

ASIM-Workshop STS/GMMS 2014

Treffen der ASIM/GI-Fachgruppen:

Simulation technischer Systeme

Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation

**20. bis 21. Februar 2014 in
Reutlingen-Rommelsbach**

Tagungsband

Jürgen Scheible (Hrsg.)

Ingrid Bausch-Gall (Hrsg.)

Christina Deatcu (Hrsg.)



Arbeitsgemeinschaft Simulation ASIM in der Gesellschaft für Informatik GI



Hochschule Reutlingen
Reutlingen University



Robert Bosch Zentrum für Leistungselektronik

Hochschule Reutlingen • Universität Stuttgart • Robert Bosch GmbH

ARGESIM Reports

Published by **ARGESIM** and **ASIM**, Arbeitsgemeinschaft Simulation,
Fachausschuss 4.5 der GI

Series Editor:

Felix Breiteneker (ARGESIM / ASIM)
Div. Simulation, Vienna University of Technology
Wiedner Hauptstrasse 8 - 10, A - 1040 Vienna
Tel: +43-1-58801-10115, Fax: +43-1-58801-10199
Email: Felix.Breiteneker@tuwien.ac.at

ARGESIM Report 42 ASIM Mitteilung AM 149

Titel: ASIM-Workshop STS/GMMS 2014
Treffen der ASIM/GI-Fachgruppen:
Simulation technischer Systeme
Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation

Herausgeber: Jürgen Scheible
Ingrid Bausch-Gall
Christina Deatcu
Email: christina.deatcu@hs-wismar.de

ISBN 978-3-901608-42-1

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Weg und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

© by ARGESIM / ASIM, Wien, 2014 – Hochschule Reutlingen

ARGE Simulation News (ARGESIM)
c/o F. Breiteneker, Div. Simulation, Vienna Univ. of Technology
Wiedner Hauptstrasse 8-10, A-1040 Vienna, Austria
Tel.: +43-1-58801-10115, Fax: +43-1-58801-10199
Email: info@argesim.org; WWW: <http://www.argesim.org>

Druck:

WENZEL GmbH druck . kopie . media
München

Universelle OTA-Testbench

Andreas Gerlach¹, Moritz Junge², Jürgen Scheible¹

¹Hochschule Reutlingen, Robert Bosch Zentrum für Leistungselektronik

²Universität Bremen

andreas.gerlach@reutlingen-university.de

Es wird eine universell einsetzbare Testbench zur Simulation von integrierten Schaltungen innerhalb der OTA-Schaltungsklasse (Operational Transconductance Amplifier; Transkonduktanzverstärker) vorgestellt.

Transkonduktanzverstärker sind in der analogen Schaltungstechnik weit verbreitet und daher von großer Bedeutung. Sie treten sowohl als eigenständige Schaltungen innerhalb eines Chips, sowie als Bestandteil anderer Schaltungen (z.B. als erste und zweite Stufe von Operationsverstärkern) auf. Es kann davon ausgegangen werden, dass heute kaum ein analoger oder Mixed-Signal-Chip gefertigt wird, in dem keine Transkonduktanzverstärker verbaut sind.

Die Entscheidungsfindung des Entwicklers bei der Auslegung eines OTAs beruht maßgeblich auf einer anwendungsspezifischen Simulation. Die Erstellung einer eigenen Testbench für jede Anwendung bedeutet allerdings einen hohen Zeitaufwand und erschwert den Vergleich der Simulationsergebnisse unterschiedlicher Schaltungsvarianten. Durch eine universelle Testbench kann zum einen der Zeitaufwand verringert werden, zum anderen können nun Simulationsergebnisse direkt miteinander verglichen werden. Hierdurch wird die Entscheidungsfindung des Entwicklers objektiviert und beschleunigt. Neben dem Vergleich unterschiedlicher Schaltungen innerhalb einer Technologie ist auch der Vergleich einer Schaltung in unterschiedlichen Technologien denkbar.

Die Idee einer universell anwendbaren Testbench lässt sich auch auf andere analoge Schaltungsklassen anwenden und damit als Prinzip verallgemeinern.

1 Einleitung

Beim Entwurf analoger Schaltungen ist die Simulation für die Verifikation der Funktion unersetzlich. Die Testbench als Zusammenfassung der relevanten Simulationen ist somit ein fester Bestandteil eines jeden Entwurfsablaufs. Testbenches werden vom Entwickler schaltungs- und anwendungsspezifisch erzeugt. Momentan bieten Simulationsumgebungen keine fertigen Testbenches (d.h. keine Testbenchbibliothek) zur Simulation ganzer Schaltungsklassen an.

In diesem Artikel wird eine universelle Testbench vorgestellt, die für die Simulation von Schaltungen der Schaltungsklasse Transkonduktanzverstärker (OTA) entwickelt wurde. Die Wahl der Schaltungsklasse wird in Kap. 2 kurz begründet. Kap. 3 zeigt den OTA und seine wichtigsten Varianten. Anschließend wird in Kap. 4 die universelle Testbench und der Arbeitsablauf ihrer Anwendung vorgestellt. Kap. 5 schließt mit einer Zusammenfassung der Vorteile und einem kurzen Ausblick.

2 Anwendungshäufigkeit von OTAs

Bei der Analyse aktueller Chips, in der typische ICs der Automobilelektronik untersucht wurden, wurde festgestellt, dass Schaltungen aus der OTA-Schaltungsklasse die am meisten verbreiteten analogen Schaltungen im IC-Design sind, sieht man von elementaren Grundsaltungen, wie Gate-, Source- und Drain-Schaltung sowie Stromspiegel ab.

OTA-Schaltungen kommen innerhalb eines Projekts oft in mehreren topologisch unterschiedlichen Varianten zum Einsatz. Ihr häufiger Gebrauch prädestiniert sie somit für den Entwurf einer universellen Testbench.

3 OTA-Typen

Der Transkonduktanzverstärker besteht wie ein Operationsverstärker aus einem Differenzeingangspaar, hat aber einen hochohmigen Ausgang. Sein Verhalten wird in [1] so beschrieben:

„Er verhält sich wie eine Stromquelle, deren Strom durch die Eingangsspannungsdifferenz U_D gesteuert wird.“

OTA-Schaltungen lassen sich anhand ihrer Eingangsspannungsbereiche in die drei nachfolgend beschriebenen Typen untergliedern.

- „P-Eingang“-OTA: bedingt durch pnp- oder P-Kanal-Eingangstristoren lassen sich Eingangsspannungen im unteren Versorgungsspannungsbereich analysieren, d.h. vom unteren Rail¹ (auch knapp unterhalb) bis etwa über die halbe Versorgungsspannung. Sie erreichen aber das obere Rail nicht.
- „N-Eingang“-OTA: im Gegensatz zum „P-Eingang“-OTA liegt der Funktionsbereich bei Eingangssignalen im oberen Versorgungsspannungsbereich. Sie erreichen das untere Rail nicht vollständig, funktionieren jedoch bis zur maximalen Versorgungsspannung und häufig auch darüber.
- „Rail-to-Rail-Eingang“-OTA: dieser Typ beschreibt eine Kombination der vorangegangenen OTAs. Er eignet sich für Signale innerhalb des gesamten Versorgungsspannungsbereiches, in Spezialfällen auch ober- und unterhalb der Rails (Over-the-rails-OTA).

Um bereits auf der Symbolebene zwischen den drei Typen unterscheiden zu können, wird eine optionale Erweiterung der OTA-Symbole nach Abb.1 vorgeschlagen.

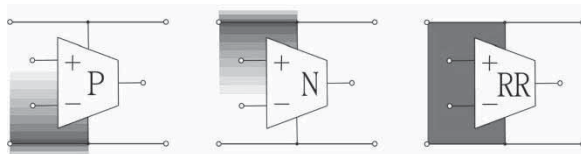


Abbildung 1. Einteilung der OTA-Topologievarianten in drei Gruppen. Von links nach rechts: Symbole für „P-Eingang“-OTA, „N-Eingang“-OTA und „Rail-to-Rail-Eingang“-OTA“. Die Schattierungen deuten den Eingangsspannungsbereich des jeweiligen OTA-Typs an.

Die hier betrachteten OTA-Varianten besitzen nur einen Ausgang. Ein derartiger Ausgang wird als un-

symmetrisch (single ended) bezeichnet. Es gibt auch OTA-Schaltungen mit symmetrischen Ausgängen. Diese besitzen zwei Ausgänge.

Die zuvor durchgeführte Chipuntersuchung hat gezeigt, dass die „P-Eingang“-OTAs die am häufigsten verwendete Gruppe bilden. Dies ist damit zu erklären, dass die meisten Signale in der Praxis nahe am unteren Rail liegen. Eine Beispielschaltung eines solchen OTA-Typs zeigt Abbildung 2.

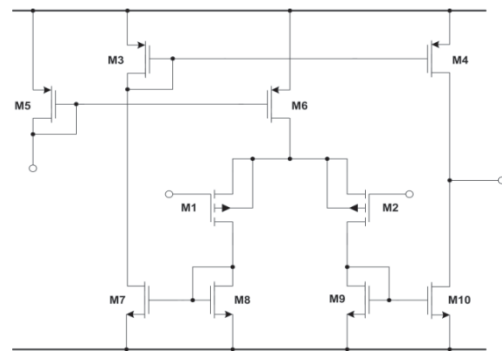


Abbildung 2. Beispiel eines „P-Eingang-OTAs“ mit symmetrischem Eingang und unsymmetrischem Ausgang.

4 Universelle OTA-Testbench

4.1 Aufbau und Anwendung der Testbench

Die hier vorgestellte Testbench besteht im Wesentlichen aus einem Schaltplan und Gleichungen, welche fest in die Simulationsumgebung eingebunden sind.

Der Schaltplan stellt die Testumgebung für die vom Benutzer definierte OTA-Schaltung bereit. Hierzu muss der Benutzer lediglich ein Schaltungssymbol für seinen zu testenden OTA erstellen und dieses in das DUT-Symbol (Device Under Test) innerhalb der Testbench einfügen. Durch diesen einfachen und zeitsparenden Vorgang ist die zu testende OTA-Schaltung in die Testumgebung eingebunden.

Zusätzlich sind in der Testbench alle zur Bestimmung der charakteristischen OTA-Kenngrößen benötigten Gleichungen eingebaut. Nach der Festlegung der arbeitspunktrelevanten Parameter Versorgungsspannung, Referenzstrom und Lastwiderstand in der Testbench werden die Simulationen durchgeführt, welche die Eingangsgrößen für diese Bestimmungsgleichungen liefern.

Die Kenngrößen und Simulationen werden in Kap. 4.3 ausführlich erläutert. Die Reihenfolge der Simula-

¹ Mit unterem und oberem Rail bezeichnet man die unteren und oberen Level der Versorgungsspannung.

tionen ergibt sich hierbei aus einer anwendungsspezifischen Priorisierung der Kenngrößen (s. Kap. 4.3).

Neben der Zeitersparnis bei der Charakterisierung bzw. Dimensionierung einzelner Schaltungen wird durch die Anwendung einer standardisierten Testumgebung auch ein direkter Vergleich der Simulationsergebnisse für unterschiedliche Schaltungen ermöglicht. Der Vergleich wird dabei durch eine tabellarisch einheitliche Darstellung unterstützt. Darüber hinaus sind die Ergebnisse auch grafisch darstellbar.

4.2 Simulationsarten

Die Testbench nutzt folgende Simulationsarten für die Berechnung der charakteristischen Größen des OTAs:

- Transiente Simulation,
- DC-Simulation,
- AC-Simulation,
- Monte-Carlo-Simulation,
- Alterungssimulation.

4.3 Ermittlbare Größen

Die Reihenfolge, in welcher die Simulationen durchgeführt werden, wird – wie bereits angedeutet – anwendungsspezifisch festgelegt. Als erstes erfolgt allerdings grundsätzlich die Berechnung der Steilheit g_m , da sie die primäre Aussage über die Funktion eines OTA macht. Aus den von der Schaltung zu erfüllenden Kriterien ergibt sich eine Gewichtung der weiteren Schaltungskenngrößen, woraus die Reihenfolge der weiteren Simulationen abgeleitet wird.

Die von der Testbench berechenbaren Größen werden nachfolgend aufgeführt und erläutert. Die Reihenfolge der Auflistung entspricht einer beispielhaften Priorisierung.

Steilheit g_m

Die Steilheit beschreibt die Änderung des Ausgangsstroms in Abhängigkeit der Differenzeingangsspannung und stellt das wichtigste Kriterium für den OTA dar. In der Testbench werden drei Methoden zur Bestimmung der Steilheit eingesetzt. Die drei Methoden basieren auf den nachfolgend beschriebenen unterschiedlichen Simulationsarten, welche alle voneinander unabhängig sind.

- Die dc-sweep-Simulation: hierbei wird die Eingangsspannungsdifferenz variiert und die Ausgangsstromänderung ausgewertet.

- Die ac-Simulation.
- Eine transiente Simulation. Aus dieser werden sog. gealterte Transistor-Modelle erzeugt, welche das für den betrachteten Fall resultierende Alterungsverhalten der Transistoren abbilden. Hiermit lässt sich eine Alterungssimulation des OTA durchführen.

Die Anwendung mehrerer voneinander unabhängiger Methoden zur Ermittlung der Steilheit g_m bietet eine Vergleichsmöglichkeit der Ergebnisse. Durch Bestätigung dieser Ergebnisse anhand unterschiedlicher Simulationsarten kann der für die Steilheit berechnete Wert abgesichert werden.

In der bisherigen Anwendung der Testbench wichen die Ergebnisse bei standardmäßigen Einstellungen und eingestelltem Arbeitspunkt über die drei Methoden nur im Promille-Bereich voneinander ab.

Eingangsspannungsbereich

Der Eingangsspannungsbereich ergibt sich aus dem Steilheitsverlauf, aufgetragen über der Gleichtakteingangsspannung u_{INCM} .

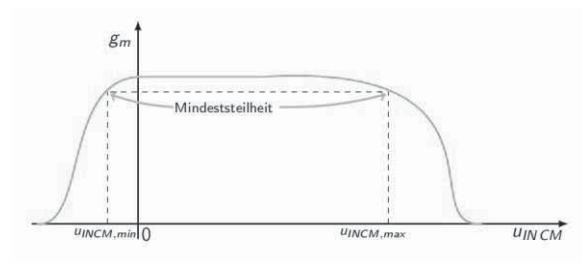


Abbildung 3. Prinzipieller Verlauf der Steilheit einer OTA-Schaltung mit „P-Eingang“.

In der Abbildung 3 wird der prinzipielle Eingangsspannungsbereich einer „P-Eingang-OTA-Schaltung“ dargestellt. Anwendungsabhängig wird eine bestimmte Mindeststeilheit gefordert. Der Schnittpunkt dieser Größe mit dem Steilheitsverlauf der Schaltung definiert den möglichen Eingangsspannungsbereich. Daraus ergeben sich die beiden Grenzen $u_{INCM, \min}$ und $u_{INCM, \max}$.

Es ergibt sich eine charakteristische „Hut-Funktion“ für den „P-Eingang“-OTA (Abb. 3) und für den „N-Eingang“-OTA. Beim „Rail-to-Rail-Eingang“-OTA ergibt sich eine Kurve, die aus der Superposition der „N-Eingang-OTA“ und „P-Eingang-OTA“-Kurven resultiert.

Maximale Stromaufnahme

Die Gesamtstromaufnahme lässt sich in die Stromaufnahme der ersten und der zweiten Stufe des OTAs aufteilen. Am Beispiel von Abbildung 2 wird eine „P-Eingang“-OTA-Schaltung dargestellt. Hierbei besteht die Eingangsstufe aus den Transistoren M1, M2, M6, M8 und M9. Die zweite Stufe besteht aus den Transistoren M3, M4, M7 und M10.

Darauf aufbauend kann auch die Leistungsaufnahme berechnet werden. Mit Hilfe der Testbench können diese Ergebnisse übersichtlich und standardisiert dargestellt werden.

Offsetspannung

„Sie gibt an, welche Differenzspannung angelegt werden muss, damit die Ausgangsspannungen gleich groß sind oder – bei unsymmetrischen Ausgängen – ein bestimmter Sollwert erreicht wird.“

Diese Definition der Offsetspannung wird in [1] für einen Differenzverstärker (der einfachste OTA) angegeben und ist auf komplexere OTA-Schaltungen übertragbar.

Es gibt zweierlei Ursachen für die Entstehung der Offsetspannung:

- topologische Ursachen,
- durch stochastische Abweichungen verursachte Ungleichheit der Bauelemente, die zum Mismatch führt.

Mit einer nominalen Simulation können eigentlich nur die topologischen Offsetspannungsursachen abgedeckt werden. Es gibt jedoch die Möglichkeit, mit einer DC-Match-Analyse auch die stochastischen Ursachen abzudecken. Eine Monte-Carlo-Simulation liefert jedoch die genaueren Ergebnisse.

Da der stochastische Anteil in der Realität immer auftritt, wird in der hier vorgestellten Testbench bei der Ermittlung der Offsetspannung auf die Monte-Carlo-Simulation zurückgegriffen, deren Ergebnis in Abb. 4 dargestellt ist.

Um einen Vergleich zu ermöglichen, wurde auch die auf der DC-Match-Simulation basierende Methode eingefügt.

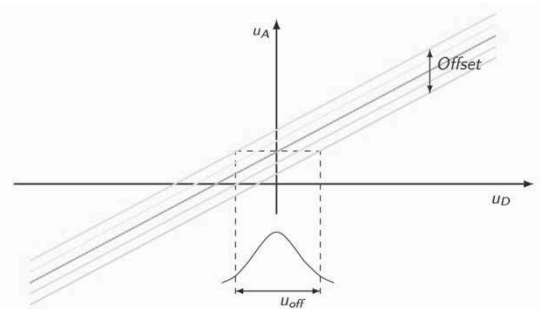


Abbildung 4. Offsetspannung u_{off} wird u.a. mittels einer Monte-Carlo-Simulation als Gauß'sche Verteilung ermittelt.

Weitere Faktoren, die die Offsetspannung beeinflussen und in der Testbench berücksichtigt werden können sind

- die Temperatur,
- Änderungen der Betriebsspannung.

Bode-Diagramm

Das Bode-Diagramm gibt den Betrag der über die Frequenz aufgetragenen Verstärkung in dB, den Phasengang und den markanten -3dB-Punkt wieder. Bei einer OTA-Schaltung bestimmt der Eingangswiderstand der nachfolgenden Schaltung den Verlauf des Bode-Diagramms und muss deswegen bei der Simulation berücksichtigt werden.

Anders ist es beim idealen Operationsverstärker; hier ist das Bodediagramm von der nachfolgenden Schaltung unabhängig.

Maximaler Ausgangsstrom

Der maximale Ausgangsstrom ist der Strom, den eine OTA-Schaltung am Ausgang maximal liefern kann. Hierfür wird die Differenz der Eingangsspannung erhöht und der dadurch verursachte Ausgangsstrom grafisch dargestellt. Der Maximalwert wird als Zahlenwert ausgegeben.

Rauschen

Das Rauschen der Transistorschaltungen besteht aus zwei Komponenten: dem 1/f-Rauschen und dem thermischen Rauschen. Beide Komponenten werden in dieser Simulation erfasst.

Common Mode Rejection Ratio

Das CMRR ist definiert als Verhältnis von Differenz- und Gleichtaktverstärkung [1].

Es wird aus der ac-Simulation bestimmt, um den kompletten Verlauf über den Frequenzbereich, in dem der OTA arbeitet, zu veranschaulichen.

Power Supply Rejection Ratio

Das PSRR beschreibt die Ausgangsspannungsänderung bei einer Veränderung der Versorgungsspannung. Ihr Wert wird ebenso wie das CMRR aus der ac-Simulation bestimmt. Dadurch wird ersichtlich, wie sich das Brummen von Störquellen unterschiedlicher Frequenzen am Ausgang auswirkt.

Eingangsaussteuerbarkeit

Das „Sweepen“ der Differenzspannung an den Eingangstransistoren hat eine hohe Gate-Source-Spannung zur Folge. Bei der Eingangsaussteuerbarkeit wird überprüft, ab welcher Spannung die Gates durchbrechen. Dies wird ermöglicht durch die in die Simulationsmodelle zusätzlich eingebaute „Smoke Detector“-Funktion.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Artikel wird eine universelle Testbench für die Simulation von OTA-Schaltungen vorgestellt. Sie besteht aus einem Schaltplan zur Einbindung einer benutzerdefinierten OTA-Schaltung, sowie aus Gleichungen für die Berechnung der charakteristischen Größen einer solchen Schaltung. Hierdurch bietet sie die Möglichkeit einer unkomplizierten, standardisierten und schnellen Überprüfung einer OTA-Schaltung.

Der mit der Erstellung individueller Testbenches verbundene Zeitaufwand lässt sich hiermit deutlich reduzieren. Darüber hinaus bietet die universelle Testbench standardisierte Testbedingungen in einer verifizierten Testumgebung. Dies führt zu einer verbesserten Entwurfssicherheit und ermöglicht zudem einen objektiven Vergleich zwischen verschiedenen Schaltungsvarianten. Sogar ein technologieübergreifender Vergleich ist möglich.

Der Ansatz universeller Testbenches lässt sich prinzipiell auf andere Schaltungsklassen übertragen. Die Entscheidung, den Aufwand zur Erstellung einer universellen Testbench zu betreiben, muss jedoch für weitere Schaltungsklassen individuell getroffen werden. Sie hängt in erster Linie vom Verwendungsgrad der Schaltungsklasse ab, aus der sich die erzielbare Kosten-Nutzen-Relation ergibt. Der erzielbare Zuge-

winn an Entwurfssicherheit kann ebenfalls eine entscheidende Rolle spielen.

In Zukunft wäre denkbar, universelle Testbenches für weitere Schaltungsklassen in Form einer Bibliothek innerhalb der Entwicklungsumgebung anzubieten. Hierdurch hätten Entwickler die Möglichkeit, das Verhalten der unterstützten Schaltungen schnell und unkompliziert zu überprüfen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] U. Tietze, Ch. Schenk. *Halbleiter Schaltungstechnik*. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2002.
- [2] X. Rasmus. *Demystifying the Operational Transconductance Amplifier*. Texas Instruments Application Report, 2013.