

SysML-Modelle im Entwurf funktionaler Systemtests für Audioverarbeitungssysteme

Jesko G. Lamm

Bernafon AG, Morgenstrasse 131, 3018 Bern, Schweiz

Email: jla@bernafon.ch

Zusammenfassung—Systemtests für Audioverarbeitungssysteme basieren typischerweise auf Testsystemen, die Testsignale akustisch zum Prüfling übertragen und dessen akustisches Ausgangssignal aufzeichnen. Entsprechende Tests erfordern die Signalübertragung durch heterogene Übertragungsketten aus analogen, elektromechanischen und meist auch digitalen Komponenten sowohl im Prüfling als auch im Testsystem. Für den Entwurf der Systemtests wird hier angenommen, dass während eines Tests sowohl im Testsystem als auch im Prüfling die Wirkung existierender Nichtidealitäten vernachlässigbar bleiben muss. Aus einem vorgegebenen Testscenario resultieren dann Anforderungen an die Testhardware und an die zu konstruierenden Testsignale. Dieser Beitrag schlägt vor, solche Anforderungen anhand von funktionalen Modellen des Testsystem und des Prüflings zu gewinnen. Als Modellierungssprache wird die Systems Modelling Language SysML verwendet. Am Beispiel eines existierenden Testscenarios aus der Hörerätetechnik und eines entsprechenden Testsystems werden Einflüsse von Nichtlinearitäten mit exemplarischen Messungen belegt und es wird diskutiert, wie die vorgeschlagenen Modelle das Risiko für die Entstehung unbrauchbarer Messergebnisse senken können. Der gezeigte Ansatz ist nicht formal genug, um algorithmisch beschrieben zu werden, sondern ist als Heuristik für den Testentwurf zu verstehen.

I. EINLEITUNG

Jedes System der Audioverarbeitung ist nicht-ideal: Sättigungseffekte, Rauschen und Bandbegrenzungen sind typische Nichtidealitäten; bei Digitalsystemen gehören zu diesen auch Quantisierungseffekte. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Berücksichtigung solcher Nichtidealitäten im *Systemtest*, der hier als Blackbox-Test [1] definiert sei; das heißt, dass die hier betrachteten Tests das System nur über die Schnittstellen an der Systemgrenze ansprechen und keine Annahmen über seine innere Struktur treffen. Nicht für jeden Testfall sind solche Test tatsächlich möglich; bei manchen Testfällen wird es nämlich nicht gelingen, den richtigen Stimulus für einen Blackbox-Test zu finden. Daher beschränken sich die Aussagen in diesem Beitrag auf solche Systemtests, die für das zu testende System als Blackbox-Test durchgeführt werden können. Es ist hier unerheblich, ob Tests als Mittel der Verifikation im Kontext der Entwicklung oder als Mittel der Qualitätssicherung im Produktionsprozess verstanden werden.

Betrachtet wird nun unter diesen Voraussetzungen ein System (im folgenden als *Prüfling* bezeichnet), das ein Audio-Eingangssignal verarbeitet und als Resultat ein Audiosignal ausgibt. Somit muss ein zugehöriges Testsystem einen Audio-Stimulus in den Prüfling einspeisen und das resultierende Ausgangssignal überwachen. Im Rahmen dieses Beitrags wird

ein Testsystem vorgestellt, das am Beispiel eines Prüflings aus der Hörerätetechnik diese Anforderungen erfüllt.

Für die gewählte Kombination aus Testsystem und Höreräte-Prüfling soll hier am Beispiel von Sättigungseffekten gezeigt werden, wie Nichtidealitäten von Testsystem und Prüfling zusammenspielen und beim Entwurf von Test-Stimuli berücksichtigt werden können. Exemplarische Messergebnisse demonstrieren dabei die Problematik von Sättigungseffekten, die hier als Beispiel für Nichtidealitäten, genauer: für Nichtlinearitäten, herausgegriffen wurden.

Hier wird angenommen, dass Nichtlinearitäten keinen Einfluss auf Messergebnisse haben sollen. Denkbar wären nämlich auch solche Testverfahren, die gezielt eine nichtlineare Verarbeitung unterstützen [2]. Hier wird jedoch ein lineares Verhalten angestrebt, damit die Soll-Antwort des Prüflings auf das Testsignal mit den Mitteln der Theorie linearer Systeme bestimmt werden kann.

Während die Modellierung von Systemen, der modellbasierte Test und die Entwicklung von Testsystemen als eigenständige Disziplinen jeweils zum Stand der Technik gehören, betrachtet dieser Beitrag in einem disziplinenübergreifenden Modell das Zusammenspiel aus Prüfling, Testsystem und Teststimuli, wobei letztere über eine Funktion innerhalb des Testsystems modelliert werden. Dieser Beitrag enthält Beispiele niedriger Komplexität, die auch ohne den hier vorgeschlagenen Ansatz gelöst werden könnten. Sie werden hier aber trotzdem mit modellbasierten Techniken behandelt, weil das resultierende Modell vermutlich Erkenntnisse fördern kann, die auch für Probleme höherer Komplexität gelten.

Gezeigt werden Modelle in der Modellierungssprache OMG Systems Modeling Language (OMG SysMLTM), die eine systematische Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen Nichtidealitäten in Testsystem und Prüfling ermöglichen und hier am Beispiel von Sättigungseffekten angewendet werden. Als Grundlage für diese SysML-Modelle werden im folgenden Abschnitt zunächst die Modellierungssprache und der zu verwendende Ansatz der funktionalen Modellierung vorgestellt.

II. SYSML-MODELLIERUNGSANSATZ

A. Die Sprache SysML

Die Modellierungssprache SysML [3], [4] wird von der Object Management Group standardisiert. Sie leitet sich aus der UML ab und bietet spezifische Erweiterung für die Modellierung von heterogenen Systemen. Dieser Beitrag verwendet

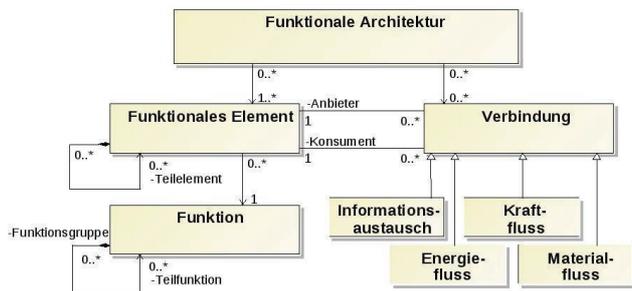


Abb. 1. Informationsmodell zur funktionalen Systemmodellierung nach [6].

“Internal Block Diagrams” (erkennbar durch die Diagrammtypkennung “ibd” in der linken oberen Ecke), mit denen der Aufbau von Systemen modelliert werden kann, und “Parametrics Diagrams” (Diagrammtypkennung “par”), mit denen sich Abhängigkeiten zwischen Systemparametern formulieren lassen. Im Bereich der Parametrics Diagrams gibt es erste Erfolge bei der automatischen Auswertung von Abhängigkeiten durch “Executable Parametrics” (z.B. [5]), aus denen sich auch für die in diesem Beitrag gezeigten Anwendungen eine zukünftige Möglichkeit zur Automatisierung vermuten lässt.

B. Funktionale Modellierung des Systems

Abb. 1 zeigt ein Informationsmodell zur funktionalen Systemmodellierung in einer funktionalen Architektur nach [6]. Betrachtet werden *funktionale Elemente*, das heißt: durch Objektflüsse miteinander verbundene, abstrakte Blöcke mit Eingangs- und Ausgangsports, deren Daten über Funktionen miteinander verknüpft sind. Eine *Funktion* sei daher im Kontext dieses Beitrags als Input-Output-Relation [7] eines funktionalen Elements verstanden. Von Signalverarbeitungssystemen existieren oft schon funktionale Modelle in der Software Simulink®, die verwendet werden können, um die funktionalen Elemente des Systems zu bestimmen. Diese können als *funktionale Blöcke* [6] in SysML modelliert und mit dem Quell-Modell in der Software Simulink® verknüpft werden [8].

Die in diesem Beitrag gezeigten funktionalen Modelle entsprechen dem Informationsmodell aus Abb. 1, das eine Ontologie möglicher Zusammenhänge darstellt. Dabei fehlen bestimmte Modellelemente (zum Beispiel sog. “Ports” der SysML), die in einer umfassenden Ontologie des Modellierungsansatzes ergänzt werden müssten. Es wird hier vermutet, dass die Zurückführung der Modelle auf eine Ontologie später die Automatisierung bestimmter Modellierungsschritte erleichtern könnte.

III. PRÜFLING

A. Beschreibung

Der Prüfling ist hier ein Audioverarbeitungssystem mit einem akustischen Eingang und einem akustischen Ausgang. Als konkretes Beispiel wird ein Hörgerät betrachtet



Abb. 2. Prüfling: Ein Hörgerät mit Störgeräuschunterdrückungsfunktion.

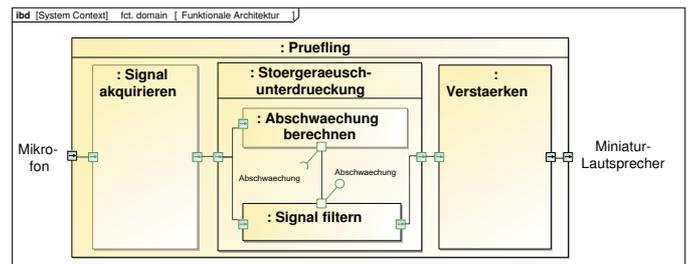


Abb. 3. Funktionales Modell des Prüflings.

(Abb. 2). Es hat eine Störgeräuschunterdrückungsfunktion, die abhängig von der Signalmodulation die Hörgeräteverstärkung in bestimmten Frequenzbändern zurücknehmen kann [9]: Frequenzbereiche mit unmodulierter Energie werden ausgefiltert, während Frequenzbereiche mit starker Modulation ungedämpft bleiben, weil ihre Modulation auf das Vorhandensein von Sprache hindeutet.

B. Funktionales Modell in SysML

Das beispielhaft betrachtete Hörgerät wurde in einem funktionalen Modell in SysML abgebildet. Abb. 3 zeigt ein entsprechendes Diagramm: Ein funktionaler Block “Signal akquirieren” modelliert die relevanten Funktionen der Eingangsstufe und der Eingangswandler, ein Block “Stoergeraesch- unterdrueckung” gehört zur gleichnamigen Funktion des Hörgeräts und der Block “Verstaerken” zu weiteren relevanten Funktionen der Signalverarbeitung, der Ausgangsstufe und der Ausgangswandler.

C. Constraints

Mit einem Parametrics-Diagramm der SysML gemäß Abb. 4 lässt sich formulieren, welche Bedingungen innerhalb des Systems gelten müssen, damit keine Sättigungseffekte auftreten: Wenn momentane Signalspitzen im Eingangssignals auftreten, darf die Ausgangsstufe nicht übersteuert werden. Der Scheitelwert des Ausgangssignals muss also unterhalb der Sättigungsschwelle der Ausgangsstufe liegen. Das Modell nach Abb. 4 wurde wie folgt hergeleitet:

- Der maximale verarbeitbare Pegel des Eingangssignals ist durch die Sättigungsschwelle der Eingangsstufe (In Abb. 4: “Saettigungsschwelle_Eingang”) gegeben.
- Im wesentlichen hängt die Veränderung des Signalpegels von der Verstärkung in der Signalverarbeitung ab. Hier wird vereinfachend angenommen, dass diese frequenz-unabhängig ist. Für die in diesem Beitrag gezeigten

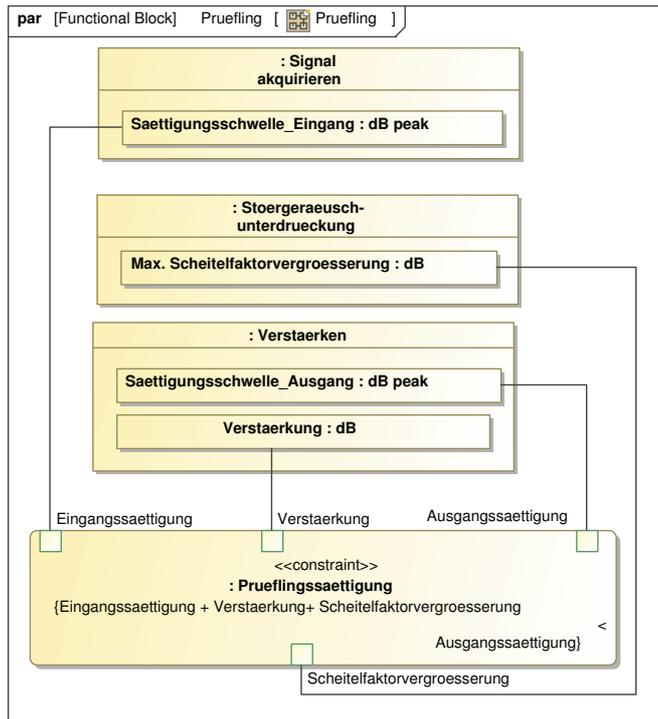


Abb. 4. Funktionale Constraints des Prüflings.

Beispiele ist diese Annahme in ausreichendem Maße gültig.

- Da eine Störgeräuschunterdrückung das Signal filtert, können sich Änderungen des Scheitelfaktors ergeben (siehe Beispiel in Abschnitt VI-A), die für die Sättigung am Ausgang relevant sind, wenn man das Bedämpfen von Signalspitzen als Sättigungseffekt ansieht. Es wäre zwar naheliegend, als Ergebnis der Dämpfung von Frequenzbändern durch ein Störgeräuschunterdrückungssystem eine Abnahme des Scheitelwerts zu vermuten, aber im Sinne einer Worst-Case-Abschätzung wird hier angenommen, dass es auch Filteroperationen gibt, die ihn trotz einer Verringerung der Gesamtenergie anheben.

IV. TESTSYSTEM

A. Beschreibung

Als Testsystem wird ein flexibles PXI™-System von National Instruments gemäß [10] verwendet: Analog-digital- und Digital-analog-Wandlernkarten erlauben die digitale Aufzeichnung analoger Signale und die analoge Wiedergabe digitaler Testmuster. Für die hier relevanten Messungen einer akustischen Übertragungsfunktion ist ein Analogausgang mit einem Audioverstärker beschaltet, der einen Messlautsprecher in einer handelsüblichen Testbox treibt; entsprechend erhält ein Analogeingang das über einen Vorverstärker aufbereitete Signal eines Messmikrofons. Die Wertebereiche und Abstrakten der Wandlerkarten sind in der Größenordnung typischer Systeme der Audioverarbeitung konfigurierbar [10].

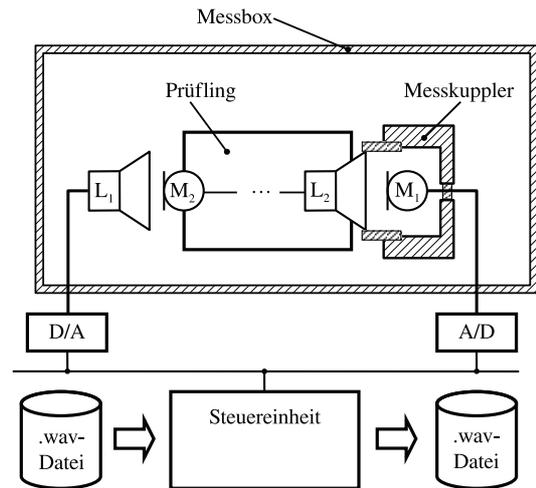


Abb. 5. Testaufbau.

Der Testaufbau ist in Abb. 5 gezeigt: Der Messlautsprecher (L_1) speist über eine Messbox ein digital-analog-gewandeltes Signal aus einer .wav-Datei (erzeugbar beispielsweise mit dem Produkt MATLAB®) in das Eingangsmikrofon (M_2) des Prüflings ein. Das akustische Signal aus dessen Ausgangswandler (L_2) wird in einem Messkupppler vom Messmikrofon (M_1) aufgenommen und dann vom Testsystem digitalisiert und als .wav-Datei gespeichert, so dass die Messdaten zum Beispiel mit dem Produkt MATLAB® weiterverarbeitet werden können. Die Aufgabe des Messkuppplers besteht einerseits darin, den elektroakustischen Baustein L_2 des Prüflings mit einer realistischen akustischen Impedanz zu beschalten, und andererseits darin, die akustische Übertragungsstrecke $L_2 - M_1$ gegen akustisches Nebensprechen aus dem Lautsprecher L_1 zu isolieren. Die oben erwähnten Mess- und Ausgangsverstärker sind zur Vereinfachung in Abb. 5 weggelassen; sie werden dort als Teil der Analog-digital- und Digital-analog-Wandler verstanden.

B. Funktionales Modell in SysML

Für die Modellierung des Testsystems wurde die Systemgrenze gegenüber Abb. 5 so erweitert, dass der Gültigkeitsbereich des Modells auch die Verarbeitung von Audio-Daten mit dem Produkt MATLAB® enthält:

- Die Funktionalität zur Generierung der benötigten .wav-Dateien mit Teststimuli wurde als Teil des Testsystems betrachtet: ihr entspricht ein funktionaler Block “Stimulus erzeugen” des Modells.
- Die Funktionalität zur Auswertung des im Test aufgezeichneten Ausgangssignals des Systems wurde ebenfalls als Teil des Testsystems betrachtet. Ihr entspricht ein funktionaler Block “Übertragungsfunktion berechnen” des Modells.

Für den im folgenden zu betrachtenden Testfall werden Messungen der Übertragungsfunktion mit periodischen Stimuli durchgeführt. Damit ergibt sich für die Berechnung der Übertragungsfunktion ein ebenfalls im Modell wiederzufindendes Verfahren nach [11], [12]:

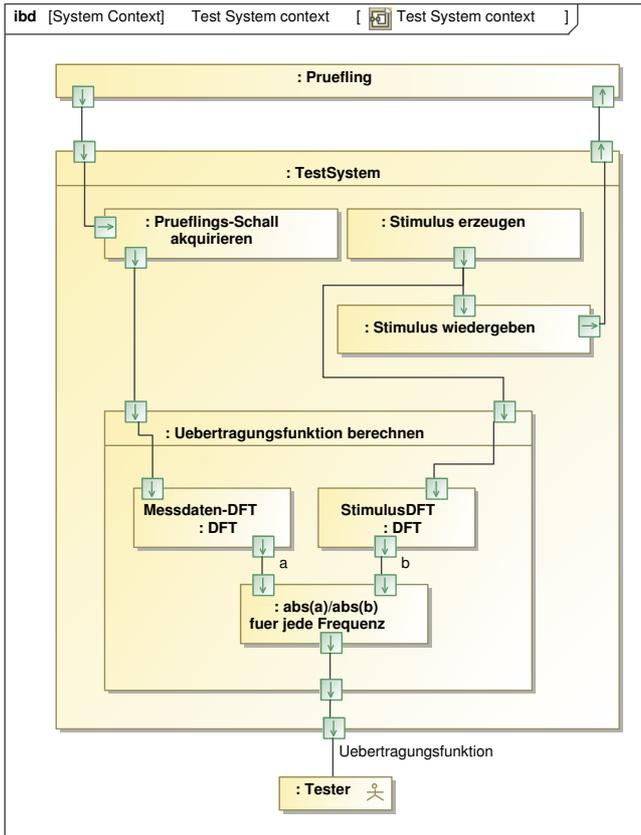


Abb. 6. Funktionales Modell des Testsystems.

Es werden die Diskreten Fouriertransformierten (DFTs) des Stimulus und des Prüflings-Ausgangssignals gebildet. Für jede Berechnungsfrequenz wird der Absolutbetrag des entsprechenden DFT-Werts vom Ausgangssignal durch den entsprechenden Absolutbetrag aus der DFT des Eingangssignals dividiert [13], [14]. Dabei wird das Analysefenster der DFT als Rechteckfenster mit einer durch die Periodenlänge des Stimulus teilbaren Fensterlänge gewählt, damit keine Leakage-Fehler entstehen [15].

C. Constraints

Wieder lässt sich formulieren, welche Bedingung zur Vermeidung von Sättigungseffekten gelten muss: der Spitzenwert des Signals darf die Sättigungsgrenze nicht überschreiten. Hier wird davon ausgegangen, dass ein Signalpegel als Effektivwert vorliegt. Deshalb muss der Scheitelfaktor des Signals berücksichtigt werden: sein Produkt mit dem Effektivwert ist der Scheitelwert, der nach Voraussetzung die Sättigungsgrenze nicht überschreiten darf. Das entsprechende Modell ist in Abb. 7 dargestellt, wobei die Multiplikation durch eine Addition im Dezibel-Bereich ersetzt wurde.

V. WECHSELWIRKUNG ZWISCHEN PRÜFLING UND TESTSYSTEM

Nachdem formuliert wurde, welche Bedingungen innerhalb des Prüflings und des Testsystems zur Vermeidung von Sättigungseffekten gelten müssen, wird nun betrachtet, welche

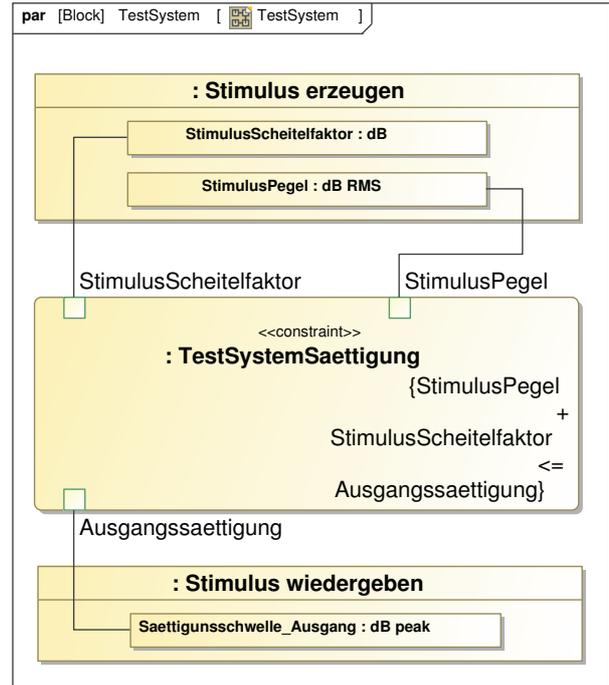


Abb. 7. Funktionale Constraints des Testsystems.

Bedingungen zwischen den beiden Systemen gelten. Diese sind wie folgt:

- Der Wertebereich des Testsystem-Ausgangs muss größer sein als der des Prüflings-Eingangs, damit alle möglichen Eingangssignale des Prüflings korrekt abgespielt werden können.
- Der Wertebereich des Testsystem-Eingangs darf nicht kleiner sein als der des Prüfling-Ausgangs, damit alle vom Prüfling erzeugbaren Signale möglichst unverfälscht — das heißt: mit der möglichen Messgenauigkeit des Testsystems — aufgezeichnet werden können.

Obwohl die aufgeführten Bedingungen trivial sind, empfiehlt es sich, sie zu modellieren, denn zusammen mit den Modellen nach Abb. 7 und Abb. 4 ergibt sich so ein Gesamtmodell des Tests. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 8 gezeigt. Es ist denkbar, aus dem Parametrics-Gesamtmodell in SysML automatisiert eine Simulation oder ein mit Tools der symbolischen Mathematik interpretierbares Gleichungssystem zu generieren [5], anhand dessen Dimensionierungsüberlegungen bezüglich des Testsystems und des zu verwendenden Teststimulus automatisiert werden könnten.

VI. BEISPIELE

A. Scheitelfaktorvergrößerung

In Abb. 9 werden Eingangs- und Ausgangssignal eines Bandpassfilters miteinander verglichen, um beispielhaft zu zeigen, dass Filteroperationen, wie sie beispielsweise von einer Störgeräuschunterdrückung in einem Hörgerät angewandt werden, den Scheitelfaktor eines Signals verändern können. Das Beispiel stammt aus [11], wo allerdings statt des Scheitelfaktors der für mittelwertfreie Signale doppelt so große

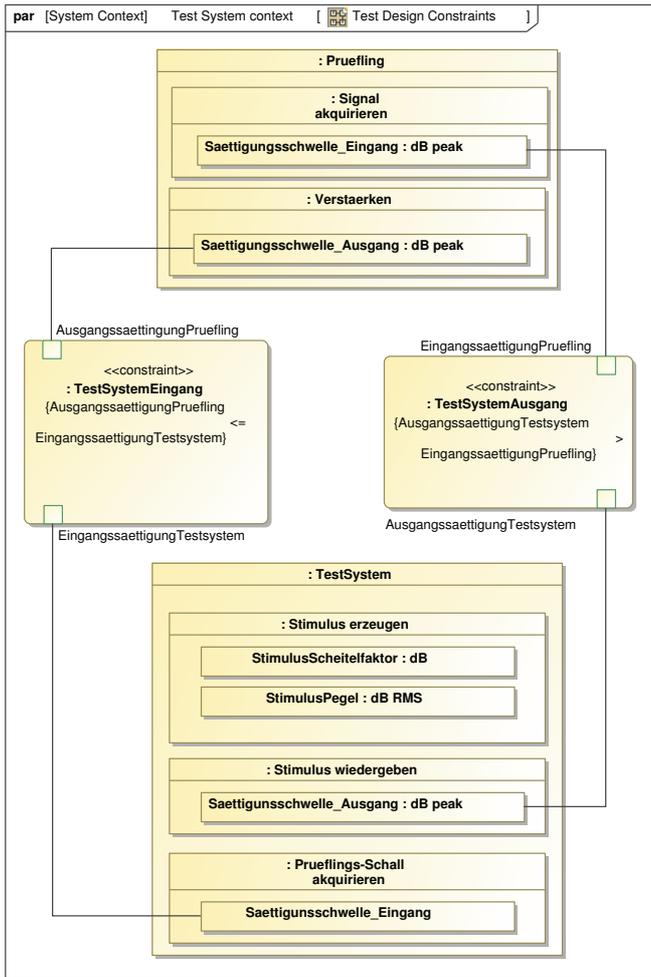


Abb. 8. Wechselwirkung zwischen Prüfling und Testsystem.

“peak factor” angegeben ist. Hier werden die Scheitelfaktoren angegeben, und zwar in den Titeln der einzelnen Diagramme von Abb. 9.

Zwar verringert sich im gezeigten Beispiel auch die Signalenergie, so dass es im Ausgangssignal des Bandpassfilters in vielen Fällen keine höheren Spitzenwerte gibt als in dessen Eingangssignal; prinzipiell ist es aber denkbar, dass Filteroperationen die Spitzenwerte von Signalen erhöhen. Dies allgemeingültig zu behandeln, würde eine detaillierte Modellierung der Signalverarbeitung erfordern, die nicht zum Abstraktionsgrad der hier gezeigten Modelle passt; deswegen sei hier vorgeschlagen, zur Parametrisierung eines Modells nach Abb. 4 einen einzigen für das Testverfahren typischen Worst-Case-Wert der Scheitelfaktorvergrößerung experimentell zu ermitteln.

B. Sättigung

Ein Beispiel für den Einfluss von Sättigungseffekten zeigt Abb. 10: Unter Variierung des Testsignalpegels wurde in einem Testverfahren nach [11], [12] die Übertragungsfunktion eines Störgeräuschunterdrückungssystems mit einem Stimulus gemessen, der die Störgeräuschunterdrückungsfunktion zur

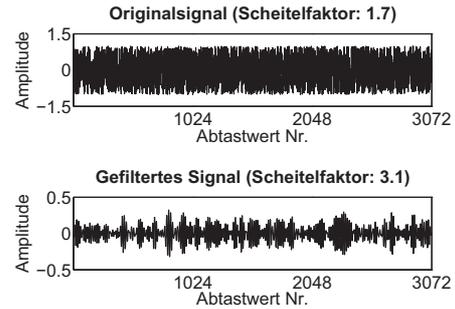


Abb. 9. Veränderung des Scheitelfaktors durch Bandpassfilterung (nach[11]).

Unterdrückung des Signals in genau einem Frequenzband provoziert.

Die in Abb. 10 gezeigten Übertragungsfunktionen wurden gemäß dem Modell in Abb. 6 ermittelt, allerdings in einer *differenziellen* Messung, d.h., indem zunächst mit ausgeschalteter und dann mit eingeschalteter Störgeräuschunterdrückung die Übertragungsfunktion gemessen und pro Frequenz der Dezibel-Messwert aus der ersten Messung von dem entsprechenden Wert aus der zweiten Messung abgezogen wurde. Der verwendete Stimulus basiert auf einem binären Signal [16], weil dieses einen minimalen Scheitelfaktor hat.

Obwohl demnach im Testentwurf darauf geachtet wurde, den Scheitelfaktor zu minimieren, gibt es ab einem bestimmten Schallpegel nennenswerte Sättigungseffekte: Während bei einem Pegel von 60 dB SPL (gemessen bandbegrenzt im anzuregenden Band) verwertbare Messdaten entstehen (Abb. 10a), kann ein 20 dB lauter abgespieltes Testsignal keine befriedigenden Ergebnisse erzielen (Abb. 10c).

VII. DISKUSSION

A. Auswahl und Parametrisierung des Testsystems

Das Testsystem ist so auswählen bzw. zu parametrisieren, dass der Wertebereich der Wandler für die im Test vorkommenden Signale ausreicht. Dies ist nichttrivial, weil dazu neben dem üblicherweise bekannten Pegel auch der Scheitelfaktor aller Testsignale benötigt wird und eine Aussage über die Signalscheitelwerte am Prüflingsausgang möglich sein muss.

B. Entwurf des Testsignals

Da Sättigungseffekte im Prüfling und in den Wandlern des Testsystems nicht von den Effektivwerten, sondern von den Scheitelwerten der vorkommenden Signale abhängen, ist beim Entwurf eines Testsignals darauf zu achten, dass dessen Scheitelfaktor möglichst klein bleibt (siehe z.B. [16]).

VIII. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Es wurde vorgeschlagen, funktionale SysML-Modelle eines Prüflings und des zugehörigen Testsystems einzusetzen, um Nichtidealitäten in Prüfling und Testsystem zu untersuchen. Falls der Prüfling bereits durch funktionale Modelle, beispielsweise in der Software Simulink®, beschrieben ist, lassen sich die SysML-Modelle des Prüflings daraus gewinnen.

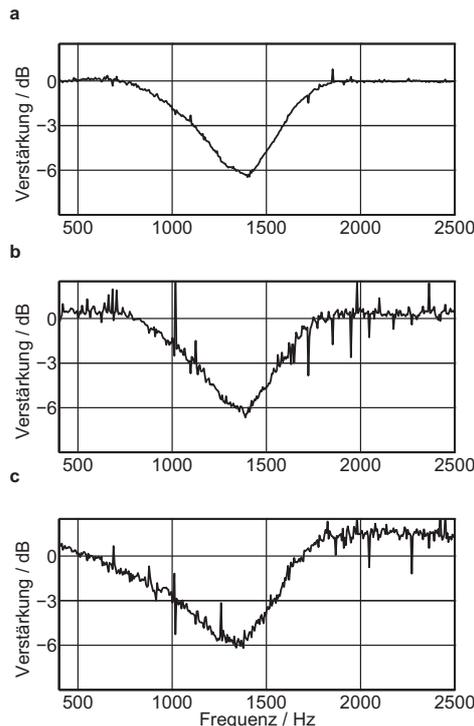


Abb. 10. Gemessene differenzielle Übertragungsfunktionen mit verschiedenen Pegeln des Testsignals im relevanten Frequenzband: a: 60 dB SPL; b: 70 dB SPL; c: 80 dB SPL

Am Beispiel von Sättigungseffekten in einem Hörgerät und dem zugehörigen Testsystem als exemplarische Nichtidealität von Prüfling und Testsystem wurde gezeigt, wie der Vorschlag in die Praxis umgesetzt werden kann. Allerdings ist die gezeigte Vorgehensweise nicht formal genug, um als allgemeingültige Methodik verstanden zu werden. Vielmehr soll dieser Beitrag Heuristiken für den Testentwurf liefern.

In Zukunft wären folgende Weiterentwicklungen der Vorgehensweise zu prüfen:

- Die Erstellung des funktionalen Modells vom Prüfling ist hier die geistige Leistung des Anwenders. Es sollte aber automatisch möglich sein, für den hier gezeigten Anwendungsfall geeignete Modelle aus bestehenden Systemmodellen abzuleiten, wie sie typischerweise in der Entwicklungsphase mit Modellierungswerkzeugen wie z.B. der Software Simulink® erstellt werden.
- Die Gewinnung der hier exemplarisch gezeigten Parametrics-Diagramme aus funktionalen Systemmodellen kann vermutlich automatisiert werden. Dazu bedarf es einer Klassifizierung von Nichtidealitäten und eines Wissensmodells, das die Zusammenhänge zwischen Nichtidealitäten verschiedener Blöcke eines funktionalen Modells in Abhängigkeit von den Verbindungen dieser Blöcke beschreibt. Eine Regel in diesem Wissensmodells wäre beispielsweise: Die Ausgangssättigung eines Blocks muss zur Vermeidung von Sättigungseffekten kleiner oder gleich der Eingangssättigung eines nachfolgenden Blocks sein.

- Die Formulierung von Anforderungen an Testsystem und Testsignale kann stärker automatisiert werden. Dafür werden Mechanismen zur automatischen Auswertung von SysML-Parametrics-Modellen benötigt. Solche Mechanismen existieren [5], aber es ist noch zu untersuchen, ob die bereits existierenden Konzepte für die genannte Anwendung geeignet sind.

Eine Weiterentwicklung des hier beschriebenen Ansatzes und die Untersuchung der oben genannten Verbesserungsvorschläge könnte den Testentwurf für Systeme der Audio-signalverarbeitung effizienter machen: wenn Aussagen über die Dimensionierung von Testhardware und den Entwurf von Testsignalen in der modellgestützten Co-Simulation von System und Testsystem gewonnen werden könnten, dann würde dies einen Teil der Messungen, die zur Erprobung eines neuen Testverfahrens nötig sind, einsparen.

IX. DANKSAGUNG

Ich danke *the Mathworks, Inc.* und *No Magic, Inc.* für die Unterstützung meiner Arbeiten über Systemmodellierung.

LITERATUR

- [1] J. G. Lamm, A. Espinoza, and A. K. Berg, “System tests for reconfigurable signal processing systems,” in *TiZ 2009: 21. Workshop für Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen*, Bremen, Germany, February 2009.
- [2] R. Müller, C. Wegener, H.-J. Jentschel, and S. Sattler, “Model-based testing and diagnosis for mixed-signal systems-in-package,” in *Zuverlässigkeit und Entwurf*, Ingolstadt, 2008.
- [3] *Object Management Group (OMG): OMG Systems Modeling Language (OMG SysML) Version 1.2. OMG Document Number formal/2010-06-01*, Object Management Group (OMG) Std., 2010.
- [4] T. Weilkiens, *Systems Engineering with SysML / UML*. Morgan Kaufmann OMG Press, 2008.
- [5] R. S. Peak, R. M. Burkhart, S. Friedenthal, M. Wilson, M. Bajaj, and I. Kim, “Simulation-based design using SysML — part 1: A Parametrics primer,” in *INCOSE Intl. Symposium*, San Diego, 2007.
- [6] J. G. Lamm and T. Weilkiens, “Funktionale Architekturen in SysML,” in *Proceedings des Tag des Systems Engineering 2010 (TdSE2010)*, M. Maurer and S.-O. Schulze, Eds. München, Germany: Carl Hanser Verlag, November 2010, pp. 109–118.
- [7] G. Patzak, *Systemtechnik, Planung komplexer innovativer Systeme*. Springer, 1982.
- [8] A. Korff, “Drei Use Cases zur Kopplung funktionaler und Systemmodelle,” in *Tag des Systems Engineering*, Bremen, Germany, Nov. 2008.
- [9] A. Schaub, *Digital Hearing Aids*. New York: Thieme Medical Publishers, 2008.
- [10] J. Lamm, C. Glück, and R. Wey, “Effiziente Verifikation mit hörbarem Erfolg,” *Swiss Engineering stz*, vol. 04/2010, pp. 22–23, 2010.
- [11] J. G. Lamm, A. K. Berg, and C. G. Glück, “Synthetic stimuli for the steady-state verification of modulation-based noise reduction systems,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2009, 2009.
- [12] J. G. Lamm, A. K. Berg, and C. G. Glück, “Synthetic signals for verifying noise reduction systems in digital hearing instruments,” in *EUSIPCO 2008: Proceedings of the 16th European Signal Processing Conference*, Lausanne, Switzerland, August 2008.
- [13] H. A. Barker and R. W. Davy, “System identification using pseudorandom signals and the discrete Fourier transform,” *Proc. IEE*, vol. 122, no. 3, pp. 305–311, 1975.
- [14] S. T. Nichols and L. P. Dennis, “Estimating frequency response function using periodic signals and the FFT,” *Electronics Letters*, vol. 7, no. 22, pp. 662–663, 1971.
- [15] R. Pintelon and J. Schoukens, *System Identification: A Frequency Domain Approach*. New York: IEEE Press, 2001.
- [16] A. Van den Bos and R. G. Krol, “Synthesis of discrete-interval binary signals with specified Fourier amplitude spectra,” *International Journal of Control*, vol. 30, no. 5, pp. 871–884, 1979.