße ist hier die durch die Probe transmittierte Energie. Die absorbierte Energie wird berechnet aus dem Quotienten zwischen eingestrahelter und transmittierter Energie. Wenn also in der Probe Licht zusätzlich gestreut wird und somit nicht in Transmissionsrichtung erfasst werden kann, wird das Ergebnis bei einer klassischen Transmissionsmessung verfälscht. Bei der OT Absorptionsmessung hingegen trägt nur die tatsächlich in der Probe deponierte Energie zur Erwärmung und damit zu dem Signal bei. Lichtstreuung und Reflexion haben keinen direkten Einfluss auf das Signal.

Wie bereits erwähnt gibt es zahlreiche Techniken, um die Änderung des thermischen Zustands der Probe zu erfassen. Die direkte Vorgehensweise ist die Messung der Temperaturänderung an der Probenoberfläche. Wenn diese Messung mittels Thermoelement auf der Probenoberfläche erfolgt, wird die Technik als thermometrisch bezeichnet. Eine andere Möglichkeit der Detektion der lokalen Erwärmung ist die Messung der von der Probenoberfläche emittierten Wärmestrahlung über eine infrarotempfindliche Kamera. Im Vergleich zur thermometrischen Messung hat diese Vorgehensweise mehrere Vorteile. Die Messung kann berührungslos erfolgen, und über die Kamera ist die simultane Erfassung eines größeren Oberflächenbereichs möglich.

Weiter verbreitet als diese thermischen Erfassungsmethoden sind indirekte Messtechniken. Die lokale Erwärmung infolge der eingestrahelten Energie führt zu einer lokalen Expansion, die sich als lokale Druckerhöhung in der Probe zeigt und an der Probenoberfläche detektiert werden kann. Optothermische Verfahren, die auf diesem Prinzip



Haisch



Schmid



Nießner

Die Autoren

Dr. Christoph Haisch leitet als Physiker die neu aufgebaute Gruppe für angewandte Optoakustik am Institut für Wasserchemie der Technischen Universität München. Nach Aufhalten als Gastwissenschaftler in Paris und Berlin kehrte er im Jahr 2001 an die TU München zurück, wo er bereits bis 1998 als Doktorand tätig war. **Dr. Thomas Schmid** ist Diplom-Chemiker und befasst sich seit Ende 1999 am Institut für Wasserchemie mit der optoakustischen Spektroskopie an Flüssigkeiten und Feststoffen. Im Oktober 2003 hat er seine Promotion zu diesem Thema erfolgreich abgeschlossen. **Prof. Dr. Reinhard Nießner** ist Direktor des Instituts für Wasserchemie und Chemische Balneologie und steht dem Lehrstuhl für Hydrogeologie, Hydrochemie und Umweltanalytik vor. Die Arbeitsschwerpunkte des Instituts reichen von klassischer Wasseranalytik über Aerosol- und Luftchemie bis zur Laserspektroskopie. Seit vielen Jahren gilt sein Interesse den verschiedensten Aspekten der optoakustischen Spektroskopie.

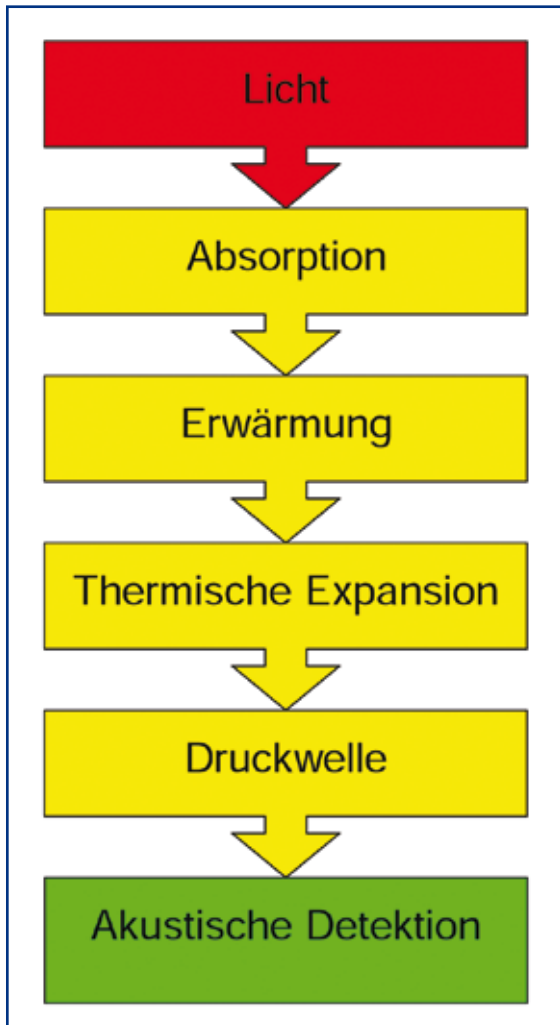


Abbildung 2: Das Prinzip der optothermischen Spektroskopie.

basieren, werden als optoakustische (OA) oder photoakustische Verfahren bezeichnet.

Der Grund für diese Bezeichnung liegt in der technischen Realisierung einer solchen Messung. Die Probe wird nicht mit einer kontinuierlichen Lichtquelle bestrahlt, sondern mit moduliertem Licht. Die resultierende Erwärmung und nachfolgende Ausdehnung ist damit ebenfalls moduliert, d.h. es findet eine Ausdehnung und anschließend eine Kontraktion statt. Die daraus resultierende Druckwelle kann als Schallwelle betrachtet und mit Mikrofonen detektiert werden. Auch wenn die Anregung mittels einzelner Laserpulse und nicht über eine modulierte Lichtquelle erfolgt, und damit ein einzelner Druckstoß und keine Welle im engeren Sinne erzeugt wird, spricht man von OA-Spektroskopie. Die Detektion erfolgt dann meist über piezoelektrische Druckaufnehmer. Eine gepulste Anregung wird im Allgemeinen zur Absorptionsanalyse von Festkörpern und Flüssigkeiten eingesetzt. Verschiedene Ausführungen und Anwendungen der OA-Spektroskopie werden im Folgenden an Beispielen vorgestellt.

Quantifizierung von Russ in motorischen Abgasen

Angesichts des zunehmenden Automobil- und insbesondere LKW-Verkehrs ist die Notwendigkeit zur Reduktion der Schadstoffemission von Verbrennungsmotoren jedermann offensichtlich. Die kommenden Generationen von Dieselmotoren und entsprechenden Abgasnachbehandlungssystemen emittieren signifikant weniger klima- und gesundheitsschädliche Russpartikel als derzeit gängige Modelle. Insbesondere während kontinuierlichem Teillastbetrieb liegen die Konzentrationen im Bereich von unter $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Allerdings treten während Lastwechseln für wenige Sekunden deutlich höhere Konzentrationen auf. Daraus ergeben sich verschiedene Anforderungen an ein Partikelmesssystem, die von einem auf OA-Absorption basierendem System erfüllt werden können und beispielhaft für eine Vielzahl von anderen Aufgabenstellungen in der Gasmesstechnik betrachtet werden können. Ein für die Motorenentwicklung und -optimierung geeignetes System muss empfindlich genug sein, um auch die geringen Konzentrationen im Teillastbetrieb und Leerlauf sowie hinter einer Abgasnachbehandlung messen zu können. Im günstigsten Fall sollten Messungen bis zur Umgebungsbelastung im städtischen Raum möglich sein. Andererseits ist ei-



Abbildung 3: Optoakustisches System zur Rußmessung in motorischem Abgas.

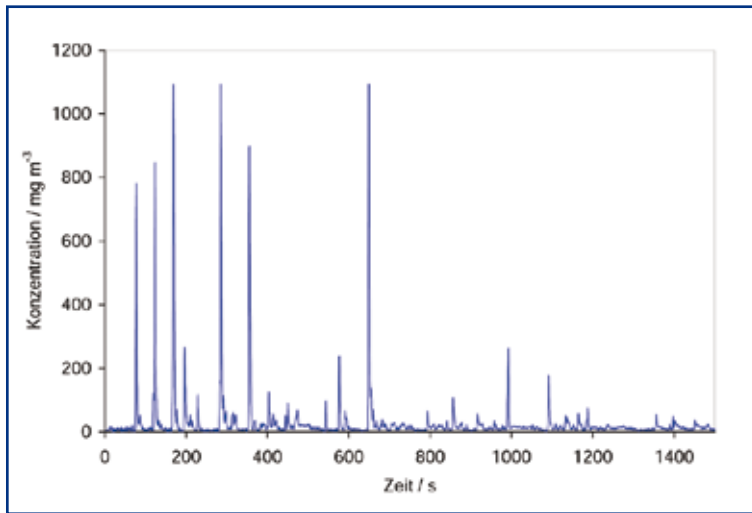
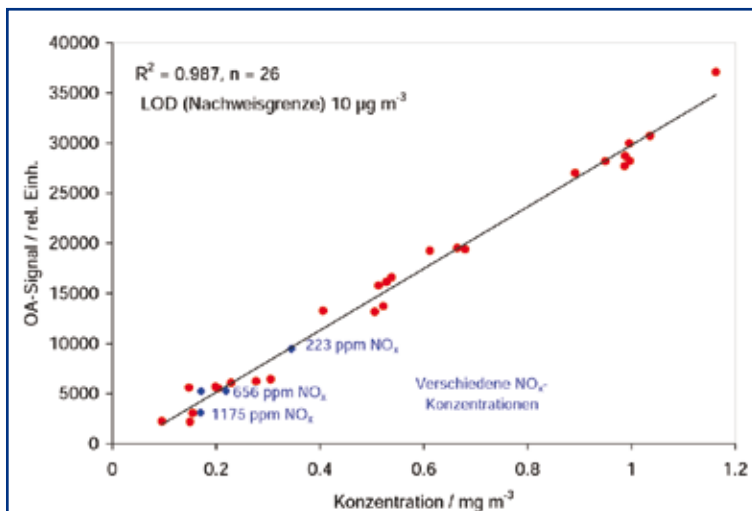


Abbildung 5: Korrelation zwischen PASS-Signal und der thermochemisch gemessenen Masse an elementarem Kohlenstoff.

ne Dynamik von mehreren Größenordnungen notwendig, um auch die während Lastwechseln auftretenden Spitzenkonzentrationen quantitativ erfassen zu können. Nachdem diese Spitzen nur sehr kurz auftreten, ist eine Zeitauflösung im Sekundenbereich oder besser gefordert. Unempfindlichkeit gegenüber anderen Partikeln außer Ruß und eventuellen gasförmigen Anteilen im Abgas sind ebenso eine selbstverständliche Anforderung an ein analytisches Messsystem, das für den Routinebetrieb zu entwickeln ist.

In Abbildung 3 ist der Aufbau eines OA-Systems zur Rußmessung in motorischem Abgas (PASS, *photoacoustic soot sensor*) dargestellt. Dieser Aufbau dient als Beispiel für alle auf OA-Spektroskopie basierenden Gasanalysatoren, welche alle aus vergleichbaren Komponenten bestehen, die an die jeweiligen Anforderungen angepasst sind. Diese Komponenten finden sich auch alle bereits in dem von A. G. Bell vorgeschlagenen „Spektrophon“. Statt Sonnenlicht dient als Lichtquelle heutzutage ein Laser, der Licht der gewünschten Absorptionswellenlänge emittiert. Der Laserstrahl wird entweder, wie bereits bei Bell, mittels eines mechanischen Zerhackers (*chopper*),

Abbildung 6: PASS-Signal eines transienten Fahrzyklus.



oder elektrooptisch moduliert, um eine Druckwelle und nicht eine kontinuierliche Erwärmung und damit Volumenzunahme zu erreichen. Das Hörrohr in Kombination mit dem menschlichen Ohr wird heutzutage durch ein Mikrophon ersetzt, dessen Signal elektronisch verstärkt werden kann. Trotz dieser sehr empfindlichen Mikrophontechnik lässt sich ein solches System sehr unempfindlich gegen Außenlärm gestalten. Zum einen findet die Absorption in einer geschlossenen Zelle statt, die durch ihre Gestaltung Außengeräusche sehr effizient abschirmt. Zum anderen befindet sich in dieser Zelle ein akustischer Resonator, in dem die Absorption stattfindet und der die dabei erzeugte Schallwelle gezielt frequenzabhängig verstärkt, während andere Frequenzen durch akustische Bandpassfilter eliminiert werden. Durch die Gestaltung des Resonators sind Signalverstärkungen bis zu einem Faktor 1000 erreichbar und werden technisch auch für verschiedene Anwendungen realisiert. Je größer die Verstärkung ist, desto schmäler ist das Resonanzprofil, das angibt, in welchem Bereich um die Resonanzfrequenz herum welche Verstärkung wirkt. Nachdem die Resonanzfrequenz von der Schallgeschwindigkeit in der Zelle abhängt, kann bei einer sehr schmalen Resonanzfrequenz eine geringfügige Änderung der Schallgeschwindigkeit, etwa durch eine Änderung der Gastemperatur, zu einer signifikanten Änderung der Verstärkung und damit des Signals führen. Im Fall der Rußdetektion in motorischen Abgasen wird daher ein Resonator mit einem mäßigen Verstärkungsfaktor von etwa 20 eingesetzt. Damit ist das System wenig anfällig gegen Variationen der Schallgeschwindigkeit, die etwa durch Schwankungen der Abgastemperatur oder des Feuchtigkeitsgehaltes hervorgerufen werden können. Zudem ist die Messzelle auf 52° beheizt, um die Kondensation von Wasserdampf an den Zelleninnenwänden zu vermeiden und die Gastemperatur weitgehend konstant zu halten. Die elektronische Aufnahme des Signals erfolgt über einen *lock-in*-Verstärker, der als extrem schmalbandiger Filter wirkt und nur Signale mit der Modulationsfrequenz der Lichtquelle aufnimmt und verstärkt.

Vervollständigt wird der PASS durch das Gasführungssystem. Das Abgas wird von der Entnahmestelle entweder direkt oder über einen Filter in die Messzelle gesaugt. Durch die Messung hinter dem Filter kann das Untergrundsignal bestimmt werden, das beispielsweise von der Absorption von verschmutzten Fenstern stammen kann. Hinter der Zelle wird das Gas gefiltert und der Gasfluss über einen Durchflussregler kontrolliert. Der Gasfluss wird von einer Vakuumpumpe erzeugt, hinter der das Gas entweder zurückgeführt werden kann in das Abluftsystem oder direkt in die Abluft geleitet wird. Das ganze gasführende System kann auf 50 °C geheizt werden, um Kondensation von Wasserdampf zu verhindern.

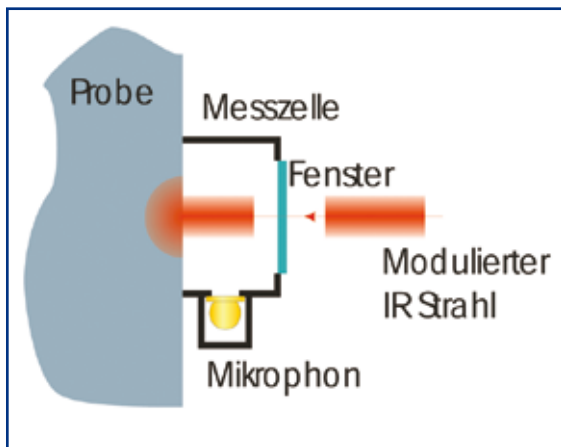


Abbildung 4: OA-Spektroskopie an Feststoffproben: Die Messzelle liegt luftdicht auf der Feststoffoberfläche auf.

Für die Einführung eines neuen Messsystems ist es von großer Bedeutung, dass die damit erzielten Ergebnisse mit den bisher eingesetzten Methoden korrelierbar sind. In Abbildung 5 ist die Korrelation zwischen dem PASS-Signal und der thermochemisch gemessenen Masse an elementarem Kohlenstoff auf Filtern dargestellt, die parallel zu den PASS-Messungen beladen wurden. Offensichtlich ist über einen großen Konzentrationsbereich ein linearer Zusammenhang gegeben. Tatsächlich beträgt der lineare dynamische Bereich der PASS-Messung mehr als drei Größenordnungen. Mit klassischer Absorptionsmessung sind solche Dynamikbereiche nicht möglich.

Ein weiteres wichtiges Spezifikum des PASS ist die Zeitauflösung. In Abbildung 6 ist das PASS-Signal eines transienten Fahrzyklus (ETC, *european transient cycle*) dargestellt. Mit solchen transienten Zyklen werden für die Motorenentwicklung und -zulassung Fahrten wie Stadt-, Überland- und Autobahnfahrten simuliert. Offensichtlich sind extreme Emissionsspitzen jeweils nur für sehr kurze Zeiten während der Lastwechsel zu beobachten.

Der PASS-Sensor weist eine Nachweisgrenze von weniger als $10 \mu\text{g}$ Russ pro Kubikmeter Abgas bei einer Zeitauflösung von etwa 1 Hz auf. Querempfindlichkeiten gegen gasförmige Absorber wurden durch die Auswahl der Laserwellenlänge im Spektralbereich von 800 nm weitgehend ausgeschlossen. Auch partikuläre Bestandteile des Abgases, insbesondere Tröpfchen, tragen nicht zum Signal bei, da sie das Laserlicht nicht absorbieren sondern streuen. Bei einer klassischen Absorptionsmessung, bei der die Messgröße die durch das Probenvolumen transmittierte Energie ist, führt Lichtstreuung zu Artefakten. Bei einer OA Messung trägt nur der Anteil zur Signalbildung bei, der wirklich absorbiert wird und damit zur Erwärmung des Probenvolumens beiträgt.

IR-Absorptionsmessungen von opaken Feststoffen

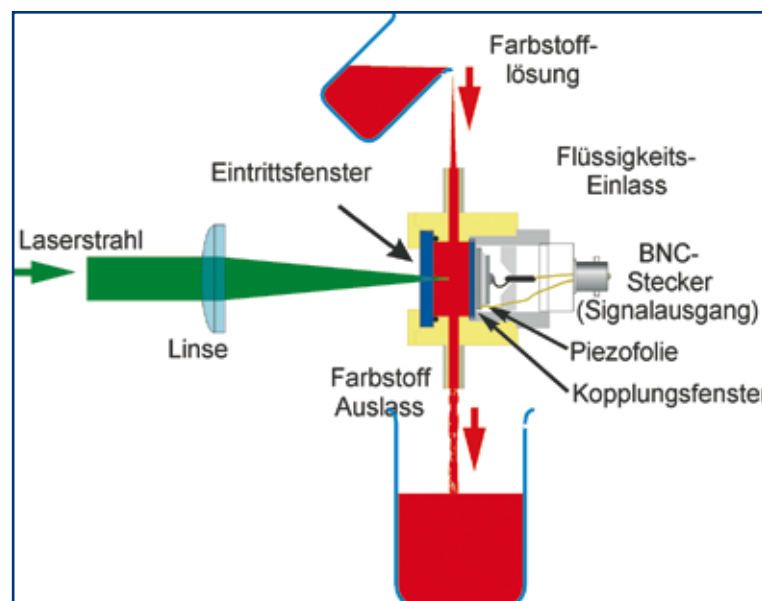
Die Infrarot-Spektroskopie an stark absorbierenden und opaken Feststoffproben ist ein Gebiet, in dem die OA Spektroskopie bereits routinemäßig eingesetzt wird. Beinahe alle Hersteller von FT-IR Spektrometern und entsprechendem Zubehör bieten Messzellen für diese Anwendung an. Das zugrunde liegende Prinzip dieser Messungen ist, analog zu den oben beschriebenen Messungen an Gasen, die modulierte Absorption und Erwärmung der Probe. Der IR-Strahl des IR-Spektrometers wird moduliert und auf die Probenoberfläche gerichtet. Die Absorption der Strahlung führt auch hier zur Erwärmung der Probe.

Anders als im Gas wird aber im Festkörper nicht die Ausdehnung infolge dieser Erwärmung direkt erfasst, da der Wärmeausdehnungskoeffizient von Festkörpern und damit das messbare Signal wesentlich kleiner ist als bei Gasen. Stattdessen wird auf die Probenoberfläche eine Messzelle luftdicht aufgesetzt, durch die auch der Lichtstrahl auf die Probenoberfläche gerichtet wird (siehe Abbildung 4). Die Erwärmung der Probenoberfläche führt zu einer Erwärmung des darüber befindlichen und in der Zelle eingeschlossenen Gasvolumens. In Analogie zur Gas- und Aerosolanalyse wird die durch Ausdehnung hervorgerufene Druckwelle über ein Mikrophon in der Messzelle erfasst und über einen *lock-in*-Verstärker verarbeitet.

Mögliche Anwendungen dieser Technik reichen von materialwissenschaftlichen Untersuchungen über Messungen an Textilien und Faserstoffen oder fossilen Brennstoffen bis zur Lebensmittelkontrolle. Ein wesentlicher Vorteil dieses Messverfahrens ist neben der Möglichkeit einer Kopplung mit herkömmlichen FTIR-Spektrometern das weitgehende Fehlen von Probenvorbereitung.



Abbildung 7: OA-Absorptionsspektroskopie an Textil-Färbeflotten.



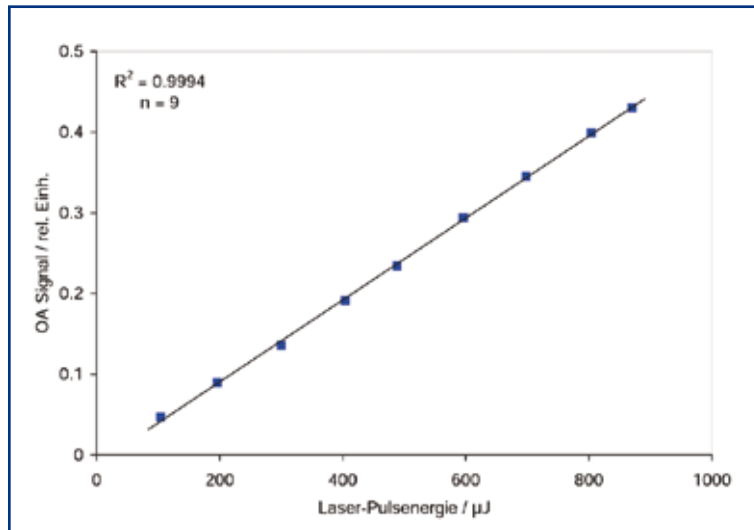
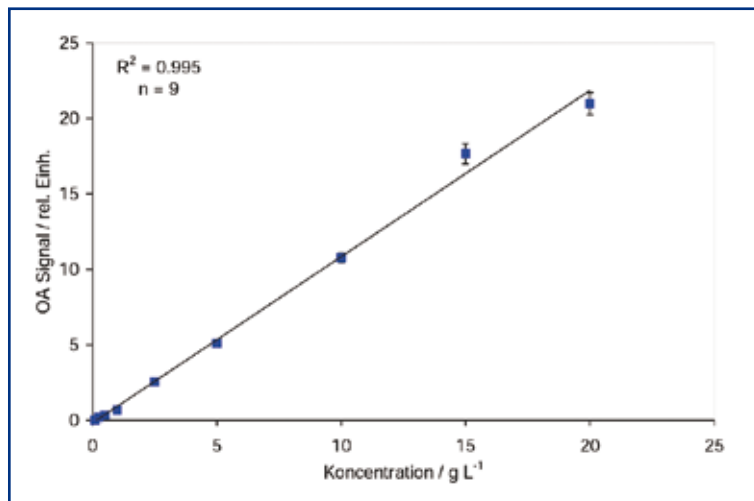


Abbildung 8:
Zusammenhang
zwischen
Laserenergie und
OA-Signal.

OA-Analyse von stark absorbierenden Flüssigkeiten

Transmissionsmessungen von stark absorbierenden Flüssigkeiten sind ohne starke Verdünnung der Lösung mit den üblichen Absorptionsspektrometern kaum möglich. Ein typisches Beispiel für solche stark absorbierende Lösungen sind Textil-Färbeflotter, die Konzentrationen von über 5 g L⁻¹ und Absorptionskoeffizienten von >103 cm⁻¹ aufweisen. Solche Lösungen wirken etwa in 1-cm-Küvetten vollständig undurchsichtig; transmissionsbasierte Absorptionsmessungen sind daher nicht durchführbar. Verdünnen der Lösungen ist zwar prinzipiell möglich, aber für eine kontinuierliche Prozessmesstechnik kaum praktikabel. Zudem nehmen Färbeflotter während eines Färbvorganges Flusen von den Textilien auf, die durch Lichtstreuung eine Transmissionsmessung verfälschen würden. Damit wäre neben der Verdünnung auch noch eine Filtration der Lösung vor der Messung notwendig. OA-Absorptionsspektroskopie bietet eine Alternative, die Messungen ohne jegliche Probenvorbereitung im Durchfluss erlaubt.

Abbildung 9:
Zusammenhang
zwischen der
Absorption der
Lösung und dem
OA-Signal.



Die optische Anregung erfolgt in diesem Fall mittels einer gepulsten Laserlichtquelle, die auf die jeweilige Absorptionswellenlänge eingestellt wird. Um spektral aufgelöste Informationen zu erzielen, bieten sich dabei durchstimmbare Laser wie Farbstofflaser oder Optisch-Parametrische Oszillatoren (OPO) an. Besonders vorteilhaft in Hinblick auf Anschaffungs- und Betriebskosten sowie auf Wartungsaufwand ist eine Kombination von einem Stickstofflaser mit einem Farbstofflasermodul. Die notwendigen Pulsenergien von 0.5 – 1 mJ können damit erreicht werden und verschiedene Laserwellenlängen sind schnell und einfach auch automatisiert auswählbar. Wenn höhere Pulsenergien von mehreren mJ zur Verfügung stehen, besteht die Möglichkeit, die Laserpulse über Lichtwellenleiter an verschiedene Stellen in einem Färbeprozess zu übertragen und diese sequentiell oder parallel zu überwachen.

Der direkt oder via Lichtwellenleiter übertragene Laserpuls wird über eine Linse in eine zylindrische Durchflusszelle fokussiert (siehe Abbildung 7). Diese Zelle hat mit einem Durchmesser von 8 Millimeter und einer Tiefe von 10 Millimeter ein Volumen von ca. 0.5 cm³. Einlass und Auslass der Zelle liegen an entgegengesetzten Seiten, so dass die Probenlösung rechtwinklig zum einfallenden Laserstrahl durch die Zelle strömt. Das optoakustische Signal wird von einem Hydrophon erfasst, das gegenüber dem Eintrittsfenster installiert ist. Diese Anordnung hat sich als besonders vorteilhaft für die Untersuchung von stark absorbierenden Flüssigkeiten erwiesen. Durch die starke Absorption und damit die geringe Eindringtiefe wird eine Druckwelle erzeugt, die sich als Kugelwelle annähern lässt, deren Zentrum im Fokus des eingestrahlt Laserlichts liegt. Soll die OA Spektroskopie zur Untersuchung von schwach absorbierenden Flüssigkeiten eingesetzt werden, ist eine rechtwinklige Anordnung von Laserstrahl und Detektion sinnvoll, weil der Lichtstrahl die Messküvette vollständig durchstrahlt und sich eine Zylinderwelle um den Laserstrahl herum ausbildet.

Das Hydrophon besteht aus einem Eintrittsfenster, das mit einer leitfähigen Oberfläche beschichtet ist. Diese Schicht dient als Elektrode für eine piezoelektrische Folie, die auf das Eintrittsfenster aufgeklebt ist. Die piezoelektrische Folie aus PVDF (Polivinylidenfluorid) hat eine Stärke von 25 Mikrometer und einen Durchmesser von 5 Millimeter. Auf der Rückseite der Folie befindet sich die zweite Elektrode, die mit dem Innenleiter der coaxialen Signalleitung verbunden ist. Das Hydrophon, das einen Außendurchmesser von 10 Millimeter hat, ist zur elektromagnetischen Abschirmung in einem Metallgehäuse untergebracht und mit einer BNC-Buchse versehen, über die das Signal zu einem elektronischen Vorverstärker übertragen wird. Die Datenerfassung kann entweder über ein Digitales Speicheroszilloskop (DSO) oder eine schnelle (> 100 MHz) Analog-Digital-Wandlerkarte direkt im Auswertecomputer erfolgen.



Abbildung 10: Modellsystem aus einem Paket von vier 1 mm dicken Folien.

Allen OA Methoden ist gemeinsam, dass die erzielten Signalintensitäten in einem weiten Bereich direkt proportional sowohl zur eingestrahlten Energie als auch zur Absorption sind. Der Grund dafür ist, dass beide Einflussgrößen unmittelbar die deponierte Energie beeinflussen. Der lineare Zusammenhang zwischen Laserenergie und OA-Signal ist in Abbildung 8 zu sehen, während Abbildung 9 den Zusammenhang zwischen der Absorption der Lösung und dem OA-Signal, und damit die Kalibrierung des Systems, illustriert.

Eine weitere Anwendung eines solchen Messsystems ist z.B. die Bestimmung des Zuckergehaltes von Fruchtsäften und Süßgetränken. Auch hier ist die Möglichkeit, verlässliche Messungen in Gegenwart von lichtstreuenden Partikeln in der Lösung durchführen zu können von Bedeutung. Die Quantifizierung von Zucker in Flüssigkeiten wird nicht mit sichtbaren Laserwellenlängen durchgeführt, sondern über mehrere spezifische Zuckerabsorptionslinien im Nahen IR.

Tiefenaufgelöste OA Spektroskopie

Neben der Möglichkeit, Absorptionsmessungen an stark absorbierenden beziehungsweise opaken sowie an streuenden Proben vorzunehmen, bietet die OA-Spektroskopie die Möglichkeit, tiefenaufgelöste Absorptionsmessungen in Festkörpern vorzunehmen. Die durch die Absorption erzeugte Druckwelle breitet sich mit der entsprechenden Schallgeschwindigkeit in dem jeweiligen Medium aus. Damit kann aus der Verzögerung zwischen dem Laserpuls und der Detektion der Druckwelle an der Probenoberfläche über die Schallgeschwindigkeit die Tiefe berechnet werden, in welcher die Absorption stattfand. Die Tiefenauflösung ist dabei durch die Eindringtiefe des Lichts beschränkt. Vier verschiedenfarbige, aufeinander gelegte Transparentfolien von jeweils 1 Millimeter Dicke dienen im Folgenden als einfaches Modellsystem. Die Folien wurden in der Reihenfolge Gelb, Rot, Grün und Blau aufeinander auf einen OA-Sensor gelegt. Wie in Abbildung 10 graphisch angedeutet, weist das Paket der vier Folien in Transmission eine unbestimmte graue Mischfarbe auf, so dass mit einem Transmissions-

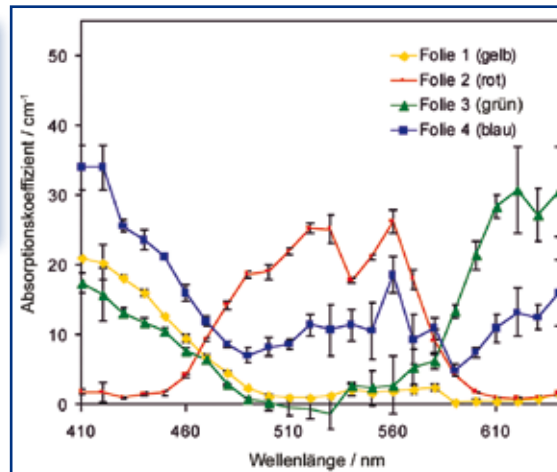


Abbildung 12: Absorptionsspektren der verschiedenen Folien.

spektrometer keine sinnvolle Messung möglich ist. Zur Anregung wurde ein durchstimmbares OPO-System verwendet, die Detektion erfolgte mit einem Drucksensor ähnlich dem Hydrophon. In Abbildung 11 ist das OA Signal bei verschiedenen Wellenlängen gegenüber der Zeitverzögerung bezüglich des Laserpulses dargestellt. In verschiedenen Tiefen werden die verschiedenen Wellenlängen offensichtlich stark unterschiedlich absorbiert und erzeugen damit unterschiedlich intensive OA Signale. Die Absorptionsspektren der verschiedenen Folien lassen sich daraus ebenso rekonstruieren wie die Dicke der einzelnen Folien (siehe Abbildung 12).

In derselben Weise wie oben gezeigt lassen sich auch räumlich inhomogene Verteilungen von Absorbieren rekonstruieren. Dazu wird entweder der Drucksensor über die Probe bewegt oder ein Array von Drucksensoren eingesetzt. Ein solches System eignet sich dann zur OA-Tomographie, etwa für medizinische Anwendungen.

Literatur

1. A.G. Bell, Phil. Mag. 11, 510 (1881).
2. A. Rosencwaig und A. Gersho, „Theory of the Photoacoustic Effect in Solids“, J. Appl. Phys. 47, 64-69 (1976).

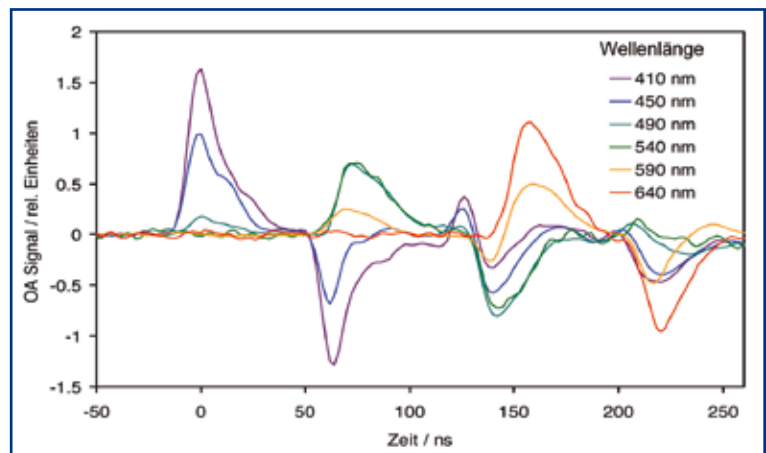


Abbildung 11: OA Signal bei verschiedenen Wellenlängen gegenüber der Zeitverzögerung bezüglich des Laserpulses.

