

Entwurf und Implementierung einer schnellen 3D-Direktivitätsmessung und automatischen Entzerrung von akustischen Schallwandlern

Karoline Gussow¹, Bastian Kaulen¹, Tim Owe Wisch¹, Frederik Kühne¹, Christian Kanarski¹, Hanna Lewitz², Eckhard Quandt², Gerhard Schmidt¹

¹ *Digitale Signalverarbeitung und Systemtheorie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,*

Email: {kars, bk, timw, frk, chk, gus}@tf.uni-kiel.de

² *Anorganische Funktionsmaterialien, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,*

Email: {hale, eq}@tf.uni-kiel.de

Kurzfassung

Das Vermessen von akustischen Schallwandlern wie Projektoren und Hydrophonen ist notwendig, um die Leistungsfähigkeit von nachfolgenden Signalverarbeitungsstrukturen optimal nutzen zu können. Häufig wird in den Datenblättern von kommerziellen Schallwandlern nur die Direktivität bei ausgewählten Frequenzen über einen Schnitt in der Polar-Ebene und einen Schnitt durch die Azimut-Ebene angegeben. Dies ist häufig der langen Messdauer und Schwierigkeiten in der Visualisierung geschuldet. Allerdings können genaue Kenntnisse des räumlichen Frequenzverhaltens die Leistungsfähigkeit von SONAR-Systemen, gerade in Array-Anwendungen, verbessern. In dieser Publikation wird eine Methode vorgestellt, mit der viele Schallwandler schnell und präzise über viele Winkel charakterisiert werden können. Dazu wird ausgenutzt, dass die Änderungen des Frequenzgangs von benachbarten Winkeln gering sind. Bei Verwendung von adaptiven Filtern kann dadurch die Messzeit signifikant verringert und so eine dreidimensionale Charakterisierung von Schallwandler-Arrays in einem hinnehmbaren zeitlichen Rahmen ermöglicht werden. Anschließend werden Entzerrungskoeffizienten berechnet, die in einer zweiten Messung verifiziert werden können. Sowohl das Vermessen als auch die Entzerrung wurden in einem Echtzeit-Signalverarbeitungsprogramm umgesetzt und ermöglicht somit eine deutliche Reduzierung der gesamten dreidimensionalen Charakterisierung von Schallwandlern.

Einleitung

Zunächst wird eine Impulsantwortmessung mit Hilfe von adaptiven Filtern vorgestellt und beschrieben, wie mit dieser Methode die Direktivität schnell und präzise bestimmt werden kann. Anschließend wird auf die Ermittlung der Filterkoeffizienten für die Entzerrfilter eingegangen. Zudem werden die Ergebnisse der Direktivitätsmessung und der Entzerrung, die im Messtank der WTD 71 Kiel durchgeführt wurden, präsentiert.

Schnelle Messung der Impulsantworten

Da die Direktivität die Gesamtheit der Sensitivitäten aller Winkel eines Schallwandlers für eine bestimmte Frequenz darstellt, müssen zunächst alle zugehörigen Impulsantworten bestimmt werden. Diese Messungen finden für Unterwasserschallwandler in speziellen, schallar-

men Messtanks statt, die allerdings räumlich begrenzt sind. Daher kommt es zu Reflexionen des ausgesendeten Schalls an den Wänden und der Wasseroberfläche. Damit es zu keiner Überlagerung mit dem Direktschall kommt, werden in herkömmlichen Methoden häufig für eine längere Zeit kurze Pulse ausgesendet, über die dann gemittelt wird, um ein besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) zu erzielen. Hierbei ist die Frequenzauflösung gering. Eine Alternative dazu ist die Verwendung der Blanked-Impulse-Response-Methode [1]. Bei dieser wird das Spektrum des Hydrophonsignals durch das Anregungsspektrum geteilt. Durch die Transformation in den Zeitbereich wird die Impulsantwort bestimmt, aus welcher der Direktschall ausgeschnitten und in den Frequenzbereich transformiert wird. Beide Methoden sind sehr zeitaufwändig, vor allem wenn mehrere Winkel oder Schallwandler vermessen werden sollen. Daher wird in [2] eine schnelle und effiziente Methode zur Bestimmung der Impulsantwort vorgestellt. Bei dieser wird ein adaptives Filter eingesetzt, welches die Impulsantwort schätzt. Das Anregungssignal wird kontinuierlich gesendet, da auch hier der Direktschall aufgrund der zeitlichen Trennung von den Reflexionen aus der Impulsantwort ausgeschnitten werden kann. Zusätzlich liefert die Methode ein direktes Gütemaß für die Qualität der Messung.

NLMS-Algorithmus

Zur Schätzung der Impulsantwort mit Hilfe des adaptiven Filters wird der Normalized-Least-Mean-Square-Algorithmus (NLMS-Algorithmus) nach [3] verwendet. In Abbildung 1 ist die Struktur eines solchen Filters zur Systemidentifikation dargestellt.

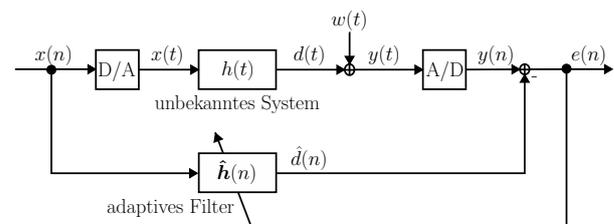


Abbildung 1: Adaptives Filter zur Systemidentifikation.

Als Sendesignal $x(n)$ wird weißes Rauschen verwendet, damit alle Frequenzen gleichermaßen angeregt werden. Dieses wird digital-analog gewandelt und über

einen Projektor bzw. ein Projektorarray ausgegeben. $h(t)$ stellt die Impulsantwort des unbekanntes Systems, also des zu vermessenden Schallwandlers, dar. Das vom Hydrophon(-array) empfangene Signal $y(t)$ ergibt sich gemäß

$$y(t) = h(t) * x(t) + w(t). \quad (1)$$

Dabei ist $w(t)$ das Rauschen im Messtank. Das geschätzte Ausgangssignal $\hat{d}(n)$ wird gemäß

$$\hat{d}(n) = \hat{\mathbf{h}}^T(n) \mathbf{x}(n) \quad (2)$$

berechnet, wobei $\mathbf{x}(n)$ aus den letzten N Werten

$$\mathbf{x}(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)]^T \quad (3)$$

besteht und $\hat{\mathbf{h}}(n)$ als

$$\hat{\mathbf{h}}(n) = [\hat{h}_0(n), \hat{h}_1(n), \dots, \hat{h}_{N-1}(n)]^T \quad (4)$$

definiert ist. $\hat{d}(n)$ abgezogen vom digitalisierten Ausgangssignal $y(n)$ des unbekanntes Systems ergibt den Fehler $e(n)$

$$e(n) = y(n) - \hat{d}(n). \quad (5)$$

Der Fehler stellt den Unterschied zwischen wahren und geschätztem System dar und ist somit ein Maß für die Genauigkeit der Messung. Die Schätzung der Impulsantwort $\hat{\mathbf{h}}(n)$ wird in jedem Iterationsschritt n aktualisiert. Die Adaptionsregel lautet dabei

$$\hat{\mathbf{h}}(n+1) = \hat{\mathbf{h}}(n) + \mu_{\text{NLMS}} \frac{\mathbf{x}(n) e(n)}{\|\mathbf{x}(n)\|^2}. \quad (6)$$

Diese setzt sich aus der vorherigen Schätzung und einem Korrekturterm zusammen. Die Schrittweite μ_{NLMS} bestimmt über die Gewichtung des Korrekturterms und somit die Konvergenzgeschwindigkeit. Die Norm des Eingangssignals $\|\mathbf{x}(n)\|^2$ wird gemäß

$$\|\mathbf{x}(n)\|^2 = \|\mathbf{x}(n-1)\|^2 - x^2(n-N) + x^2(n) \quad (7)$$

bestimmt.

Die Messung wird gestoppt, wenn die Fehlerleistung klein genug ist. Dies wird mit Hilfe von Formel 8

$$20 \log_{10} \left(\frac{\overline{y^2(n)}}{\overline{e^2(n)}} \right) > \gamma \quad (8)$$

überprüft, wobei $\overline{y^2(n)}$ und $\overline{e^2(n)}$ Kurzzeitglättungen sowie γ einen festgelegten Grenzwert in Dezibel darstellen. Je größer dieser gewählt wird, desto genauer kann die Schätzung der Impulsantwort werden. Außerdem wird die Messung abgebrochen, wenn eine maximale Messzeit erreicht wurde. Dies ist vor allem relevant, wenn der Grenzwert – zum Beispiel aufgrund einer zu geringen Aufnahmeleistung – nicht überschritten wird.

3D-Direktivitätsmessung

Das vorgestellte Messprinzip wird bei der 3D-Direktivitätsmessung angewendet. Dabei werden zunächst die Impulsantworten aller Elemente für die Ausgangsrichtung geschätzt. Da davon auszugehen ist, dass bei Arrayanwendungen die Impulsantworten der einzelnen Elemente sehr ähnlich sind, wird mit dem Ergebnis der letzten Schätzung des vorausgegangenen Elements weiter adaptiert. Somit kann die Rechendauer reduziert werden. Anschließend erfolgt eine Drehung in Azimut- oder Polar-Richtung, um für diese Richtung die Impulsantworten aller Elemente zu bestimmen. Auch hier kann die Annahme getroffen werden, dass sich die Impulsantworten der benachbarten Winkel stark ähneln und daher die letzte Schätzung als Adaptionsstart verwendet werden kann. Eine minimale Messzeit sorgt dafür, dass sich das Filter für jedes Element bzw. jeden Winkel einschwingen kann.

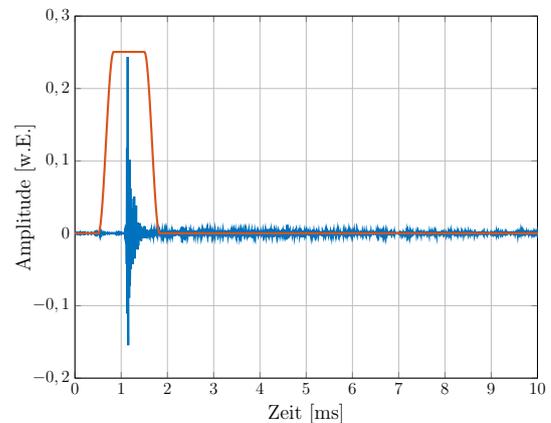


Abbildung 2: Gemessene Impulsantwort $h_0(t)$ mit Tukey-Fenster.

In Abbildung 2 ist eine der gemessenen Impulsantworten zu sehen. Da die Reflexionen einen längeren Weg vom Sender zum Empfänger zurücklegen als der Direktschall, liegt eine zeitliche Trennung vor. Der Direktschall kann mit einem Tukey-Fenster ausgeschnitten werden. Im Anschluss wird daraus der Frequenzgang bestimmt. Dieser wird in dieser Publikation mit der Sensitivität gleichgesetzt. Die Frequenzgänge aller gemessenen Richtungen ergeben daher zusammen die Direktivität. Um diese in der korrekten Einheit angeben zu können, müsste ein Umrechnungsfaktor aus der Messhardware bestimmt werden. Darauf wurde zunächst verzichtet.

Entzerrung

Weist die Direktivität nicht die für die Anwendung benötigte Charakteristik auf, können die Frequenzgänge entzerrt werden. Dies ist vor allem bei Arrayanwendungen von Vorteil, bei denen alle Elemente denselben Frequenzgang besitzen sollen. Dafür kann ein gewünschter Frequenzverlauf, zum Beispiel ein geradliniger oder über alle Elemente gemittelter Verlauf, vorgegeben werden. Für jedes Element und jeden Winkel wird die Differenz des gemessenen Frequenzgangs zum vorgegebenen Frequenzgang ermittelt und diese invertiert. Auf Basis dessen werden die Filterkoeffizienten für die Entzerrfilter mit Hilfe der linearen Prädiktion bestimmt.

Um die Funktion der Entzerrung zu überprüfen, werden die Entzerrfilter entweder vor die Projektoren oder hinter die Hydrophone geschaltet, je nachdem, was vermessen wird. Anschließend wird eine zweite Messung durchgeführt und die entzerrte Direktivität bestimmt. Diese zweite Messung ist vor allem aufgrund der großen Zeitersparnis bei der Nutzung der vorgestellten Methode möglich.

Messungen

Die vorgestellte Methode wurde im Echtzeit-Signalverarbeitungsprogramm KiRAT (Kiel Real-time Application Toolkit) implementiert. Um diese zu testen, wurden Messungen der vertikalen Direktivität im Wassertank der WTD 71 im Marinearsenal Kiel durchgeführt. Dieser hat die Maße von $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$. Der Messaufbau ist in Abbildung 3 zu sehen.

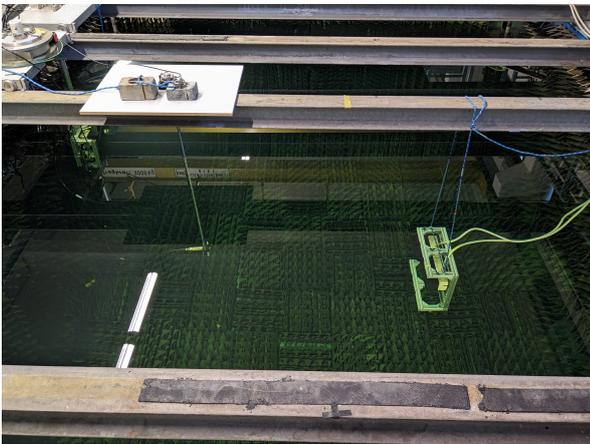


Abbildung 3: Messung der Direktivität im Messtank der WTD 71 mit Sendearray und am Drehteller befestigten Empfangshydrophon.

Dabei wurde ein Sendearray mit 32 Elementen, 50 kHz Mittenfrequenz und 15 kHz Bandbreite verwendet. Hier-von wurde einer der mittleren Projektoren zum Senden genutzt. Als Empfänger wurde das Hydrophon TC4014-5 von Reson eingesetzt, welches über eine Stange an einem Drehteller befestigt und im Abstand von ca. 1,70 m vom Array entfernt platziert wurde. Der Drehteller wird mit einem Stepper-Motor betrieben, um den zu vermessenden Schallwandler um die eigene Achse drehen zu können. Über eine Schnittstelle kann dieser mit dem PC verbunden und über KiRAT angesteuert werden. Somit erfolgt die Drehung automatisch, sobald die Messung für den aktuellen Winkel abgeschlossen ist. Die Winkelauflösung kann dabei eingestellt werden. Bei diesen Messungen wurde eine Winkelauflösung von 5° gewählt, was 72 zu messenden Winkeln entspricht. Außerdem wurde eine Abtastrate von 192 kHz und eine Schrittweite von $\mu\text{NLMS} = 1$ gewählt.

In Abbildung 4 ist die gemessene Direktivität für den nutzbaren Frequenzbereich des Projektors von 45 kHz bis 60 kHz dargestellt. Dabei wurde die Darstellung als Spektrogramm gewählt. Allerdings sind auf der x-Achse statt der Zeit die gemessenen Winkel aufgetragen. 0° stellt dabei die Hauptaufnahmerichtung des Hydrophons dar, al-

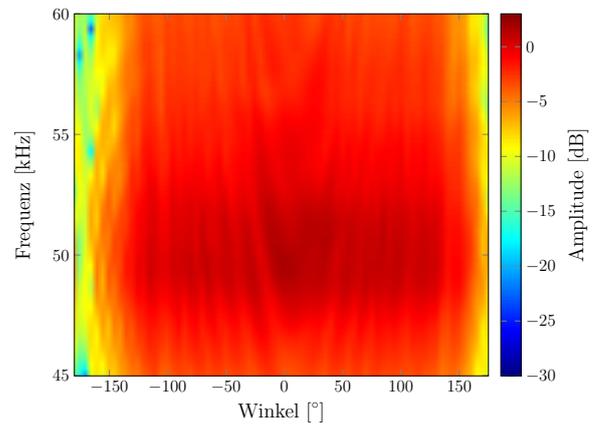


Abbildung 4: Gemessene Direktivität für den Frequenzbereich von 45 kHz bis 60 kHz.

so die Position, die in Abbildung 3 zu sehen ist. In der Direktivität ist der ausgeprägte Frequenzgang des Projektors zu sehen und wie dieser aus den betrachteten Richtungen empfangen wurde. In Abbildung 5 sind die zugehörigen Amplitudengänge ausgewählter Winkel dargestellt.

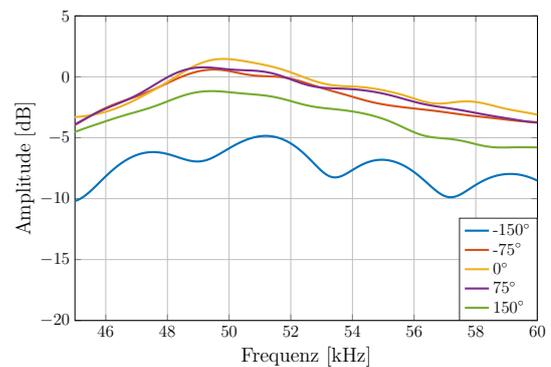


Abbildung 5: Gemessene Amplitudengänge für verschiedene Winkel für den Frequenzbereich von 45 kHz bis 60 kHz.

Aus den gemessenen Daten kann zur besseren Betrachtung der Direktivität bei einer bestimmten Frequenz ein Polardiagramm erstellt werden. Abbildung 6 zeigt ein solches bei der Mittenfrequenz von 50 kHz.

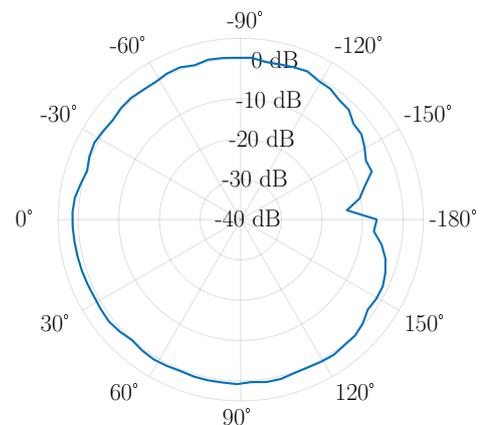


Abbildung 6: Polardiagramm für die Mittenfrequenz von 50 kHz.

Erwartungsgemäß ist das Ansprechverhalten von allen Seiten sehr ähnlich. Nur wenn das Hydrophon entgegen seiner Hauptaufnahmerichtung gedreht ist, tritt eine

stärkere Dämpfung auf. Diese ist darauf zurückzuführen, dass sich das Kabel zwischen Sender und Empfänger befindet.

Im Anschluss an diese Messung wurden die Filterkoeffizienten für jeden Winkel bestimmt, welche die Frequenzgänge auf einen geraden Verlauf von 0 dB im betrachteten Frequenzbereich entzerren, und die Messung wiederholt. Die entzerrte Direktivität ist in Abbildung 7 und die entzerrten Amplitudengänge sind in Abbildung 8 dargestellt.

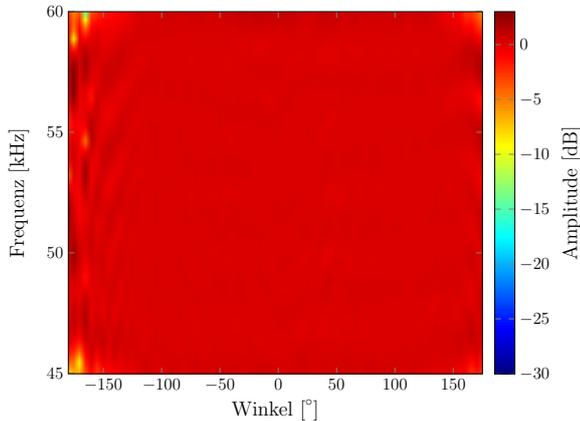


Abbildung 7: Entzerrte Direktivität für den Frequenzbereich von 45 kHz bis 60 kHz.

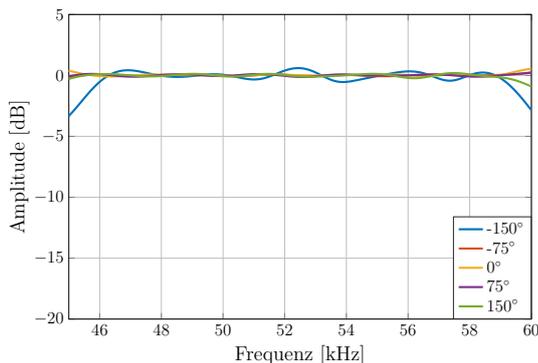


Abbildung 8: Entzerrte Amplitudengänge für verschiedene Winkel für den Frequenzbereich von 45 kHz bis 60 kHz.

Beide Abbildungen zeigen, dass auf den gewünschten Frequenzgang entzerrt werden konnte. Vor allem im Polardiagramm für die Mittenfrequenz von 50 kHz in Abbildung 9 ist die resultierende omnidirektionale Charakteristik gut zu erkennen.

Messzeit

Im Vergleich zu konventionellen Methoden, die für die Messung einer 3D-Direktivität eines Arrays mehrere Stunden in Anspruch nehmen, kann mit diesem Verfahren die Messzeit deutlich verkürzt werden. Für die konventionelle Messung müssten ca. 60 s lang Pulse ausgesendet werden. Bei der NLMS-Methode werden pro Messung höchstens 5 s benötigt, da dies die maximale Messzeit darstellt, die sich auch in den Messungen bewährt hat. Allerdings wird diese meistens unterschritten. Außerdem werden nach jeder Messung 0,5 s lang keine Signale ausgesendet, damit die Reflexionen im Tank abklingen können. Werden 72 Winkel vermessen, so werden

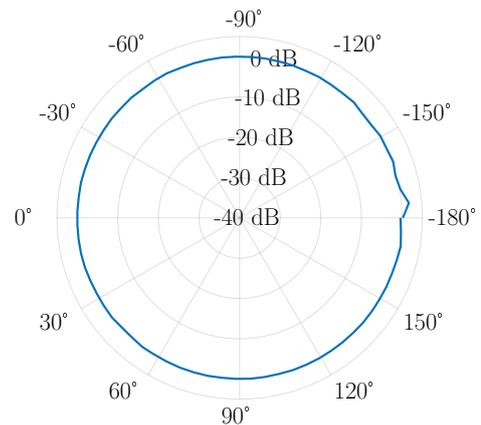


Abbildung 9: Entzerrtes Polardiagramm für die Mittenfrequenz von 50 kHz.

mit der konventionellen Methode ca. 72 min pro Element benötigt. Mit der NLMS-Methode kann die maximale Messzeit auf 6,6 min reduziert werden, was einer Zeiterparnis von über 90 % entspricht.

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Publikation wurde eine schnelle und präzise 3D-Direktivitätsmessung vorgestellt. Diese hat den Vorteil, dass die Messzeit der Direktivität eines Schallwandlers bzw. Schallwandlerarrays deutlich reduziert werden kann. Außerdem steht über den berechneten Fehler ein direktes Gütemaß zur Verfügung. Als Nachteile sind zu nennen, dass Nichtlinearitäten nicht erfasst werden können und die Hardware nicht optimal genutzt werden kann, da permanent gesendet wird. Somit kann nicht die volle Leistung verwendet werden. Zusätzlich ist eine Entzerrung der Schallwandler basierend auf der Messung möglich, wodurch der Einfluss der Messhardware auf die Messsignale reduziert werden kann. Sowohl die Messung als auch die Entzerrung wurden in einem Echtzeit-Signalverarbeitungsprogramm implementiert und konnten anhand von Messungen getestet werden.

Zukünftig wäre es interessant, das Messequipment so zu erweitern, dass der zu vermessende Schallwandler automatisch um beide Achsen gedreht werden kann, um alle Polar- und Azimut-Winkel zu erfassen. Außerdem könnte die Messung weiter optimiert werden, indem neben den Magnituden auch die Phasen bzw. Gruppenlaufzeiten betrachtet und entzerrt werden.

Literatur

- [1] S. Schulze: Echo Reduction in Hydro-Acoustic Measurements. Underwater Acoustics Conference and Exhibition (2015), Vol. 3, 273-280
- [2] B. Kaulen, H. Lewitz, T. Wisch, F. Kühne und G. Schmidt: Entwurf und Implementierung einer schnellen Frequenzgangmessung und automatischer Entzerrung von akustischen Schallwandlern, DAGA 2022, 2022
- [3] E. Hänslers und G. Schmidt: Acoustic Echo and Noise Control: A Practical Approach. Wiley-Interscience, USA, 2004