

Akustische Eigenschaften von Lautsprechern aus Kohlenstoffnanoröhrchen

Bernhard U. Seeber¹, Alaa Abdellah², Paolo Lugli²

¹ Audio-Signalverarbeitung, TU München, 80333 München, E-Mail: seeber@tum.de

² Lehrstuhl für Nanoelektronik, TU München, Arcisstrasse 21, 80333 München, E-Mail: lugli@tum.de

Einleitung

Kohlenstoffnanoröhrchen (Carbon Nanotubes, CNT) sind molekulare, röhrenförmige Gebilde aus Kohlenstoff, die elektrisch leitfähig sind. Erste Laboranwendungen in der Elektrotechnik finden sich beispielsweise in Speicherzellen und Dioden. Werden CNTs auf ein Trägermaterial, wie dünne Folien oder Glasscheiben, aufgebracht, können sie bei Stromfluss auch als Heizelement dienen. Aufgrund der Erhitzung kommt es zu einer lokalen Dichteänderung der Luft, die bei Wechselströmen zu hörbaren Schallemissionen führt. Prototypen von CNT Lautsprechern mit ca. 50x35 mm² Fläche wurden auf verschiedenen Trägersubstraten (Glass, Kapton, Papier) hergestellt und elektroakustisch vermessen. Die Sensitivität war abhängig vom Trägermaterial und am höchsten für Papier und Kapton, wo 60 dB SPL an 10 kHz bei 30V Vorspannung erreicht wurden. Bedingt durch das physikalische Prinzip der Schallabstrahlung wird eine Schallwelle für die positive und die negative Halbwelle einer sinusförmigen Wechselspannung generiert, was zu einer Verdopplung der Frequenz führt. Messungen der Verzerrungen und des Frequenzgangs wurden daher mit einer überlagerten konstanten Vorspannung durchgeführt. Bei niedrigen Signalamplituden betrug der Klirrfaktor 0.1, stieg aber aufgrund einer starken 2. Harmonischen auf ca. 0.5 an, sobald der aufgrund der Vorspannung mögliche Amplitudenbereich ausgenutzt wurde. Der Frequenzgang stieg, je nach Trägermaterial, mit 20-40 dB/Dekade oberhalb ca. 1 kHz an. Insgesamt zeigt die Studie, dass für den Hörbereich geeignete Lautsprecher mit Kohlenstoff-nanoröhrchen möglich sind.

Messaufbau

Bei den vorgestellten Prototypen handelt es sich um thermoakustische Wandler, bei denen sich die Luft vor der Oberfläche durch Erwärmung periodisch ausdehnt und in hörbaren Schall umgewandelt wird. Die Polarität des Stromflusses ist für die Erwärmung unwichtig. Der Prototyp wurde daher mit einer konstanten Vorspannung betrieben, auf die das Messsignal moduliert wurde (Abb. 1). Aufgrund des konstanten Stromflusses zum Vorwärmen kommen für die Messung keine Audioverstärker in Frage, da diese eine untere Grenzfrequenz von wenigen Hertz aufweisen. Die Modulation wurde mit einem Audio-Übertrager (100V-Technik, 100W) durchgeführt, der von einem Audioverstärker (PAS 2002 PCA) gespeist wurde. Die Messsignale wurden in Matlab erstellt und dem Verstärker über einen hochwertigen Digital-Analog-Wandler (RME ADI-2) zugeführt. Die Messung erfolgte mit einem rauscharmen 1" Mikrofon (GRAS 40 HF) in 10 cm Abstand in Abstrahlrichtung vor dem Prototypen. Das

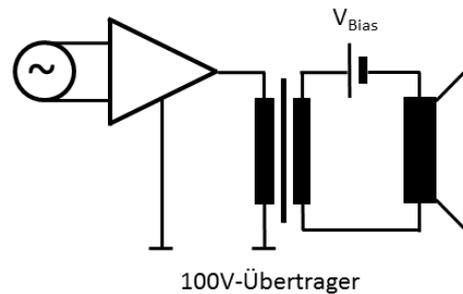


Abbildung 1: Messaufbau: Der Lautsprecher wurde über eine konstante Vorspannung mit moduliertem Messsignal vermessen. Mikrofonsignal wurde mit einem RME ADI-2 Wandler von



Abbildung 2: Lautsprecher Proben v.l.n.r.: 1) Silber-Nanodrähte auf Glasträger, 2) Kohlenstoffnanoröhrchen auf Glas, 3) Kohlenstoffnanoröhrchen auf Kapton-Folie.

analog nach digital umgesetzt und in Matlab analysiert.

Lautsprecher-Prototypen

Bei den drei vermessenen Prototypen handelt es sich um mit Nanomaterialien beschichtete Träger: 1) Silber-Nanodrähte auf Glasträger, 2) Kohlenstoffnanoröhrchen auf Glas, 3) Kohlenstoffnanoröhrchen auf Kapton-Folie (Abb. 2). Die beschichtete Fläche betrug ca. 37x50 mm², außer für die Version mit Silber-Nanodrähten (37x28mm²). Die Kontaktierung erfolgte mit Silberlack und Kupferfolie. Der Glasträger war ca. 1,5 mm dick.

Ergebnisse

Abbildung 3 zeigt den gemessenen Ausgangspegel ausgewertet in einem 10 Hz breiten Frequenzband um die 1 kHz Signalkomponente (rote Linie) als Funktion der sinusförmigen Eingangsspannung (1 kHz) für Silbernanodrähte auf einem Glasträger. Die Vorspannung betrug ca. 17V. Ab ca. 0.15V_{rms} Signalspannung am Prototypen hob sich das Ausgangssignal aus dem Rauschteppich der Messung (schwarze Linie) heraus. Ab ca. 0.3 V_{rms} nahm das Ausgangssignal linear mit jeder Eingangssignalerhöhung (in 2.5 dB-Schritten) zu, was durch Annäherung an die gestrichelte Linie sichtbar ist. Der maximal abgestrahlte Pegel betrug 20 dB SPL bei einer Eingangsspannung von ca. ±15 V Spitze (zzgl. +17 V

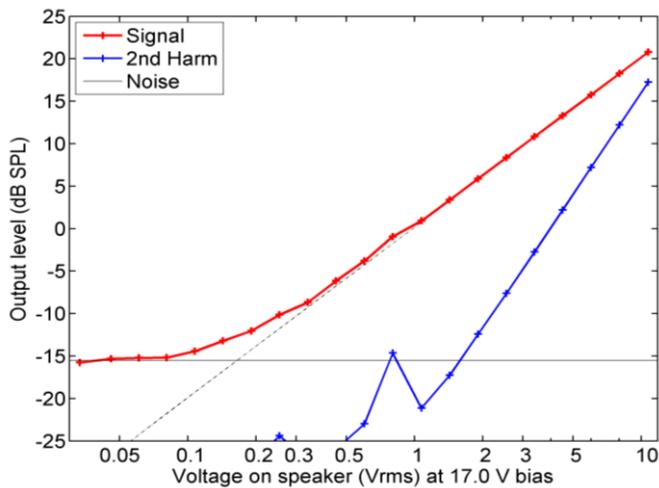


Abbildung 3: Ausgangspegel der 1 kHz-Signalkomponente (rote Linie) als Funktion der sinusförmigen Eingangsspannung (1 kHz) für Silbernanodrähte auf einem Glasträger. Von niedrigen Signalspannungen kommend hebt sich das Nutzsignal aus dem Messrauschen (schwarze Linie) heraus und erreicht ca. 20 dB SPL bei 10 V_{rms} Eingangsspannung. Die zu hohen Pegeln stark ansteigende zweite Harmonische an 2 kHz ist ebenfalls gegeben (blau).

Vorspannung). Bei einem hohen Modulationsgrad stieg jedoch die zweite Harmonische an 2 kHz stark an (blaue Linie). Während der (harmonische) Klirrfaktor für Wiedergabepegel um 5 dB SPL ca. 0.1 betrug, stieg er auf 0.5 an, d.h. die 2. Harmonische erreichte einen Pegel nur wenige Dezibel unter dem 1 kHz Nutzsignal.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für Kohlenstoffnanoröhrchen auf einer Kaptonfolie. Die Vorspannung war aufgrund des höheren Innenwiderstands des Materials (270Ω) mit 30V größer, die Verlustleistung aber ähnlich. Deutlich sichtbar ist der lineare Anstieg des Ausgangspegels über einen weiten Bereich, der bei maximal möglicher Signalspannung ca. 30 dB SPL erreicht. Das Verhalten der Klirrkompente ist ähnlich wie beim Silbermaterial, sie steigt im Pegel stark an, sobald sich die Eingangsspannung dem maximal möglichen Pegel nähert. Da dieser Aufbau aber insgesamt einen höheren Pegel abstrahlt, lässt sich ein deutlich hörbarer Schall abspielen.

Abbildung 5 zeigt den Frequenzgang des Prototypen mit Kohlenstoffnanoröhrchen auf einer Kaptonfolie. Interessant ist der starke Anstieg des abgestrahlten Schallpegels mit steigender Signalfrequenz von ca. 40 dB/Dekade oberhalb 1 kHz. Es wurde ein Ausgangspegel von 60 dB SPL an 10 kHz erreicht. Der Klirrfaktor blieb bei der gewählten Aussteuerung jedoch hoch, wie an der ausgeprägten 2. Harmonischen (ca. 7-12 dB unter dem Nutzsignal) sichtbar ist. Abbildung 6 zeigt schließlich die gemessenen Klirrfaktoren als Funktion der Eingangsspannung für die drei Prototypen. Insgesamt kann festgehalten werden, dass mit Nanomaterialien beschichtete Träger als Lautsprecher prinzipiell geeignet sind. Das Konzept sollte daher gezielter untersucht werden.

Literatur

- [1] Xiao, L., Chen, Z., Feng, C., Liu, L., Bai, Z.-Q., Wang, Y., Qian, L., et al. (2008). Nano letters **8**, 4539-4545.

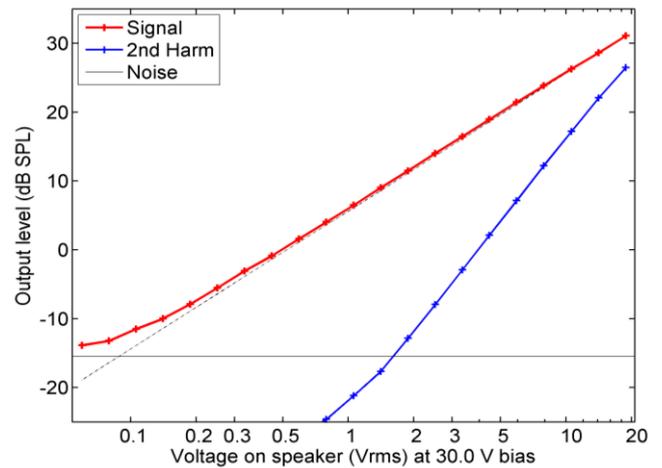


Abbildung 4: Wie Abb. 3, jedoch für Kohlenstoffnanoröhrchen auf einer Kaptonfolie.

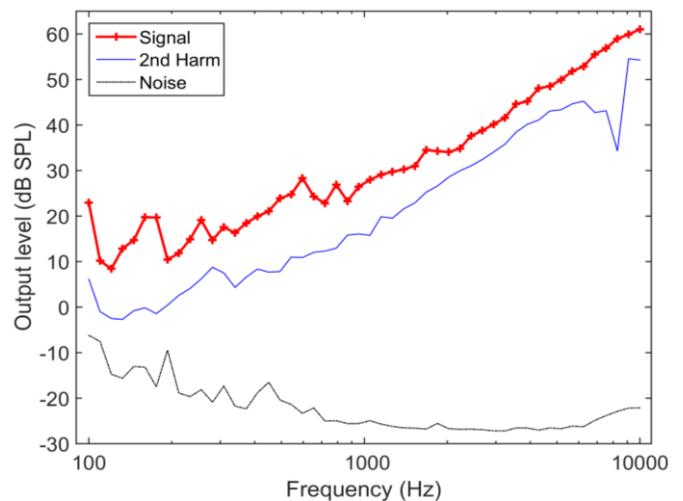


Abbildung 5: Frequenzgang des 1 kHz Nutzsignals (rot), der 2. Harmonischen (blau) und des Rauschpegels (schwarz) des Prototypen aus Kohlenstoffnanoröhrchen auf einer Kaptonfolie. Die Empfindlichkeit steigt oberhalb von 1 kHz mit ca. 40 dB/Dekade an und 60 dB SPL werden an 10 kHz abgegeben.

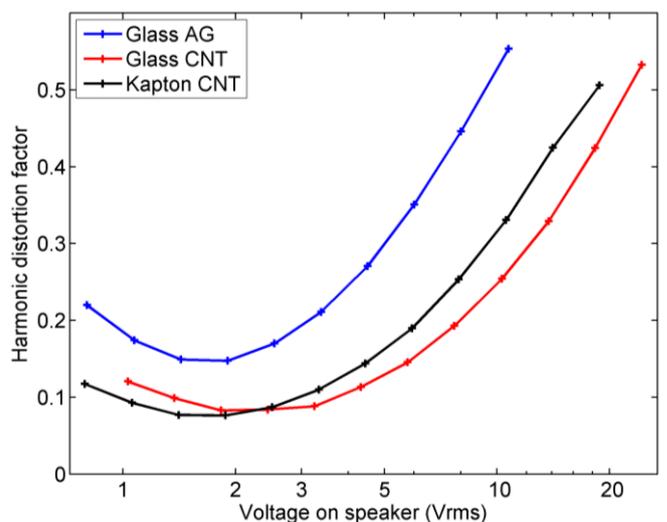


Abbildung 6: Klirrfaktor der ersten 2.-10. Harmonischen als Funktion der Signalspannung für die drei Prototypen.