

Exposé zur Masterarbeit

Jörg Lichtenstein B. A. (Hons.), E-Mail: joerg.lichtenstein@gmail.com

25.08.2014

Abstract

Der Lautsprecher ist immer noch das Glied der audiotechnischen Signalverarbeitungskette, welches die größten Signalverzerrungen verursacht. Einen großen Sprung in der Entwicklung bedeutete die zunehmende Verbreitung digitaler Signalverarbeitung, mit der es bereits möglich ist, die Verzerrungen im linearen Bereich stark zu reduzieren. Die Reduktion der nichtlinearen Verzerrungsanteile, durch entsprechende Gestaltung der einzelnen Bauelemente, ist jedoch noch immer sehr aufwendig [18]. Bisherige Ansätze, auch nichtlineare Verzerrungsanteile durch digitale Signalverarbeitung zu kompensieren, hatten verschiedene Schwächen, teilweise sind die Ansätze zu rechenintensiv für echtzeitfähige Implementierungen [4], andere Ansätze basieren auf sehr spezifischen Modellen, so dass die Parameterbestimmung sehr aufwendig wird und nicht vorgesehene Einflüsse auch nicht kompensiert werden können [14]. Die von Frank [6–8] vorgeschlagene Struktur bietet, als Volterra-Näherung, ausreichende Allgemeinheit um auch *unbekannte* Phänomene und verschiedene Wandler adäquat abbilden zu können. Durch den Aufbau aus wenigen linearen Teilsystemen und multiplikativen Verknüpfungen ist eine echtzeitfähige Implementierung möglich. Um die bereits im Ansatz gezeigte Eignung zur Kompensation von lautsprechertypischen Verzerrungen [6] unter heutigen Gesichtspunkten zu überprüfen, werden verschiedene Messreihen mit einem Lautsprechermodell, basierend auf [16, 17], durchgeführt.

Titel (Vorschlag)

Die Mehrfachkaskade (MK) als nichtlineares Filter zur aufwandsarmen Kompensation von Nichtlinearitäten bei Lautsprechern

Motivation und Stand der Technik

Wie viele reale Systeme ist auch der Lautsprecher ein nichtlineares System. Auch wenn in den meisten Fällen durch die Annahme der Linearität die Wiedergabeeigenschaften, durch eine geeignete Vorverzerrung des Eingangssignals, signifikant verbessert werden können, vermindern weiterhin nichtlineare Verzerrungen die Wiedergabequalität [10, 18]. Zudem beschränken die Nichtlinearitäten den Arbeitsbereich, sowohl im Bezug auf den abgestrahlten Frequenzbereich als auch die maximalen Schalldrücke. Um die Nichtlinearitäten zu minimieren muss ein enormer Entwicklungs- und Konstruktionsaufwand

betrieben werden, welcher oftmals in keinem Verhältnis zu den erzielten Verbesserungen steht. Zudem lassen oftmals anwendungsspezifische Anforderungen entsprechende Optimierungen nur bedingt zu, z. B. sind für die Wellenfeldsynthese möglichst kleine und breitbandige Sekundärschallquellen erstrebenswert, kleine Breitbandlautsprecher verursachen jedoch erhebliche Intermodulationsverzerrungen und können, gerade im unteren Frequenzbereich, nur geringe Schalldrücke verzerrungsarm wiedergeben.

Im Bezug auf die nichtlineare Systemtheorie wurden in den letzten drei Jahrzehnten zunehmende Erfolge erzielt und diese rückten in den verschiedensten Disziplinen zunehmend in den Fokus [9]. Dabei wurden auch im Bezug auf Lautsprecher immer wieder Versuche unternommen, durch entsprechende mathematische Modelle, nichtlineare Verzerrungen zu identifizieren und darauf aufbauend zu kompensieren [2, 5, 6, 8, 12, 13, 15]. Dabei waren die Resultate der Simulationen und Versuche durchaus vielversprechend, doch führten speziellere Modelle, wie [14], zwar zu äußerst performanten Lösungen, die Bestimmung der nötigen Parameter machten die Messungen jedoch relativ aufwendig, im Modell möglicherweise nicht betrachtete Nichtlinearitäten werden auch nicht kompensiert und dieses Modell kann lediglich auf klassische elektrodynamische Lautsprecher angewendet werden. Andere Modelle beruhen weitestgehend auf den sog. Volterra-Reihen und entsprechenden Abwandlungen [20], damit ist es zwar möglich nahezu alle typischen Nichtlinearitäten zu erfassen, jedoch steigt der erforderliche Rechenaufwand exponentiell mit der Ordnung der abzubildenden/kompensierenden Verzerrungen, so dass selbst die Abbildung von Nichtlinearitäten zweiter Ordnung kaum in Echtzeit zu bewältigen waren.

Ansätze mit zusätzlichen Sensoren [3, 15] zeigen auch ein gewisses Potential, können aber lediglich Verzerrungen kompensieren, welche vom Sensor auch erfasst werden können, somit bleiben bei [15] Verzerrungen, die erst in der akustischen Ebene auftreten unberücksichtigt, z. B. Intermodulationsverzerrung. Bei [3] ergibt sich eine obere Grenzfrequenz, bis zu der eine Kompensation möglich ist, durch die Platzierung des Sensors, bzw. die frequenzabhängige Abstrahlcharakteristik des Lautsprechers. Zudem führt die Notwendigkeit eines Sensors zu zusätzlichen Einschränkungen bei der Konstruktion, wäre aber unempfindlicher gegen langsame Veränderungen im Lautsprecher, wie Temperatur [17] oder Materialermüdung [19].

Frank schlägt in seinen Arbeiten [6–8] eine Näherung für die Volterra-Reihen vor, welche diese über mehrere lineare Systeme und deren multiplikative Verknüpfung annähert, wodurch der Rechenaufwand, bei ähnlicher Leistung[5–8], auf einen Bruchteil sinkt.

Allgemeine Ansätze zur Kompensation von Nichtlinearitäten, können einerseits einen Qualitäts- bzw. Leistungssprung für bestehende Systeme bedeuten, aber auch neue

Konstruktionen sowie *alte* Wandlerprinzipien ermöglichen bzw. wieder interessant machen.

Vorgehen und Ziele

Ausgehend von den Ergebnissen in Franks Arbeiten, scheint ein echtzeitfähiges Kompensationsfilter für Nichtlinearitäten bis zur 3. Ordnung durchaus realistisch – und angemessen – wobei mit Franks Ansatz wohl auch höhere Ordnungen möglich sind.

Um die Funktionsfähigkeit der Programme zu überprüfen, sollen zunächst die Ergebnisse Franks repliziert werden. Dazu soll der Versuchsaufbau [6–8], mit der eigens programmierten MK und dem Lautsprechermodell, basierend auf [16, 17], repliziert werden, im Gegensatz zu den weiteren Untersuchungen soll hier noch mit der geringeren Abtastrate von 8kHz und der Membranbeschleunigung (geringere Bandbegrenzung) gearbeitet werden.

Da sich in den Vorarbeiten bereits Probleme durch die Bandbegrenzung zeigten, soll die Problematik nochmals durch die Filterung der Testsignale von *künstlichen* MKs, mit Einheitsimpulsen als Teilsystemen, sowie bandbegrenzten Teilsystemen, gezeigt, sowie theoretisch aufgearbeitet werden.

Um eine grundsätzliche Aussage über die Eignung der Struktur, zur Kompensation/Modellierung treffen zu können, soll ein Lautsprecher simuliert werden, dessen Parameter so gewählt werden, dass die Abstrahlung breitbandig ist, bei gleichzeitiger Abbildung der lautsprechertypischen Verzerrungen. So liessen sich die grundsätzlichen Fähigkeiten der Struktur, trotz der Einschränkungen der zur Verfügung stehenden Algorithmen, zur Bestimmung der Teilsysteme, überprüfen.

Mit den so gewonnen Erkenntnissen sollte es möglich sein, die Fähigkeiten der Struktur abschliessend zu bewerten und festzustellen, ob sich eine Weiterentwicklung der Struktur/Anlernalgorithmen lohnt.

Vorarbeiten

Bis zum jetzigen Zeitpunkt wurde bereits eine umfassende Recherche zu nichtlinearen Systemen, Volterra-Systemen, Nichtlinearitäten bei Lautsprechern und weiteren Quellen zur MK, durchgeführt. Im Anschluss daran wurden die ersten Versionen des MK-Filters und zugehörigen LS-Algorithmus programmiert. Um deren Eignung zu prüfen wurden die, zum Anlernen, notwendigen Datensätze für reale Lautsprecher gemessen. Trotz der Verwendung unterschiedlichster Testsignale – bzgl. Amplitude, Signalstatistik, Bandbreite, Block- und Filterlängen – liessen sich nur unbefriedigende Ergebnisse erzielen.

Um Einflüsse durch Messfehler auszuschliessen, wurde ein nichtlineares Lautsprechermodell [16, 17, 19], basierend auf nichtlinearen Differentialgleichungen, implementiert, so dass Datensätze erstellt werden können, die das typische lineare und nichtlineare Verhalten von realen Lautsprechern abbilden ohne mögliche Störeinflüsse, z. B. Gleichstromanteile, Netzbrummen, Hintergrund-, Störgeräusche, etc. Doch auch mit diesen Datensätzen liessen sich keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielen. (siehe Abb. 2)

Um nun die allgemeine Funktionsfähigkeit Implementierung zu überprüfen, wurde eine MK mit Einheitsimpulsen in den Teilsystemen erstellt und damit ein Testsignal gefiltert. Bis auf die Skalierung und Verzögerung der Teilsysteme konnte das Gesamtsystem so angelehrt werden, dass der Fehler zwischen Original und angelehrttem MK-Filter vernachlässigbar ist. Sobald in den Teilsystemen jedoch eine Bandbegrenzung eingeführt wurde, egal ob FIR oder IIR, werden die Ergebnisse unbrauchbar. (siehe Abb. 1)

Weitere Recherchen ergaben, dass die Autokorrelationsmatrix, welche für den LS-Algorithmus [7, 11] erstellt wird, durch die Bandbegrenzung keinen vollen Rang mehr hat, wodurch es keine eindeutige Lösung mehr gibt. Allerdings scheint hier wohl insbesondere die Kaskaden-Struktur, bzw. iterative Bestimmung der Teilsysteme, der MK problematisch zu sein, da sich die Probleme überwiegend in den höheren Ordnungen ergeben, wo die Bandbegrenzung der Teilsysteme eine Bestimmung der hintereinandergeschalteten Teilsysteme *unmöglich* macht. Da diese Problematik bei Volterra-Systemen [1, 4, 21] weniger ausgeprägt ist, könnte die MK, durch andere Statusvektoren oder ein Messverfahren mit Sinussweeps, auch für bandbegrenzte Systeme interessant werden.

Struktur (Vorschlag)

Vorläufige geplante Struktur der Arbeit:

1. Einleitung
2. nichtlineare Systeme
 1. Nichtlinearitäten bei elektrodynamischen Lautsprechern
 1. elektronische Ebene
 2. mechanische Ebene
 3. akustische Ebene
 2. Modellierung und Kompensation
 1. Allgemeines
 2. DGL

3. Wiener-/Hammerstein-Systeme
4. Volterra
5. sonstige
6. Mehrfachkaskade

3. Messungen

1. Messaufbau
 1. realer Lautsprecher
 2. virtueller Lautsprecher (reale Daten, Breitbandig)
 3. MK-Filter mit Einheitsimpulsen/Bandbegrenzt
2. Durchführung/Ergebnisse

4. Diskussion

5. Fazit und Ausblick

Zeitplan

Monat	Aufgaben	Meilensteine
Juli '13	Grundlagen, erste Recherchen	
August '13		Rücksprache Prof. Weinzierl
September '13	weitere Ausarbeitung, Recherche, Ausarbeitung 1. Exposé	Rücksprache Prof. Goertz
	Programmierung/erste Implementierung der MK/LS	
Oktober '13	Planung und Durchführung erster Messungen	Rücksprache Lindau/Prof. Weinzierl
	weitere Messungen und erste Auswertung	
November '13		

Dezember '13	weitere Auswertung und Planung des weiteren Vorgehens	Rücksprache Prof. Goertz/Makarski
Januar '14	Programmierung/Optimierung des Lautsprechermodells	
Februar '14		
März '14		
April '14		
Mai '14	Simulationen, Auswertungen, Fehlersuche, weitere Recherche	
Juni '14		
Juli '14		Zwischenergebnis: Bandbegrenzung ursächlich für Probleme mit LS
August '14	Ausarbeitung des Zwischenstandes, Aktualisierung Exposé	
September '14	letzte Simulationen, Auswertungen, Vorbereitung von Grafiken, etc.	Themenanmeldung
	Verfassen der Arbeit	
Oktober '14		
November '14	Praktikum	

Im rötlich markierten Zeitraum konnte aufgrund verschiedener Umstände nicht die vorgesehene Arbeitszeit (Mo–Fr, 6–8 Std.) investiert werden.

Literatur

- [1] Bard, D. (2005): „Characterization of nonlinearities of electroacoustic devices using Volterra kernels“ In: *International Congress on Sound and Vibration 12th, Lisbon, Portugal*.
- [2] Bard, D.; Del Nobile, M. und Rossi, M. (2005): „Compensation of nonlinearities of horn loudspeakers“ In: *Audio Engineering Society Convention 119th, New York, NY*.
- [3] Blasizzo, F.; Desii, P.; Di Cola, M. und Lastrucci, C. (2011): „Practical Applications of a Closed Feedback Loop Transducer System Equipped with Differential Pressure Control“ In: *Audio Engineering Society Convention 131st, New York, NY*.
- [4] Boyd, S.; Tang, Y. und Chua, L. (1983): „Measuring volterra kernels“ In: *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 30(8) S. 571–577.
- [5] Frank, W.; Reger, R. und Appel, U. (1993): „Realtime loudspeaker linearization“ In: *Nonlinear Digital Signal Processing. IEEE Winter Workshop Tampere, Finland*.
- [6] Frank, W. A. (1995): „An efficient approximation to the quadratic Volterra filter and its application in real-time loudspeaker linearization“ In: *Signal Processing*, 45(1) S. 97–113.
- [7] Frank, W. A. (1997): *Aufwandsarme Modellierung und Kompensation nichtlinearer Systeme auf der Basis von Volterra-Reihen*. Als Ms. gedr. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verl.
- [8] Frank, W. A.; Reger, R. und Appel, U. (1992): „Loudspeaker Nonlinearities - Analysis and Compensation“ In: *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers 26th, Pacific Grove, CA*.
- [9] Giannakis, G. B. und Serpedin, E. (2001): „A bibliography on nonlinear system identification“ In: *Signal Processing*, 81(3) S. 533–580.
- [10] Goertz, A.: „Lautsprecher“. In: Weinzierl, S. (Hg.) *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin: Springer, 2008. S. 421–490
- [11] Haykin, S. (1996): *Adaptive Filter Theory*. 3. Auflage. New Jersey (USA): Prentice-Hall.
- [12] Ishikawa, T.; Nakashima, K.; Kajikawa, Y. und Nomura, Y. (2000): „A consideration on elimination of nonlinear distortion of the loudspeaker system by using digital Volterra filter“ In: *Electronics and Communications in Japan (Part III: Fundamental Electronic Science)*, 83(2) S. 110–118.

- [13] Kaizer, A. J. M. (1987): „Modeling of the nonlinear response of an electrodynamic loudspeaker by a Volterra series expansion“ In: *Journal of the Audio Engineering Society*, 35(6) S. 421–433.
- [14] Klippel, W. (1992): „The mirror filter - a new basis for reducing nonlinear distortion and equalizing response in woofer systems“ In: *Journal of the Audio Engineering Society*, 40(9) S. 675–691.
- [15] Klippel, W. (1999): „Nonlinear adaptive controller for loudspeakers with current sensor“ In: *Audio Engineering Society Convention 106th, München*.
- [16] Klippel, W. (2001): „Prediction of speaker performance at high amplitudes“ In: *Audio Engineering Society Convention 111th, New York, NY*.
- [17] Klippel, W. (2004): „Nonlinear modeling of the heat transfer in loudspeakers“ In: *Journal of the Audio Engineering Society*, 52(1/2) S. 3–25.
- [18] Klippel, W. (2006): „Tutorial: Loudspeaker nonlinearities—causes, parameters, symptoms“ In: *Journal of the Audio Engineering Society*, 54(10) S. 907–939.
- [19] Klippel, W. (2011): „Mechanical Fatigue and Load-Induced Aging of Loudspeaker Suspension“ In: *Audio Engineering Society Convention 131st, New York, NY*.
- [20] Schetzen, M. (1980): *The Volterra and Wiener theories of nonlinear systems*. 1. Auflage. New York, Chichester (u. a.): John Wiley & Sons.
- [21] Tsujikawa, M.; Shiozaki, T.; Kajikawa, Y. und Nomura, Y. (2000): „Identification and elimination of second-order nonlinear distortion of loudspeaker systems using volterra filter“ In: *Circuits and Systems*, 5 S. 249–252.

Anhang

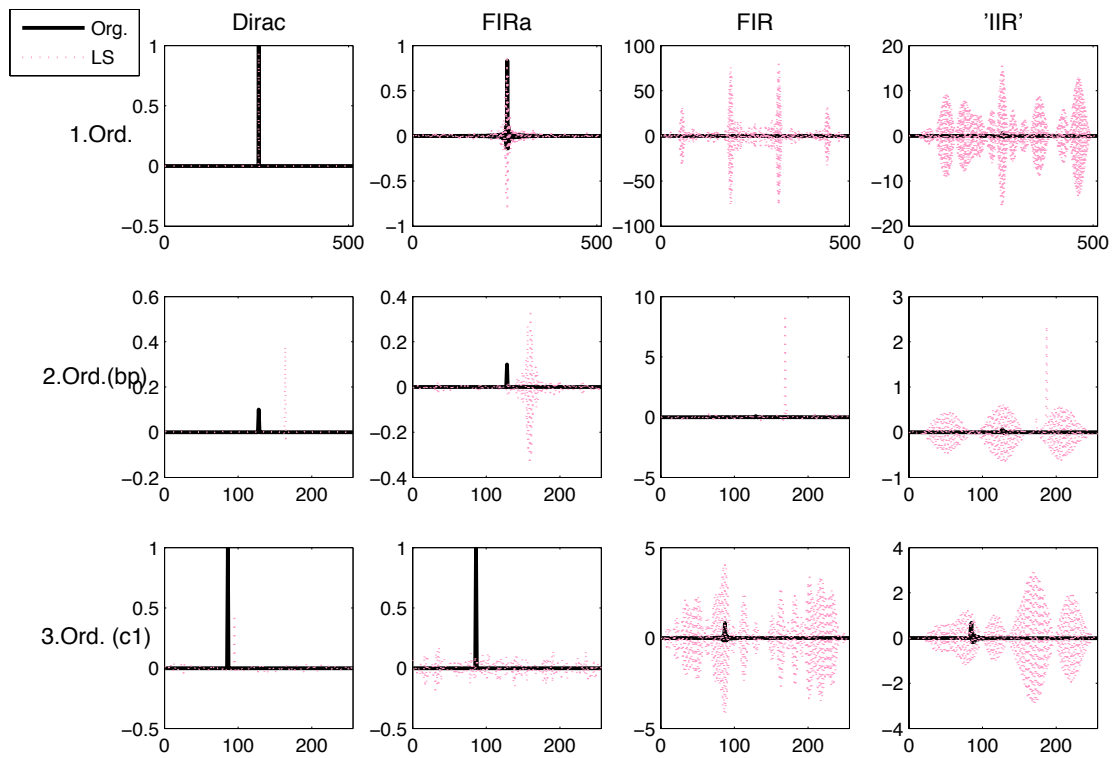


Abb. 1: Beispielhafte Teilsysteme von MKs, ohne (Dirac) und mit verschiedenen Bandbegrenzungen (FIRa–IIR), Teilsysteme mit denen das Testsignal gefiltert wurde (schwarz), Ergebnisse des LS-Algorithmus nach 500 Aktualisierungen der Statusvektoren (rosa)

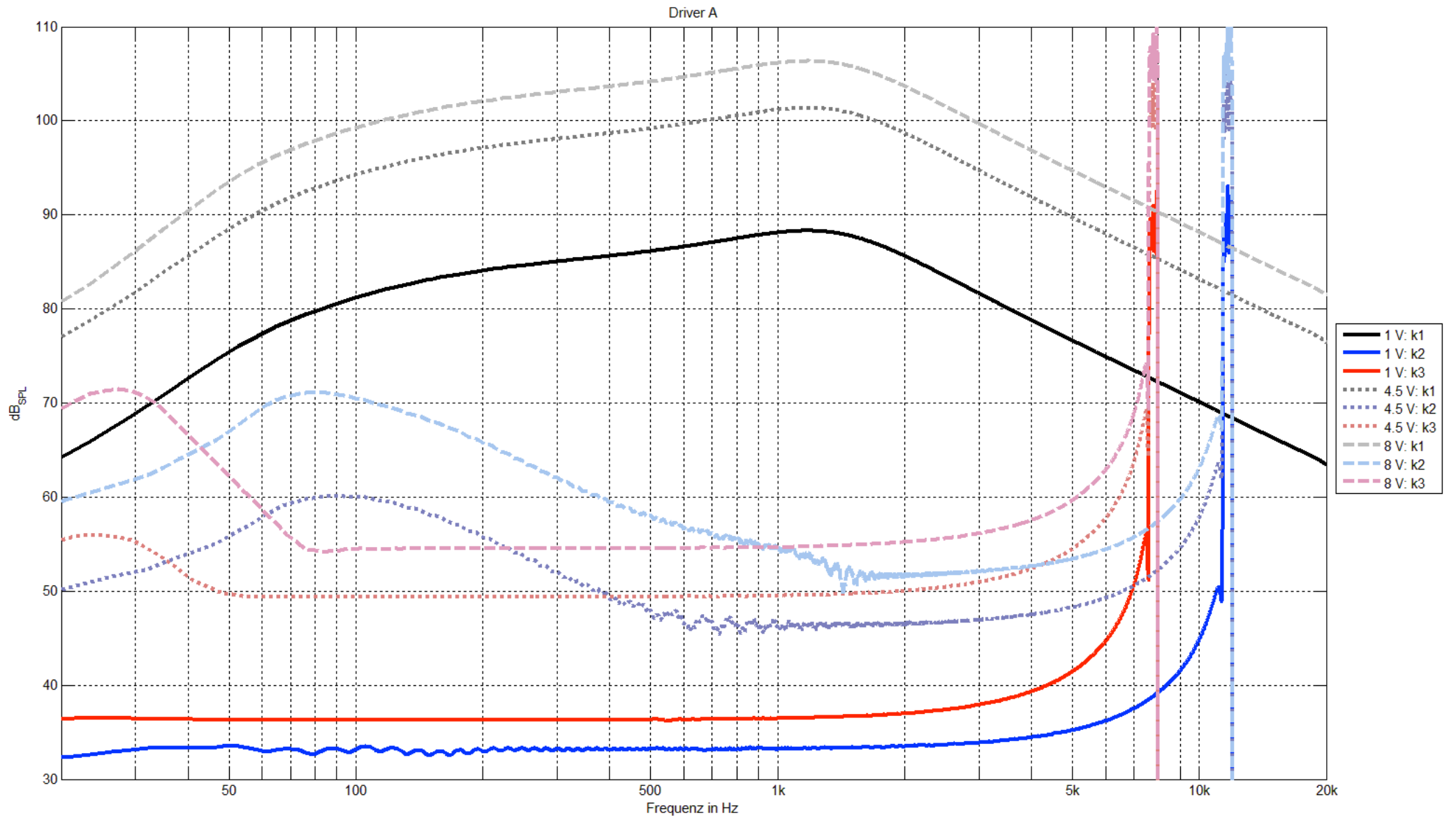


Abb. 2: Frequenzgang des Lautsprechermodells für verschiedene Eingangsamplituden, jeweils mit zweiter (blau) und dritter (rot) harmonischen Verzerrungen