



Holger Mielenz (Autor)

Verhaltensmodellierung in der Kraftfahrzeugtechnik mittels datenbasierter Methoden



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/1208>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Einleitung

Mikroelektronische Produkte gewinnen in der Kraftfahrzeugtechnik zunehmend an Bedeutung. Besonders eindrucksvoll lässt sich diese Tendenz durch die neuen Produktgenerationen zur Fahreffizienz, Fahrsicherheit und des Fahrkomforts illustrieren, die heute wichtige Faktoren für die Wettbewerbsfähigkeit eines Fahrzeugherstellers darstellen [35]. Diese Erneuerungen manifestieren sich einhergehend mit einem rasanten Ansteigen unterschiedlichster Sensoren im Automobil, die für eine Überwachung relevanter Betriebszustände eingesetzt werden. Gleichzeitig ist es für die Produktentwicklung unabdingbar, die Kontrollfunktionen zu diesen Systemen mit Hilfe anwendungsspezifischer integrierter Schaltungen, sogenannter ASIC's (*application specific integrated circuits*), umzusetzen. Somit ergeben sich für jede neue Produktgeneration neue Herausforderungen für die Mikrosystemtechnik, die neben dem Bedarf an verbesserten Sensor-konzepten hohe Anforderungen an die Mikroelektronik stellen.

Unterstützt wird diese Entwicklung durch eine kontinuierliche Verbesserung der Produktionsprozesse, die durch stetig sinkende Strukturbreiten zunehmend komplexere Schaltungen auf immer kleineren Chipflächen realisierbar machen. Dem gegenüber steht die Schaltungsentwicklung, die im Vergleich zu der Schaltungsfertigung eine deutlich geringere Produktivitätssteigerung aufweisen kann [126]. Das daraus resultierende Missverhältnis zwischen entwickelbaren und produzierbaren Schaltungen wird als Entwurfslücke bezeichnet. Für die Anfänge des 21. Jahrhunderts konnte jährlich eine fertigungstechnisch umsetzbare Komplexitätssteigerung von ca. 60% ermittelt werden, wohingegen im Schaltungsentwurf eine Steigerung von ca. 20% kaum beherrschbar ist [126] [142]. Vor diesem Hintergrund gewinnt die elektronische Entwurfsautomatisierung (*electronic design automation*, EDA) zusehends an Bedeutung [138]. Es müssen neue Methoden und Werkzeuge des rechnergestützten Entwurfsprozesses entwickelt werden, damit die heutigen und zukünftigen Herausforderungen des Entwurfs bewältigt werden können [17] [47].

1.1 Motivation

Neben den begrenzenden Auswirkungen der Entwurfslücke auf die Produktentwicklung unterstreichen eng gefasste *time-to-market* Vorgaben zusätzlich den Bedarf für einen effizienteren Schaltungsentwurf. So müssen zunehmend komplexere Aufgaben in stetig kürzeren Entwicklungszeiten umgesetzt werden [17] [47]. Ein bedeutender Ansatz zur Kompensation der Entwurfslücke wird im automatisierten Entwurfsprozess gesehen [138]. Heutzutage ist für digitale

Schaltungen ein automatisierter Entwurf in weiten Teilen möglich, wohingegen ein geschlossener Syntheseprozess für analoge und Analog/Mixed-Signal Systeme (A/MS-Systeme) noch in weiter Ferne liegt [35] [114].

Für die Etablierung eines automatisierten Entwurfsprozesses analoger und A/MS-Systeme besitzt die Automatisierung der Entwurfsverifikation eine hohe Bedeutung. Trotz einer intensiven Entwicklung ist die Entwurfsverifikation durch die stetig steigende Komplexität der Systeme immer aufwendiger geworden und beansprucht heute bis zu 70% der Entwurfszeit. Insbesondere kann davon ausgegangen werden, dass der Entwurfsaufwand analoger Komponenten bei A/MS-Schaltungen mittlerweile bis zu 80% des Gesamtaufwandes beträgt und dies obwohl die Chipfläche, die von diesen analogen Komponenten belegt wird, nur etwa 20% der Gesamtfläche einnimmt. Hieraus ist ein potenziell hoher wirtschaftlicher Nutzen für effiziente Verfahren zur Verifikation von A/MS-Systemen abzuleiten [34] [141]. Zusätzlich bestärkt werden diese Eindrücke durch einen steigenden Bedarf an anwendungsspezifischen integrierten Schaltungen mit einem jährlichen Wachstum um mehr als 30% [32].

Wie Abbildung 1.1 A) zu entnehmen ist, kann der Entwurf von A/MS-Systemen in vier Entwurfsebenen eingeteilt werden. Ausgehend von einer informellen Spezifikation, meist in Form eines Lastenhefts, wird ein strukturelles Gesamtmodell des Systems erstellt, das als ausführbare Spezifikation zur frühzeitigen Überprüfung des Entwurfs herangezogen werden kann. Mit dem Voranschreiten zur Blockebene erfolgt eine Detaillierung des Entwurfs, indem durch eine Partitionierung des Systems funktional zusammenhängende Blöcke definiert und erste Architekturentscheidungen getroffen werden. Diese werden auf der Transistorebene detaillierter beschrieben und dimensioniert. Mit der Transformation auf die Layoutebene werden alle relevanten parasitären Einflüsse betrachtet, so dass eine optimale Belegung des Siliziums ermöglicht wird. Die Überprüfung der Spezifikationskonsistenz eines jeden Entwurfsschritts durch die darüberliegende Entwurfsebene wird als Bottom-Up Verifikation bezeichnet [32] [33] [36]. Die Entwicklung durchgängiger Top-Down-Entwurfsmethoden für integrierte A/MS-Systeme erfordert einen in allen Ebenen durch Werkzeuge und Entwurfsmethoden unterstützten Ablauf, der mit den im digitalen Schaltungsentwurf verfügbaren EDA-Methoden vergleichbar ist [32]. Ein solches Vorgehen konnte methodisch für einfache Filter- und Reglerschaltungen erfolgreich etabliert werden [32] [36], wobei in [36] die Layoutebene nicht berücksichtigt wurde. Jedoch lassen sich nicht alle Teilschritte in hohem Maße automatisieren [32] [36], sodass eine industrielle Anwendung heutzutage noch nicht möglich ist. So werden unter anderem weitere Arbeiten in der Bottom-Up Verifikation benötigt, um einem automatisierten Verifikationsprozess einen Schritt näher zu kommen.

Das Fehlen eines durchgängigen Top-Down Entwurfsprozesses für A/MS-Systeme führt dazu, dass Schaltungskomponenten in der industriellen Praxis manuell über einen zeitaufwendigen und fehleranfälligen Prozess strukturiert und dimensioniert werden [35] [89]. Neben den hohen Entwurfskosten ist eine erfolgreiche Entwicklung in besonderer Weise vom Expertenwissen der Entwickler abhängig [74]. Ausgehend von einer informellen Spezifikation werden funktional zusammengehörige Komponenten manuell zu einem Schaltungsblock gruppiert und

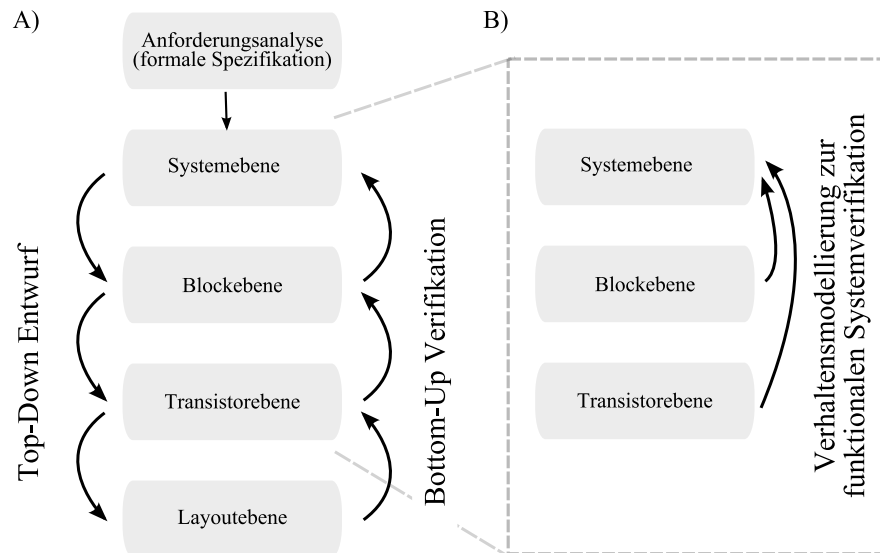


Abbildung 1.1: A) Top-Down Entwurf und Bottom-Up Verifikation von Analog/Mixed-Signal Systemen nach [32], B) Der Themenschwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt im Bereich der funktionalen Verhaltensmodellierung zur Systemverifikation.

separat auf Transistorebene entworfen. Da eine funktionale Verifikation des Gesamtsystems auf Transistor- und Blockebene meist zu sehr langen Rechenzeiten führt, werden rechenzeitkritische Komponenten durch Verhaltensmodelle substituiert, um kürzere Simulationszeiten zu ermöglichen. Verhaltensmodelle finden vordergründig in der funktionalen Verifikation von Gesamtsystemen Verwendung, indem sie Systemkomponenten auf einem hohen Abstraktionsniveau beschreiben (siehe Abbildung 1.1 B)), worüber die Simulation komplexer Systeme beschleunigt werden kann. Gleichzeitig kann durch die Verhaltensmodellierung eine Vereinheitlichung aller Komponenten in einer geschlossenen Simulationsumgebung erreicht werden, worüber die Simulation des Gesamtsystems erst ermöglicht wird [85]. Da keine effizienten Verfahren zur automatisierten Generierung schaltungsspezifischer Verhaltensmodelle existieren, werden diese von erfahrenen Entwicklern manuell erstellt, was mit einem hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden ist.

1.2 Zielsetzung dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit untersucht Verfahren des maschinellen Lernens, die im Folgenden auch als datenbasierte Modellierung bezeichnet werden, auf ihr Potenzial zur Erstellung von Verhaltensmodellen in der Kraftfahrzeugtechnik. Die Kriterien einer Nutzwertanalyse werden für die qualitative Bewertung der Leistungsfähigkeit der datenbasierten Modellierung herangezogen und diese mit gängigen Ansätzen der Verhaltensmodellierung verglichen.

Ein zentrales Bewertungskriterium für die entwickelte Methodik ist im Automatisierungsgrad

der Modellerstellung zu finden. Für weitestgehend beliebige Schaltungen sollen automatisiert Verhaltensmodelle erstellt werden können, die in der funktionalen Verifikation zum Einsatz kommen. Weiterhin sollen die generierten Modelle zu einer Reduktion der Simulationszeiten beitragen und eine Aussage über den zu erwartenden Modellfehler erlauben.

Gegenwärtige Produkte der Kraftfahrzeugelektronik beschreiben heterogene Systeme, die neben A/MS-Komponenten auch mechanische und hydraulische Subsysteme besitzen [35] und gleichfalls hohe Anforderungen an die Systemverifikation stellen. Vor diesem Hintergrund soll die Anwendbarkeit der datenbasierten Modellierung neben rein elektronischen Komponenten auch auf heterogene Systeme untersucht werden. Damit eine barrierefreie Anwendung der generierten Verhaltensmodelle in allen relevanten Simulatoren der Kraftfahrzeugtechnik erzielt werden kann, ist die Portierbarkeit der generierten Modelle in unterschiedliche Simulationsumgebungen von hoher Bedeutung. Vor diesem Hintergrund soll das Potenzial der datenbasierten Verhaltensmodelle untersucht werden, um die Simulation eines heterogenen Gesamtsystems auf einen Simulator zu konzentrieren.

Neben der bisher thematisierten Verwendung der Verhaltensmodelle zur funktionalen Verifikation von A/MS-Systemen können datenbasierte Verhaltensmodelle auch in produktrelevanten Bereichen zur Steigerung der Entwurfsproduktivität beitragen. Für viele Anwendungen in der Kraftfahrzeugtechnik hat sich die Verlagerung komplexer Funktionen auf Softwarekomponenten bewährt, wodurch aufwändige ASIC-Entwicklungen vermieden werden [35] [65]. In der vorliegenden Arbeit soll die Applikation datenbasierter Modelle auf die Signalanalyse automotiver Sensoren untersucht werden. Eine hardwarenahe Integration datenbasierter Modelle auf einen Mikrocontroller eröffnet neue Wege für den Entwurf signalanalytischer Komponenten in Sensorprojekten, die meist auf Softwareapplikationen beruhen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in 6 Kapitel. In Kapitel 2 wird der Stand der Technik zu fünf Modellierungsmethoden aufgezeigt, die für die Erstellung von Simulationsmodellen in der Kraftfahrzeugtechnik herangezogen werden können. Über eine vergleichende Bewertung dieser Methoden nach den Anforderungen an Verhaltensmodelle in der Automobilelektronik wird die Untersuchung datenbasierter Modelle motiviert. Daran anschließend beschreibt Kapitel 3 die theoretischen Grundlagen der Systemtheorie und der datenbasierten Modellierung, die für das weitere Verständnis dieser Arbeit nötig sind. Gegenstand von Kapitel 4 ist die Konzeption und Realisierung eines automatisierten Verfahrens zur Generierung von Verhaltensmodellen. Ergänzend wird ein Lernalgorithmus für diskretisierte Support-Vektor-Maschinen vorgestellt. Diesem Abschnitt schließt sich in Kapitel 5 die Anwendung des Verfahrens auf ausgewählte Entwicklungsbeispiele an. Abgeschlossen wird diese Arbeit durch Kapitel 6, das eine Zusammenfassung der bearbeiteten Themen vorstellt und einen Ausblick auf weiterführende Fragestellungen gibt.

2 Stand der Technik

Nachdem das vorausgehende Kapitel die Bedeutung der Verhaltensmodellierung für die Systemverifikation mikroelektronischer Komponenten hervorgehoben hat, werden nachfolgend unterschiedliche Modellierungsmethoden zur Erstellung von Simulationsmodellen charakterisiert. Da heute keine effizienten Verfahren für die Verhaltensmodellierung analoger, A/MS oder heterogener Systeme existieren [84], werden in Abschnitt 2.1 die wesentlichen Anforderungen der Entwicklung an die Verhaltensmodellierung abgeleitet und in den nachfolgenden Abschnitten herangezogen, um eine qualitative Bewertung der gängigen Modellierungsmethoden nach ihrem Nutzen für die Verhaltensmodellierung durchzuführen. In Abschnitt 2.3 wird eine Gesamtbetrachtung dieser Analyse vorgestellt und die Untersuchung der datenbasierten Modellierung für die Erstellung von Verhaltensmodellen motiviert.

2.1 Modellierungsebenen und Anforderungen der Verhaltensmodellierung

Die Erstellung von Simulationsmodellen kann auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen erfolgen, die sich im Detaillierungsgrad der physikalischen Eigenschaften des darzustellenden Systems unterscheiden. Aus diesem Grund lassen sich in Abhängigkeit des gewählten Abstraktionsniveaus charakteristische Eigenschaften für eine Modellierungsmethodik und die dadurch hervorgebrachten Modelle ableiten. In der vorliegenden Arbeit wird unter einem Verhaltensmodell ein Simulationsmodell für A/MS und heterogene Systeme verstanden, das das Systemverhalten mit der vom Anwender bestimmten Detaillierung beschreibt. Damit in Abschnitt 2.2 die Eigenschaften gängiger Modellierungsverfahren für die Erstellung von Verhaltensmodellen bewertet werden können, wird nachfolgend eine Hierarchie für die Modellierungsebenen beschrieben, sowie die Anforderungen der Entwicklung an die Verhaltensmodellierung erläutert.

Für die Schaltungsverifikation ist die Simulation im Zeitbereich, die Transientensimulation, von hoher Bedeutung, da sie die Analyse des zeitabhängigen Strom- oder Spannungsverlaufs einer entworfenen Schaltung ermöglicht. Für komplexe analoge Systeme sind auf Transistorebene jedoch sehr zeitaufwendige Simulationen möglich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in der Analogsimulation Schaltungen mit Hilfe von Netzlisten beschrieben werden, die die Topologie einer Schaltung repräsentieren. Während einer Simulation werden die Ströme und Spannun-

gen der Schaltungsknoten numerisch berechnet. Dafür werden die Bauteil- und Topologieinformationen in ein Differenzialgleichungssystem (DGS) überführt, das durch den Simulator zu jedem Zeitpunkt gelöst werden muss. Die Bauteilinformationen stellen hierbei klassische Beschreibungen der Strom- und Spannungsabhängigkeiten von Transistoren, Widerständen oder Kondensatoren, z.B. $i_C = \frac{d}{dt}(C * u_1(t) - u_2(t))$, dar. Für die Ableitung eines DGS werden unterschiedliche Verfahren herangezogen, die jedoch alle auf den Kirchhoff'schen Knoten- und Maschengesetzen beruhen [62] [121] [135]. Ein DGS besitzt dabei stets die klassische Form

$$\dot{\vec{x}} = f(t, \vec{x}, \vec{u}) \quad (2.1)$$

$$g(t, \vec{x}, \vec{y}, \vec{u}) = 0, \quad (2.2)$$

wobei t die Simulationszeit, \vec{x} die Zustandsvariablen, \vec{u} die Eingangssignale und \vec{y} die Ausgänge beschreiben. Für die Simulation im Zeitbereich muss das DGS zu jedem Zeitpunkt numerisch gelöst werden, was aus mathematischer Sicht eine sehr anspruchsvolle Aufgabe darstellt. Simulatoren bedienen sich daher meist Verfahren zur Linearisierungen sowie iterativer Näherungsverfahren [66].

Die besondere Komplexität der Simulation von elektronischen Schaltungen mithilfe eines DGS kommt durch diverse Randbedingungen und Schaltungsklassen zum tragen. So stellen z.B. hohe Frequenzen harte Anforderungen an die Iterationsverfahren, da Signale mit großen Steigungen auftreten und die Konvergenz des Löser nur mit kleinen Simulationszeitschritten zu erreichen ist. Aus diesem Grund sind auch A/MS-Systeme auf Bauteilebene nur schwer in Analogsimulatoren umsetzbar. Daher sind für analoge, digitale und A/MS-Systeme unterschiedliche Abstraktionsebenen bekannt [62], die eine Kategorisierung von Modellen unterschiedlicher Detaillierungstiefe ermöglichen [74] [97].

Da im Rahmen dieser Arbeit auch Systeme nicht-elektronischer Domänen betrachtet werden, soll im Folgenden eine Einteilung der Abstraktionsniveaus für beliebige technische Systeme vorgestellt werden, die sich an den Arbeiten von [83] orientiert. Nach Abbildung 2.1 können die Abstraktionsniveaus in vier Ebenen kategorisiert werden. Man unterscheidet die physikalische Ebene, die phänomenologische Ebene, die ereignisbasierte Ebene und die funktionale Ebene. Die physikalische Ebene beschreibt das Verhalten einer Komponente über partielle Differentialgleichungen. Da die zugehörigen Systemvariablen Felder mit räumlicher Ausdehnung darstellen, werden meist räumlich verortete Probleme formuliert. Die phänomenologische Ebene greift wie die physikalische Ebene konservative Modelle auf. Im Unterschied hierzu werden jedoch auf dieser Ebene keine partiellen Differentialgleichungen eingesetzt, sondern Netzwerke mit Komponenten endlichen Volumens betrachtet. Auf der ereignisbasierten Ebene werden Modelle über eine endliche Anzahl von Zustandsgrößen beschrieben. Dabei werden lediglich nichtkonservative Systemvariablen verwendet, die somit gerichtete Größen darstellen. Modelle der funktionalen Ebene beinhalten wertdiskrete, gerichtete Zustandsgrößen, die einer nichtkonservativen Beschreibung folgen. Im Unterschied zu der ereignisbasierten Ebene stellt die Modellausgabe keine Funktion der Zeit dar.

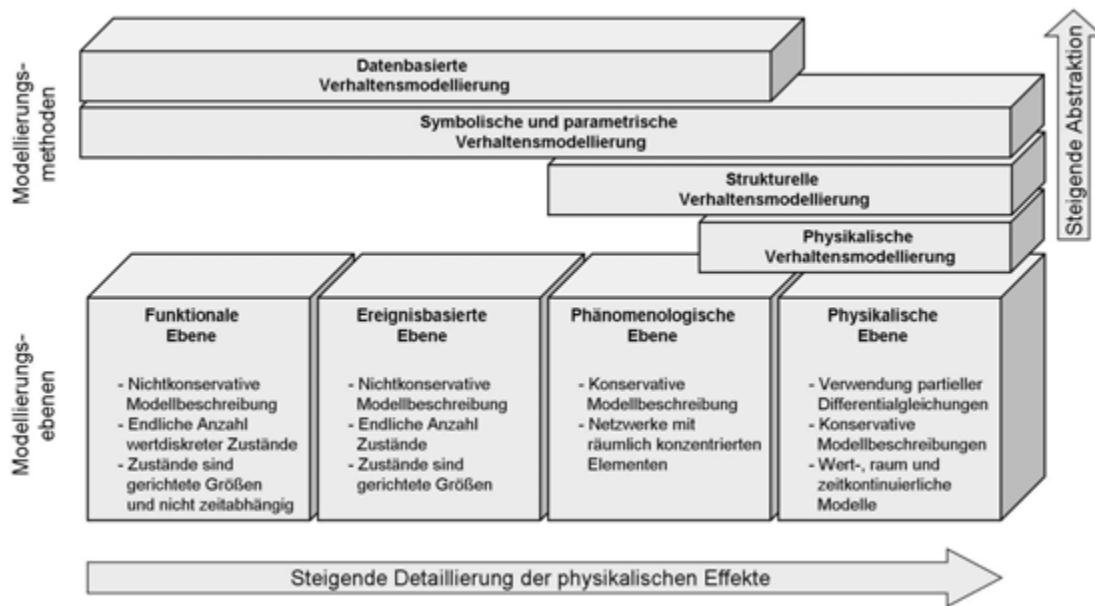


Abbildung 2.1: Modellierungsmethoden zur Erstellung von Verhaltensmodellen und zugehörige Modellierungsebenen.

Nach Abbildung 2.1 sind diesen Modellierungsebenen derzeit fünf Methoden zuzuordnen, die für die Verhaltensmodellerstellung in der Kraftfahrzeugtechnik berücksichtigt werden können. Hierzu zählen die physikalische, strukturelle, symbolische, parametrische und datenbasierte Modellierung. Damit die Eignung dieser Verfahren für unterschiedliche Anwendungsfelder der Entwicklung bewertet werden können, werden nachfolgend Anforderungen der Entwicklung an die Verhaltensmodellierung [121] definiert, die für eine qualitative Bewertung der Modellierungsmethoden herangezogen werden. Zur Steigerung der Übersicht wird dabei zwischen der Modellierungsmethodik und den Eigenschaften der generierten Modelle unterschieden.

Die Methodik zur Erstellung von Verhaltensmodellen sollte folgende Aspekte berücksichtigen:

- **Automatisierte Modellgenerierung:** Die Automatisierung der Modellgenerierung besitzt ein hohes Potenzial für die Verbesserung der Entwurfsproduktivität und -qualität.
- **Anwenderschnittstelle:** Die Schnittstelle zwischen dem Anwender und den Algorithmen zur Modellgenerierung sollte eine nutzerfreundliche Konzeption aufweisen, die eine schnelle Einstellung der Algorithmen auf Basis einer gegebenen Spezifikation erlaubt.
- **Vorwissen:** Der Anwender sollte auch mit einem geringen Vorwissen über das zu modellierende System in der Lage sein, ein Verhaltensmodell erstellen zu können.
- **Modellierungsaufwand:** Die Anwendung der Modellierungsmethodik sollte eine möglichst zeit- und kosteneffiziente Erstellung von Verhaltensmodellen ermöglichen. Als Vergleichsbasis kann die derzeit verbreitete manuelle Vorgehensweise herangezogen werden.

- **Systemunabhängigkeit:** Eine Generalisierung der Modellierungsverfahren auf unterschiedliche physikalische Domänen, z.B. auf elektrische und mechanische Systeme, sollte möglich sein.

Für eine gewinnbringende Anwendung der erstellten Verhaltensmodelle sind folgende Kriterien von Bedeutung:

- **Speed-up:** Die Verhaltensmodelle sollten im Vergleich zur Originalschaltung einen Rechenzeitvorteil (*speed-up* Faktor) ermöglichen.
- **Genauigkeit:** Die Verhaltensmodelle sollten eine hohe Genauigkeit bezüglich der detaillierteren Originalsysteme besitzen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass bei der Modellierung nur die gewünschten physikalischen Eigenschaften berücksichtigt werden.
- **Portierbarkeit:** Die Anwendung der generierten Modelle sollte ohne größeren Aufwand in diversen Simulatoren möglich sein.
- **Skalierbarkeit:** Die Modelle sollten eine anwendungsbezogene Skalierung der darzustellenden physikalischen Eigenschaften zulassen, wozu beispielsweise der Grad nichtlinearer und dynamischer Charakteristika der Originalsysteme zählen.
- **Wiederverwendbarkeit:** Die Eigenschaften der generierten Modelle sollten derart nachvollziehbar sein, dass eine weiterführende Verwendung möglich ist. Dafür sollten beispielsweise die spezifikationsrelevanten Parameter der Modellierung für jeden Anwender verständlich sein.

2.2 Methoden zur Erstellung von Verhaltensmodellen

Die Kriterienliste der Verhaltensmodellierung aus Abschnitt 2.1 wird in den folgenden Abschnitten herangezogen, um die Eigenschaften der betrachteten Modellierungsmethoden im Sinne der Zielsetzung dieser Arbeit (siehe Abschnitt 1.2) zu prüfen.

2.2.1 Physikalische Verhaltensmodellierung

Die physikalische Modellierung wird vordergründig für die detaillierte Beschreibung der physikalischen Effekte eines IC's eingesetzt. Im Rahmen der physikalischen Modellierung wird das physikalische Verhalten einer Systemkomponente durch partielle Differentialgleichungen [26] [135] beschrieben. Die Systemvariablen stellen konservative, physikalische Größen dar und werden in Potential- und Flussgrößen unterschieden. Diese mathematische Basis erlaubt die Betrachtung räumlich verteilter Problemstellungen, wie sie in der Schaltungsentwicklung meist für die Stromdichteverifikation und die Ermittlung parasitärer Effekte im Layout eingesetzt werden.