



Gesamtvorhaben:
Energieautarke Mobilität für kontextsensitive Gebäudeautomatisierung (EnKonSens)

Teilvorhaben:
Zuverlässige energieautarke Schaltungen und Systeme

Schlussbericht

gemäß Nr.8.2 der NKBF 98

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V.
Postfach 20 07 33
80007 München

Ausführende Stellen: Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS
Institutsteil Entwicklung Adaptiver Systeme EAS
Zeunerstr. 38
01069 Dresden

Bearbeiter: Steffen Rülke,
Erhard Fehlauer,
Manfred Dietrich,
Wolfgang Vermeiren,
Stephan Radke,
Ihor Harasymiv,
Roland Jancke

Leiter des Teilvorhabens: Roland Jancke
Förderkennzeichen: 16 SV 6022
Laufzeit des Vorhabens: 1. März 2013 bis 31. Dezember 2016



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

VDI | VDE | IT



Schlussbericht EnKonSens – Fraunhofer-Gesellschaft e.V.

Kontakt:

Dr. Steffen Rülke
Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS)
Institutsteil Entwicklung Adaptiver Systeme (EAS)
Zeunerstr. 38
01069 Dresden

E-Mail: steffen.ruelke@eas.iis.fraunhofer.de

Angaben zur Förderung:

Das Teilvorhaben im Vorhaben EnKonSens wurde im Rahmen der Bekanntmachung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung von Richtlinien zur Förderung von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet „Energieautarke Mobilität - Zuverlässige energieautarke Systeme für den mobilen Menschen“ gefördert.

Die Begleitung des Vorhabens erfolgte durch den Projektträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH Berlin.

Angaben zur Veröffentlichung:

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16 SV 6022 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Zusammenfassung

Das Projekt EnKonSens leistete Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Bereitstellung zuverlässiger Elektronikkomponenten, die z.B. bei der bedarfsgerechten, energieeffizienten, automatisierten Beleuchtung in Smart-Home-Systemen zur Anwendung kommen können. Damit widmet sich EnKonSens der Verbesserung der Lebensqualität in geschlossenen Räumen unter gleichzeitiger Verringerung des Energieverbrauchs durch intelligente Lösungen und greift insbesondere solche Ziele der Förderung wie „Wohlbefinden des Bürgers“ und „Schutz von Ressourcen“ auf.

Mit den Beiträgen von Fraunhofer IIS/EAS wurden im Rahmen des Projektes EnKonSens Werkzeuge zur Entwicklung zuverlässiger, energieeffizienter Systeme bereitgestellt. Zuverlässige Systeme zur Beleuchtungssteuerung verbessern die Sicherheit, reduzieren Wartungsaufwand und sind Voraussetzung für eine effiziente, intelligente Gebäudeautomatisierung. Die Fraunhofer-Beiträge griffen Mikrosystemtechniken zur modellbasierten Analyse anhand von Anwendungsszenarien auf und entwickelten diese weiter, um frühzeitig im Entwicklungsprozess einer Applikation den Einfluss von Entwurfsentscheidungen auf nichtfunktionale Eigenschaften wie die Zuverlässigkeit (Lebensdauer) von Komponenten oder den erwarteten Leistungsverbrauch im Anwendungskontext analysieren zu können. Die Beiträge von Fraunhofer bieten solche Analysezugänge auf Basis der Modellierung und Simulation. Entwickelt wurde hierzu eine entsprechende Simulations-Plattform zur anwendungsspezifischen Modellierung und Simulation von nichtfunktionalen Aspekten (Zuverlässigkeit und Energieverbrauch) auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus, die sich über alle Entwurfsebenen von der Technologieebene, über Schaltungs-, Komponenten- und System-Ebene bis zur Anwendungsebene erstreckt. Für Modellierung und Simulation in den einzelnen Abstraktionsebenen wurden jeweils spezifische Softwaresysteme (Tools) untersucht, die geeignetsten ausgewählt und schließlich in der Projektarbeit eingesetzt. Insgesamt bilden diese Tools die Simulationsplattform des Projektes EnKonSens.

Die betreffenden Tools mit den zugehörigen Abstraktionsniveaus, die jeweilige primäre Modellierungsaufgabe mit Zuordnung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und die gewonnenen Erfahrungen von Fraunhofer sind:

- Technologie-Ebene bis Schaltungs-Ebene: Datenmodellierung mit Matlab, Mathematica: Auf Basis von Nominalmodellen für Hoch-Volt-Komponenten zur Charakterisierung gefertigter Samples werden Statistik- und Alterungsmodelle erstellt; dafür sind die gefundenen Modellansätze mit Kombination von Degrations- und Hot-Hole-Injection Modellierung besonders geeignet.
- Schaltungs-Ebene bis Komponenten-Ebene: Schaltungssimulation mit Cadence, Tanner, Verilog A: Auf Basis der funktionalen Komponentenspezifikation und gegebener Schaltungskonzepte wird ein Verhaltensmodell mit Leistungsverbrauch von Teilblöcken erstellt; für das typische Verhalten von LED-Ansteuerschaltungen inklusive Power-Factor-Correction (PFC) wurden Modelle bereitgestellt.
- Komponenten-Ebene bis System-Ebene: Systemsimulation mit SystemC-AMS: Auf Basis des Verhaltensmodells mit Leistungsverbrauch von Teilblöcken und verschiedener Architekturvarianten wird die Fehlersimulation auf Systemebene durchgeführt und die Zuverlässigkeit der Übertragung verifiziert; Bewertung der Robustheit des Systems gegenüber Fehlern und deren Langzeitwirkung, wobei mittels Simulation im komplexen Basisband die Simulationsgeschwindigkeit enorm beschleunigt wird.
- System-Ebene bis Anwendungs-Ebene: Simulation von Anwendungsszenarien mit OMNeT++: Auf Basis des Systemmodells, der Systemarchitektur, der statistischen Bauelemente-Parameter zum Energieverbrauch und realistischer Anwendungsszenarien wird die Analyse der Verlustleistung des Gesamtsystems im Anwendungskontext durchgeführt; die modulare Beschreibung von An-



Schlussbericht EnKonSens – Fraunhofer-Gesellschaft e.V.

wendungsumgebung (wie Konfiguration eines Smart Homes) und Benutzungskontext (wie Bewegungsabläufe von Personen und Nutzung von Verbrauchern) erleichtert die Wiederverwendung und Abstrahierung von Modellen.

Beispielsweise ermöglicht es die letztgenannte Komponente dieser Simulationsplattform, frühzeitig im Entwicklungsprozess einer Applikation den erwarteten Leistungsverbrauch im Anwendungskontext zu analysieren. Dazu wurden im Projekt Methoden für die Poweranalyse von elektronischen, per EnOcean-Protokoll drahtlos kommunizierenden Schaltungskomponenten der Projektpartner unter Einbeziehung der Bauelemente-Parameter untersucht und erarbeitet, die für Schaltungs- und Anwendungsspezifikationen auf hohem Abstraktionsniveau greifen und eine Systemsimulation im Anwendungskontext ermöglichen.

Inhalt

Zusammenfassung	3
1 Kurze Darstellung des Vorhabens	7
1.1 Aufgabenstellung	7
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	8
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	9
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	11
1.5 Angaben zu bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechten, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden	14
1.6 Angaben zur verwendeten Fachliteratur sowie benutzten Informations- und Dokumentationsdiensten	14
1.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	15
2 Eingehende Darstellung der Arbeiten	16
2.1 Erzielte Ergebnisse.....	17
2.1.1 Spezifikation der Anforderungen an die Modelle und die Simulationsumgebung	17
2.1.1.1 Konzeption der Simulationsplattform.....	17
2.1.1.2 Datenmodellierung.....	18
2.1.1.3 Schaltungssimulation	19
2.1.1.4 Systemsimulation.....	19
2.1.1.5 Protokoll-Simulation	20
2.1.2 Methoden zur automatisierten Erstellung von Nominalmodellen der Schaltungsblöcke	21
2.1.2.1 Bewertung der Methoden zur automatisierten Erstellung von Nominalmodellen	22
2.1.2.2 Symbolische Modellierung	23
2.1.2.3 Numerische Modellierung	24
2.1.3 Modellierung der ausführbaren Spezifikation der Kommunikationsarchitektur ...	29
2.1.3.1 Überblick.....	29
2.1.3.2 Transceiver-Strecke.....	29
2.1.3.3 Bewegungssensor	29
2.1.3.4 Line und LED Power Supply	30
2.1.3.5 Transceiver-Strecke – Passbandmodelle BASK-Modulator und BASK-Demodulator.....	31
2.1.3.6 Transceiver-Strecke – Basisbandmodell	32
2.1.3.7 Channel-Modell und Signalverhalten.....	32
2.1.3.8 Signalverhalten an Baugruppenanschlüssen des Gesamtsystems	33
2.1.4 Poweranalyse unter statistischen Aspekten	33
2.1.4.1 Projektdemonstrator Smart Home.....	33
2.1.4.2 Analyseumgebung und Model Library	34
2.1.4.3 Modellierung	35
2.1.4.4 Simulation.....	39
2.2 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen.....	41



Schlussbericht EnKonSens – Fraunhofer-Gesellschaft e.V.

2.3	Fortschritt an anderen Stellen.....	42
2.4	Erfolgte Veröffentlichung der Ergebnisse.....	42
Literatur	43

1 Kurze Darstellung des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Im Einklang mit der Hightech-Strategie der Bundesregierung stellte sich das Projekt EnKonSens wesentlichen Herausforderungen von Zukunftstrends: Fortschreitende demografische Entwicklung mit zunehmender Alterung der Bevölkerung, zunehmende Mobilität der Bürger sowohl im privaten als auch im beruflichen Bereich, zunehmender Bedarf an Wohlbefinden und altersgerechter technischer Assistenz in der alternden Gesellschaft, zunehmende Verknappung der fossilen Energieträger. Entsprechend dieser Trends definierte das BMBF im Rahmen von auf der Hightech-Strategie der Bundesregierung aufbauenden Zukunftsprojekte wesentliche förderpolitischen Schwerpunkte in Deutschland, die das Projekt EnKonSens ermöglichten. Insbesondere das Zukunftsprojekt „Auch im hohen Alter ein selbstbestimmtes Leben führen“ ist dabei eng verzahnt mit der urbanen Mobilität im Bedarfsfeld „Mobilität“, denn gerade für ältere Leute ist der Erhalt der Mobilität eine wichtige Voraussetzung für ein selbstbestimmtes Leben. Hinzu kommt die Verknappung der fossilen Energieträger, was höchste Effizienz auf allen Anwendungsgebieten bei der Nutzung der vorhandenen Ressourcen erfordert. Entsprechend adressierte EnKonSens auch das Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, da in dem Projekt besonders energiesparende Techniken zum Einsatz kamen, die zur Reduzierung des Energieverbrauches in Gebäuden beitragen. Diese Zielsetzungen standen auch in Übereinstimmung mit dem im Rahmen der Hightech-Strategie für Deutschland geltenden Forschungsrahmenprogramm IKT 2020. In diesem sind wichtige Basistechnologien, wie „Elektronik und Mikrosysteme“ und „Software-intensive Embedded Systems“ sowie das hohe Potential IKT (Informations- und Kommunikationstechnologien) -gestützter Innovationen angesprochen. In diesem Kontext war die für IKT2020 detektierte Leitinnovation „Vernetzte Intelligente Objekte in der Logistik“ von besonderer Relevanz für EnKonSens, denn Hauptziel des Projektes war die Erforschung von sensornetzwerkbasierter Informationssystemen für die Mobilität.

Eine richtige Beleuchtung ist für das Wohlbefinden von Menschen sehr wichtig. Die Beleuchtung umfasst neben der Beleuchtungsstärke auch weitere Faktoren (z.B. Anordnung der Lichtquellen) und sollte von den Aktivitäten der anwesenden Personen im Raum abhängig sein: Konzentrierte Arbeit, Entspannung, Ernährung und Nutzung von Medien verlangen jeweils angepasste Beleuchtungsverhältnisse. So ist zum Beispiel für Büroräume gemäß der Arbeitsstättenverordnung eine Beleuchtungsstärke von 500 En lx vorgesehen für Entspannungsräume jedoch 100 - 200 En lx [ARB93]. Aufgrund der Mobilität der Personen sollte diese Steuerung von mobilen Endgeräten unterstützt werden (s. Abb. 1).



Abb. 1 Szenario einer kontextsensitiven Gebäudeautomatisierung mit mobilen, energieautarken Bedienelementen

Angepasste Beleuchtungsverhältnisse bedeuten aber einen ökonomischen Umgang mit Elektroenergie. Unter Berücksichtigung dieser Gegebenheiten ergeben sich die Randbedingungen für eine optimale Gebäudeautomatisierung und Kontrolle, von der mobile Personen bestmöglich profitieren können. Bezieht man Raumtemperatur und Lüftung in die Betrachtungen ein, ergeben sich sogar noch bedeutendere Energieeinsparpotenziale. Die Benutzerfreundlichkeit eines solch komplexen Systems muss durch eine automatisierte Erkennung des jeweiligen Kontextes und intuitiv bedienbare Eingriffsmöglichkeiten erreicht werden. Werden zur Erfassung des Kontextes energieautarke Sensoren eingesetzt, können mit minimalem Aufwand fast wartungsfreie Systeme geschaffen werden. Als intuitiv nutzbare Bedienelemente können spezielle energiearme Fernbedienungen in den Räumen zum Einsatz kommen. Smartphones können dagegen für die Steuerung über große Distanzen genutzt werden. Mit diesen beiden Ansätzen ist eine lückenlose Steuerung möglich, wodurch sich vielfältige neue Anwendungsgebiete erschließen, wie Raumüberwachung, Fernabfrage und Fernsteuerung. Falsche Bedienung bei der Gebäudetechnik kann zu erheblichen Schäden führen, weshalb die elektronischen Komponenten und die Kommunikation den hohen Standard sicherheitskritischer Systeme erfüllen müssen. Der Entwurf der energieautarken Systeme benötigt deshalb detaillierte Analysemöglichkeiten zur Zuverlässigkeit unter Beachtung von Bauteilvariationen, der Alterung und der voraussichtlichen Umgebungsbedingungen. Die Partner des Projekts EnKonSens stellten sich den genannten Herausforderungen und bearbeiteten die folgenden Forschungsaufgaben:

- Erforschung von energieautarken Bewegungsmeldern, die eine ausreichende Lokalisierung von Personen in Räumen ermöglichen
- Erforschung von energieoptimierten Schaltungen zur Steuerung von Aktoren
- Erforschung der optimalen Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktionen
- Erstellung und Verifikation einer Architektur und der notwendigen Subkomponenten eines Demonstrators für das Gesamtszenario
- Erstellung einer Simulationsplattform für den Entwurf zuverlässiger, energieeffizienter Systeme.

Mit den Beiträgen von Fraunhofer IIS/EAS wurden im Rahmen des Projektes EnKonSens insbesondere die Simulationsplattform zur Entwicklung zuverlässiger, energieeffizienter Systeme bereitgestellt. Dazu griffen die Fraunhofer-Beiträge Mikrosystemtechniken zur modellbasierten Analyse anhand von Anwendungsszenarien auf und entwickelten diese weiter, um frühzeitig im Entwicklungsprozess einer Applikation den Einfluss von Entwurfsentscheidungen auf nichtfunktionale Eigenschaften wie die Zuverlässigkeit (Lebensdauer) von Komponenten oder den erwarteten Leistungsverbrauch im Anwendungskontext analysieren zu können. Die Beiträge von Fraunhofer bieten solche Analysezugänge auf Basis der Modellierung und Simulation. Entwickelt wurde hierzu eine entsprechende Simulations-Plattform zur anwendungsspezifischen Modellierung und Simulation von nichtfunktionalen Aspekten (Zuverlässigkeit und Energieverbrauch) auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus, die sich über alle Entwurfsebenen von der Technologieebene, über Schaltungs-, Komponenten- und System-Ebene bis zur Anwendungsebene erstreckt. Für Modellierung und Simulation in den einzelnen Abstraktionsebenen wurden jeweils spezifische Softwaresysteme (Tools) untersucht, die geeignetsten ausgewählt und schließlich in der Projektarbeit eingesetzt.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Partner im Vorhaben EnKonSens waren über die gesamte Projektlaufzeit:

- EnOcean GmbH, die auch die Projektkoordination übernommen hat,
- BSC Computer GmbH,
- Universität Kassel/ Lehrstuhl COMTEC.

In der ersten Teilphase des Projektes bis 2013 (Insolvenz des damaligen Projektpartners Telefunken):

- Telefunken Semiconductors GmbH & Co. KG.

In der zweiten Teilphase des Projektes ab 2013:

- Productivity Engineering GmbH und
- X-FAB Dresden GmbH & Co. KG.

Das Zusammenwirken der Partner in der zweiten Teilphase ist in Abb. 2 dargestellt.

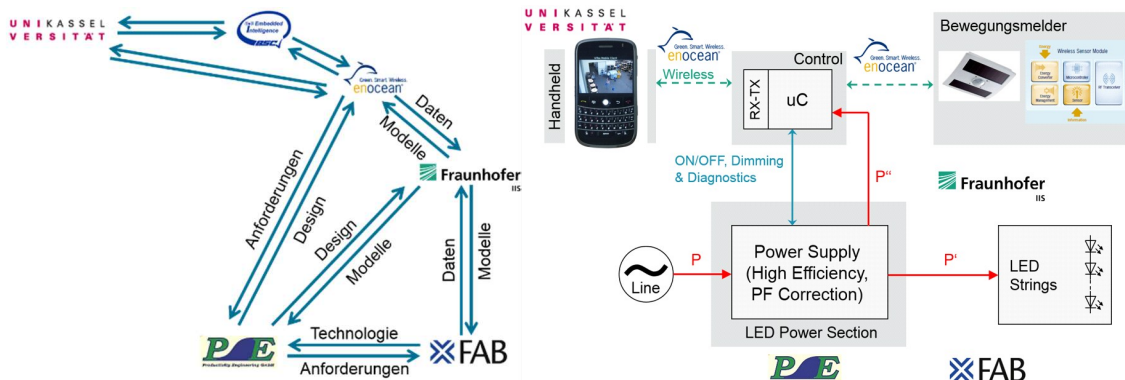


Abb. 2 Aufgaben der Partner im Vorhaben

In dem Projekt waren Partner entlang der gesamten Verwertungskette vertreten. Die Firma BSC übernahm die Funktion des Systemanbieters und kümmerte sich in diesem Zusammenhang auch um die Kommunikation zwischen den Komponenten. Neue Konzepte zu den elektronischen Komponenten wurden von der EnOcean GmbH erforscht. EnOcean ist ein typischer Anbieter von Komponenten zur Steuerung der Beleuchtung. Die Firma Productivity Engineering GmbH übernahm die Entwicklung des LED Treiber ICs und brachte ihre Erfahrungen im Bereich Mensch-Maschine Interfaces ein. Die Firma X-FAB Dresden GmbH & Co. KG deckte den Bereich der Prozessentwicklung und Fertigungsdienstleistung für den LED Treiber IC ab, wobei eine neuartige 700V-CMOS Technologie zur Anwendung kam. Die Universität Kassel erforschte neue Benutzerschnittstellen für eine bestmögliche Nutzerakzeptanz. Die Rolle von Fraunhofer IIS/EAS im Verbundvorhaben bestand in der Bereitstellung einer Simulationsumgebung sowie einer Methodik zur Modellerstellung für die Einzelkomponenten des Gesamtsystems. Dies bezog sich sowohl auf das Nominalverhalten wie auch auf Parametervariationen und Alterungseffekte.

Der Austausch mit den Partnern im Vorhaben erfolgte auf den turnusmäßigen Statusseminaren und im Rahmen von Telefonkonferenzen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt EnKonSens gliederte sich in vier Arbeitspakete. Im Arbeitspaket 1 wurden die Anforderungen an die anderen Arbeitspakete definiert. Dazu gehörte die Definition der Komponenten sowie ihrer funktionalen und parametrischen Größen. Des Weiteren wurden Anforderungen an die Entwurfsplanung und die zugehörigen Werkzeuge ausgearbeitet. Im Arbeitspaket 2 wurde davon ausgehend das Systemkonzept einschließlich der Einzelkomponenten erforscht. Außerdem wurden die Voraussetzungen zur Modellierung der Komponenten geschaffen, um die Entwurfsmöglichkeiten herzustellen (Simulation, Verifikation). Im Arbeitspaket 3 wurden Möglichkeiten zur Implementierung der Komponenten und des Systems untersucht, um die Voraussetzung für die Demonstration der Ergebnisse zu schaffen. Der Demonstrator selbst war Gegenstand von Arbeitspaket 4. Eine Übersicht zum Zusammenwirken zeigt Abb. 3.

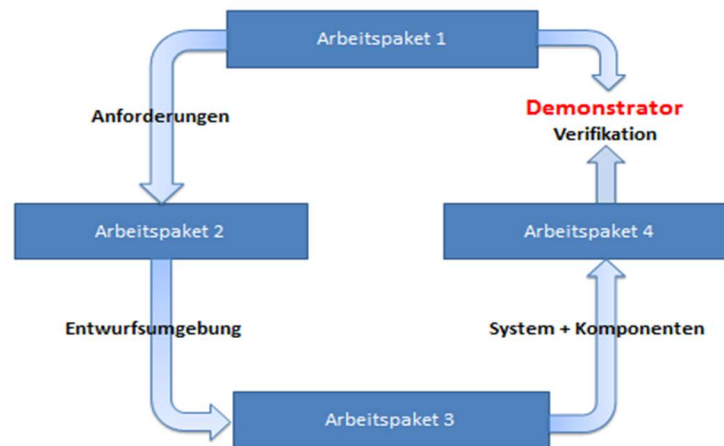


Abb. 3 Zusammenwirken der Arbeitspakete

Im Teilvorhaben wurden Beiträge zu den folgenden Arbeitspaketen bzw. Teilarbeitspaketen geliefert:

- AP1 Definition der Anforderungen
 Aufgabe 1.2 Anforderungen an die Simulationsplattform
 Beitrag 1.2.2 Anforderungen an Modellierung und Simulation von Komponenten und Gesamtsystem
- AP2 Neue Systemkonzepte und Ansätze zur Komponentenmodellierung
 Aufgabe 2.1 Modellierungskonzept zur Kommunikation
 Beitrag 2.1.6 Konzept zur ausführbaren Spezifikation für Kommunikationskonzept
- Aufgabe 2.2 Untersuchungen zur Modellierung Dimmer-Aktor
 Beitrag 2.2.3 Erweiterte Schaltungsmodellierung (Energie und Zuverlässigkeit)
- Aufgabe 2.3 Modellierung Funkplattform
 Beitrag 2.3.3 Übergreifender Ansatz zur Erstellung des Systemmodells für die Übergangsstrecke
 Beitrag 2.4.1 Algorithmen zur Erstellung der Infrastruktur für die Modellgenerierung
 Beitrag 2.4.3 Erforschung der Variationsanalyse
 Beitrag 2.4.5 Untersuchung der Poweranalyse unter statistischen Aspekten
- Aufgabe 2.7 Erweiterung der 700V Bulktechnologie
 Beitrag 2.7.3 Zuverlässigkeitsmodelle für die Leistungselektronik
- AP3 Untersuchungen zu energiearmen Systemkomponenten
 Aufgabe 3.3 Erforschung des Systems Dimmer-Aktor
 Beitrag 3.3.3 Verfahren zum modellbasierten Entwurf von Aktorkomponenten
- Aufgabe 3.4 Verifikation der Modelle
 Beitrag 3.4.2 Überprüfung der Simulationsvorhersagen an Samples; Kalibrierung der Modelle
- Aufgabe 3.8 Erstellung eines vorläufigen Process-Design-Kits
 Beitrag 3.8.3 Umsetzung von Modellen in Process-Design-Kits

- Aufgabe 3.9 Erstellung von Werkzeugen zum Entwurf und der Optimierung von Treiberschaltungen und ihrer Metallisierung
- Beitrag 3.9.3 Verfahren zur zuverlässigkeitsgerechten Dimensionierung der Metallisierung
- AP4 Integration und Demonstration
- Aufgabe 4.2 Test des Gesamtsystems unter realen Bedingungen
- Beitrag 4.2.7 Gesamtsystemsimulation und Verifikation gegen Messungen

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die deutsche Industrie und Forschungslandschaft auf dem Gebiet der effektiven Leistungssteuerung war bereits zu Projektbeginn in einer guten Ausgangsposition:

- Die beteiligten KMU verfügten bereits über ein hervorragendes Potential zur intelligenten Vernetzung von Funksystemen.
- Der beteiligte Halbleiterhersteller hatte Erfahrungen auf dem Spezialgebiet der effektiven Leistungssteuerung.
- Die institutionellen Partner konnten auf umfangreichen Vorkenntnisse zur übergreifenden Simulation und zum Entwurf von angepassten Benutzerschnittstellen aufbauen.

Nichtsdestotrotz war der zu Projektbeginn bekannte Stand der Technik für energieautarke und mobile Systeme durch Insellösungen gekennzeichnet, bei denen übergreifende Strukturen, effektive Installationskonzepte und an den Benutzer angepasste Bedienkonzepte bisher durchweg fehlen.

Im Kontext der Gesamtzielstellung des Projektes konnte zu Beginn der Arbeiten an folgendem Stand von Wissenschaft und Technik angeknüpft werden:

Energieautarken Elektronik mit Energy Harvesting

Die Firma EnOcean hat bereits 2003 den ersten energieautarken Funkschalter auf Basis eines Piezogenerators als Produkt auf den Markt gebracht. Es folgte eine zweite Generation des Schalters auf Basis des elektromagnetischen Prinzips und mehrere Funksensoren mit Solarzellen sowie thermischen Generatoren. Weiterhin hatten sich im Bereich Energy Harvesting einige weitere Firmen mit entsprechenden Energiegeneratoren etabliert, als Beispiel seien hier Micropelt (Thermowandler) und Perpetuum Ltd (Vibrationswandler) genannt.

Im Bereich des Micro Energy Harvesting gab es sehr viel Forschungstätigkeit (z.B. BMBF Projekte im Rahmen von EAS/AVS).

Ultra-low-power Funktechnologie

Die Firma EnOcean hatte die dritte Generation seiner ultra-low-power Funkplattformen auf Basis des EnOcean Funkprotokolls entwickelt [ENO16]. In der ersten Generation erfolgte der diskrete Aufbau der HF Schaltung, danach die Integration des HF Chips und nunmehr erfolgte eine Gesamtintegration mittels System-on-Chip Lösung.

Weiterhin befanden sich neue Funkstandards für ultra-low-power Anwendungen in der Entwicklung („Bluetooth Low Energy“ und „Zigbee Green Energy“). Erste Funkchips, welche diese Standards unterstützten waren bereits auf dem Markt aber noch keine Endgeräte und Funksensoren mit diesen Standards.

Halbleitertechnologien

Die verfügbare Technologiepalette von TELEFUNKEN Semiconductors war für Sperrspannungen bis zu 700V zum Betrieb an weltweit üblichen Spannungsnetzen geeignet.

In der Halbleitertechnik waren Modellierungsverfahren üblich, die elektrische Eigenschaften der benötigten Bauteile in Form von Bibliotheken (Libraries) bereitstellen und bei Bedarf abrufen [GIE02]. Die üblichen Schwankungen der technologischen Prozesse wurden messtechnisch erfasst und als sogenannte Corner-Libraries zur Simulation bereitgestellt [BAN09]. Es fehlte jedoch die durchgängige Simulierbarkeit der Streuungen der elektrischen Eigenschaften während der Herstellung bis hin zur statistischen Verteilung auf der Ebene der Systemsimulation. Eine Bereitstellung von Modellen mit integrierter Leistungsberechnung für ganzer Komponenten und Baugruppen würde in allen Phasen des Entwurfs eine Optimierung des Energieverbrauchs unterstützen [LOR11].

Aktivitätserkennung

Zur Bestimmung der Aktivität von Nutzern (Stehen, Sitzen, ...) gab es Arbeiten vom MIT [BAO04] und der ETH Zürich [KER07]; [KÖN11] sowie [SIG10] bezogen dabei insbesondere den Kontext mit ein. In diesen Arbeiten wurden am menschlichen Körper an verschiedenen Stellen Beschleunigungssensoren angebracht, um die Bewegung der Gliedmaßen und des Körpers zu bestimmen. Anschließend wurden Rückschlüsse auf die Aktivität gezogen. Solche Systeme waren für den täglichen Einsatz allerdings impraktikabel, da sie die Bewegungsfreiheit des Menschen einschränkten. Am Lehrstuhl ComTec der Universität Kassel wurde ein Verfahren untersucht [LAU10], bei dem ein Benutzer ein übliches Smartphone in der Hosentasche bei sich trägt. Basierend auf den Beschleunigungsdaten des im Smartphone verbauten Sensors wurde eine alltagstaugliche Aktivitätserkennung durchgeführt. Wünschenswert war die Kombination eines solches Aktivitätserkennungssystem mit Umgebungen die in ihrer Beleuchtung anpassbar sind, was eine automatische Adaption der Umgebung an die Benutzeraktivitäten realisierbar erscheinen lässt.

Speziell lässt sich der für das Teilprojekt relevante wissenschaftliche und technische Stand auf dem Gebiet der Zuverlässigkeit, an den angeknüpft wurde, wie folgt charakterisieren:

Zuverlässigkeit, Alterung und Energieverbrauch

In der Halbleitertechnik waren Modellierungsverfahren üblich, die elektrische Eigenschaften der benötigten Bauteile in Form von Bibliotheken (Libraries) bereitstellen und bei Bedarf abrufen. Die üblichen Schwankungen der technologischen Prozesse wurden bisher messtechnisch erfasst und als sogenannte Corner-Libraries zur Simulation bereitgestellt. Es fehlte jedoch die durchgängige Simulierbarkeit der Streuungen der elektrischen Eigenschaften während der Herstellung bis hin zur statistischen Verteilung auf der Ebene der Systemsimulation. Für energieeffiziente Elektroniksysteme ist es aber zunehmend wichtiger, die Leistungsaufnahme ganzer Komponenten und Baugruppen schon zur Entwurfszeit zu kennen und zu optimieren. Eine Bereitstellung von Modellen mit integrierter Leistungsberechnung würde in allen Phasen des Entwurfs eine Optimierung des Energieverbrauchs unterstützen.

Zuverlässigkeit von Transistoren und Schaltungsblöcken

Physikalische Alterungsmechanismen wurden zunächst an Einzelbauelementen untersucht und in erweiterten Kompaktmodellen beschrieben.

Bei der Simulation der Degradation von Analogschaltungen fanden die zuvor erstellten Alterungsmodelle der Einzeltransistoren, z.B. für NBTI oder HCI, Anwendung. Allerdings war wenig darüber bekannt, welche Klassen von Analogschaltungen in welchem Ausmaß altern, und welche Effekte dabei dominieren. Simulatoren für die Alterung bei Analogschaltungen gab es von akademischer Seite oder als kommerzielle Werkzeuge auf Basis vereinfachter Modelle.

Eine Alterungsanalyse bei digitalen Schaltungen konnte zwar auf Transistorebene erfolgen, der Rechenaufwand wurde aber schnell zu hoch. Daher wurden Gattermodelle benötigt, die Alterungsauswirkungen beinhalten. Angenommen wurde, dass alle Transistoren gleichermaßen altern, was im Allgemeinen nicht der Fall ist. Andere Arbeiten zur Abstraktion der Alterungsmodelle legten den Fokus mehr auf die Langzeit-Simulation (zur Vorhersage der Robustheit aufgrund von Alterung) als auf die genaue Makro-Modellierung.

Current-Source-Modelle (CSMs) hatten sich als besonders effiziente Methode erwiesen, um eine Simulation mit SPICE-ähnlicher Genauigkeit für sehr große digitale Schaltungen zu ermöglichen. Sie haben Potential, auch Alterung und Zuverlässigkeit in die Timing-Analyse einzubeziehen. Die verfügbaren Ansätze für CSMs hatten den Nachteil eines großen Simulationsaufwands bei der Modellerstellung.

Die Betrachtung und Quantifizierung der Zuverlässigkeit von komplexeren Schaltungsblöcken sowie von analogen und Mixed-Signal-Schaltungen war insgesamt jedoch noch nicht gelöst. Auf der Ebene ganzer Schaltungen und Systeme wurden statistische Modelle für mittlere Ausfallraten erstellt [SOH11]. Es fehlten allerdings Ansätze, die die Korrelation zwischen den Ebenen geeignet beschreiben und in Modellen abbilden.

Zuverlässigkeit von Digitalbausteinen

Run-time Teststrukturen, oft auch als Monitore bezeichnet, für Parameter wie Verlustleistung, Temperatur, Geschwindigkeit und maximale Betriebsfrequenz waren auf vielen integrierten Bausteinen verfügbar. Für die Geschwindigkeitsmessung wurden dabei in der Regel Repliken eines kritischen Pfades verwendet. Diese Messschaltungen können zwar den nominalen Zustand des ICs charakterisieren, jedoch nicht den Zustand nach Alterung, da die Replik-Schaltung nicht genau dieselbe Alterung wie der kritische Pfad sieht. Teststrukturen, die „in-Situ“, d.h. in der zuverlässigkeitsgefährdeten Schaltung selbst messen, wie es für die Überwachung der Alterungseffekte nötig wäre, waren bisher nicht gebräuchlich.

Bekannte Techniken zur Korrektur transienter Fehler, verursacht durch Schwankungen der Signallaufzeit, ionisierende Strahlung oder einsetzende Alterungseffekte oder einer diffusen Überlagerung dieser Einzeleffekte, wurden meist unmittelbar auf der Abstraktionsebene im integrierten Schaltungsentwurf angewendet, auf der die Fehler auch erkannt wurden. In einzelnen Fällen wurden die gleichen Techniken auch Abstraktionsebenen-übergreifend eingesetzt: Erkennung auf RTL Ebene zur Korrektur des Laufzeitverhaltens unter energetischen Gesichtspunkten auf Architekturebene. In allen Fällen wurden die Regelschleifen aus Fehlererkennung, Korrektur und Rückwirkung auf die Schaltungskomponente zur Entwurfszeit des Systems festgelegt und dimensioniert. Es war keine dynamisch variable Anpassung des für eine Zielanwendung erforderlichen Zuverlässigkeitsmaßes zur Laufzeit möglich.

1.5 Angaben zu bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechten, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Bei Fraunhofer IIS/EAS wurde die Systementwurfsumgebung COSIDE genutzt. Die Vermarktung von COSIDE erfolgt durch die Firma COSEDA Technologies GmbH (<http://www.coseda-tech.com/>), die während der Laufzeit des Vorhabens aus der Fraunhofer-Gesellschaft e.V. ausgegliedert wurde. Die Plattform für SystemC AMS basiert auf dem Apache License Version 2.0 Modell. Im Rahmen der SystemC AMS-Plattform wird das Eclipse Modeling Framework genutzt.

Genutzt wurde weiterhin die integrierte Entwicklungsumgebung OMNeT++ („Objective Modular Network Testbed in C++“) [OMN16]. Diese ist als Open-Source-Lizenz erhältlich, basiert in der verwendeten Version 5.0 auf der Eclipse-Plattform [ECL16] und erfordert für die Grafikausgabe eine Qt/Tk- oder OSG-basierte Laufzeitumgebung ([OUG16], [OSG16]). Weiterhin wurde mit INET 3.4.0 [INE16] eine open-source Model Library eingesetzt, die z.B. die Modellierung von Netzwerk-Komponenten (unterschiedlichste Netzwerk-Protokolle; Kommunikation über Messages; Internet-Stacks) ermöglicht und einer Reihe von Modellen verschiedener OSI-Layer ermöglicht sowie Zugänge zur Modellierung drahtloser Kommunikation und Unterstützung der grafischen 2D/3D-Visualisierung bietet.

1.6 Angaben zur verwendeten Fachliteratur sowie benutzten Informations- und Dokumentationsdiensten

Literatur zum wissenschaftlichen und technischen Stand an den angeknüpft wurde:

- [ARB93] Arbeitsstätten Richtlinie Künstliche Beleuchtung ASR 7/3 vom 1. Oktober 1993 (BArbBl. 11/1993 S. 40)
- [BAN09] Banerjee, N.; Chandra, S.; Ghosh, S.; Dey, S.; Raghunathan, A.; Roy, K.: Coping with Variations through System-Level Design. 22nd Int. Conference on VLSI Design, pp.581-586, 5-9 Jan. 2009
- [BAO04] L. Bao and S. S. Intille, Activity recognition from user-annotated acceleration data, Pervasive 2004, pp. 117, April 2004
- [ENO16] -, EnOcean Alliance website. <https://www.enocean-alliance.com> (abgerufen am 23.12.2016)
- [GIE02] Gielen, G.: Design and modeling tools for analog/RF circuits in mixed-signal integrated systems on chip. Proc. FDL'02, Marseille, Sept. 2002
- [KER07] N. Kern, B. Schiele, and A. Schmidt, Recognizing context for annotating a live life recording, Personal Ubiquitous Comput., vol. 11, no. 4, pp. 251-263, 2007
- [KÖN11] I. König, C. Voigtmann, N. Klein, and K. David, "Enhancing alignment based context prediction by using multiple context sources: experiment and analysis", 7th International and Interdisciplinary Conference Context 2011, Springer LNAI6967 Proceedings, Karlsruhe, Sept. 2011, pp. 159-172
- [LAU10] S. L. Lau and K. David, Movement recognition using the accelerometer in smartphones, in Proc. Future Network and Mobile Summit 2010, Florence, Italy, June 16-18 2010, pp. 1-9
- [LOR11] Lorenz, J.; Bär, E.; Clees, T.; Jancke, R.; Salzig, C.; Selberherr, S.: "Hierarchical Simulation of Process Variations and their Impact on Circuits and Systems: Methodology", IEEE Trans. Electron Devices, Special issue on Characterization of Nano CMOS Variability by simulation and measurement, vol. 58, no. 8, Aug. 2011
- [SIG10] S. Sigg, S. Haseloff, and K. David, "An Alignment Approach for Context Prediction Tasks in UbiComp environments", Journal IEEE Pervasive Computing, vol.9, no.4, pp. 90-97, October - December 2010
- [SOH11] C. Sohrmann, R. Jancke, J. Haase, „Hierarchische, statistische Analyse analoger Schaltungen“, Proc. 12. ITG/GMM-Fachtagung ANALOG 2011, Erlangen, Nov. 2011



Literatur zu verwendeten Entwicklungsumgebungen, Plattformen und Bibliotheken:

- [ECL16] -, The Eclipse Foundation open source community website. <https://eclipse.org/> (abgerufen am 23.12.2016)
- [INE16] -, INET Framework website. <https://inet.omnetpp.org/> (abgerufen am 23.12.2016)
- [OMN16] -, OMNeT++ Discrete Event Simulator home page. <https://omnetpp.org/> (abgerufen am 23.12.2016)
- [OSG16] -, The OpenSceneGraph Project website. <http://www.openscenegraph.org/> (abgerufen am 23.12.2016)
- [OUG16] -, OMNeT++ User Guide Version 5.0. <https://omnetpp.org/doc/omnetpp/UserGuide.pdf> (abgerufen am 23.12.2016)

1.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Teilvorhabens erfolgte die Zusammenarbeit mit allen Partnern des Projektkonsortiums in enger Abstimmung. Das betrifft über die gesamte Projektlaufzeit:

- BSC Computer GmbH auf dem Gebiet des Systementwurfs und der Komponenten-Kommunikation
- EnOcean GmbH auf den Gebieten drahtlose Kommunikation und Beleuchtungssteuerung
- Universität Kassel/ Lehrstuhl COMTEC auf den Gebieten der Benutzerschnittstellen und der Nutzerakzeptanz.

In der ersten Teilphase des Projektes bis 2013 (Insolvenz des damaligen Projektpartners Telefunken) erfolgte die Zusammenarbeit auch mit:

- Telefunken Semiconductors GmbH & Co. KG auf dem Gebiet der Schaltkreisentwicklung/ Abschätzung der Leistungsaufnahme ganzer Komponenten und Baugruppen schon zur Entwurfszeit; Modellen mit integrierter Leistungsberechnung zur Optimierung des Energieverbrauchs.

In der zweiten Teilphase des Projektes ab 2013 erfolgte die Zusammenarbeit auch mit:

- Productivity Engineering GmbH auf den Gebiet der LED Treiber
- X-FAB Dresden GmbH & Co. KG auf dem Gebiet der Charakterisierung von Bauelementemodellen im Rahmen der Prozessentwicklung einer 700V-CMOS Technologie.

Außerdem wurden im Rahmen von Silicon Saxony und in Fachgruppen von VDE und GI (z.B. RSS) Erfahrungen zum zuverlässigen Entwurf ausgetauscht.

2 Eingehende Darstellung der Arbeiten

Abb. 4 verdeutlicht die Einordnung der Projektbeiträge von Fraunhofer IIS/EAS über die gesamte Projektlaufzeit von EnKonSens. Diese Beiträge betreffen die anwendungsspezifische Modellierung und Simulation von nichtfunktionalen Aspekten (Zuverlässigkeit und Energieverbrauch) auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus, die sich über alle Entwurfsebenen von der Technologieebene, über Schaltungs-, Komponenten- und System-Ebene bis zur Anwendungsebene erstrecken (im linken Teil von Abb. 4 inhaltlich charakterisiert und illustriert). Außerdem ist der hauptverantwortliche Projektpartner angegeben. Im rechten, orange hinterlegten Teil von Abb. 4 sind die durch Fraunhofer IIS/EAS simulierten Haupteigenschaften der jeweiligen Abstraktionsebene sowie die in der Beschreibung hauptsächlich verwendeten Modelle angegeben.

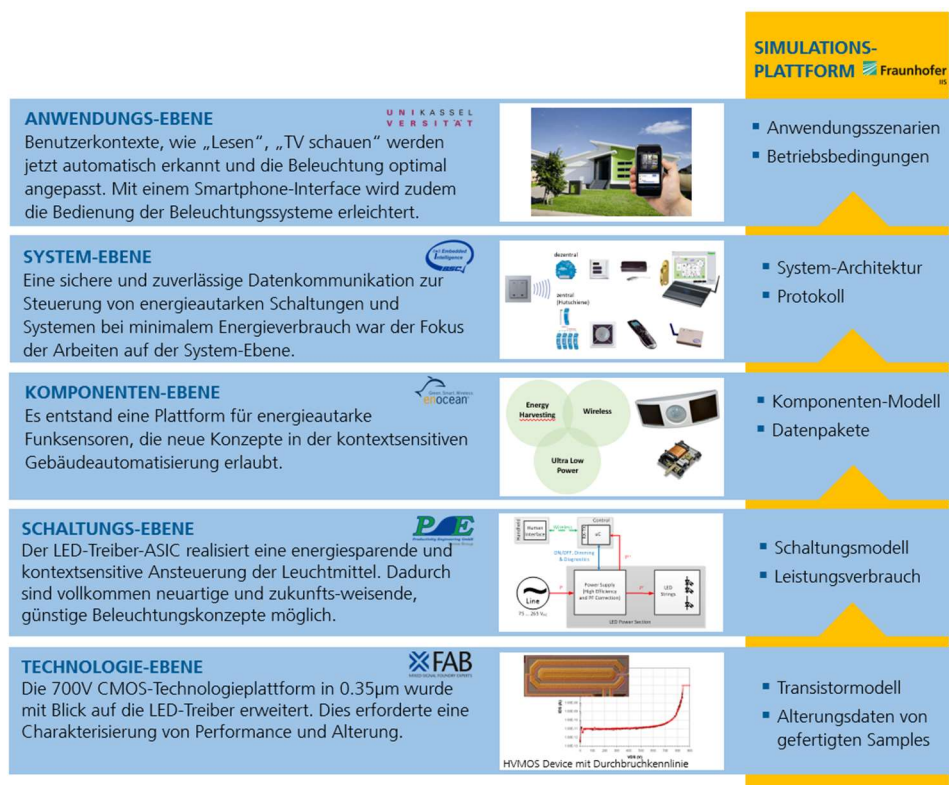


Abb. 4 Einordnung der Fraunhofer-Arbeiten in das Gesamtprojekt

Für Modellierung und Simulation in den einzelnen Abstraktionsebenen wurden jeweils spezifische Softwaresysteme (Tools) untersucht, die geeignetsten ausgewählt und schließlich in der Projektarbeit eingesetzt. Insgesamt bilden diese Tools die Simulationsplattform des Projektes EnKonSens. Die betreffenden Tools sind in Abb. 5 dargestellt, wobei ersichtlich wird, dass diese auch benachbarte Abstraktionsniveaus überstreichen können.

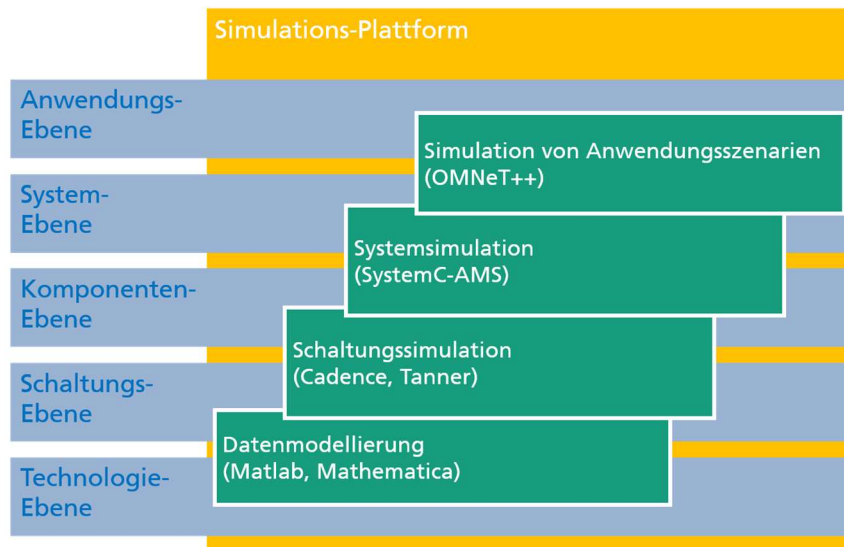


Abb. 5 Simulationsplattform von EnKonSens mit spezifischen Tools für einzelne Abstraktionsniveaus

2.1 Erzielte Ergebnisse

Im Rahmen der Arbeiten im Teilvorhaben wurden von Fraunhofer IIS/EAS gemeinsam mit den Partnern Beiträge zu allen Arbeitspaketen erbracht. Die wesentlichen dabei erzielten Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

2.1.1 Spezifikation der Anforderungen an die Modelle und die Simulationsumgebung

2.1.1.1 Konzeption der Simulationsplattform

Abb. 5 zeigt einen Überblick über alle Abstraktionsebenen, die im Projekt EnKonSens behandelt wurden und entsprechend von der Simulationsplattform zu erfassen sind. Exemplarisch sind charakteristische Elemente benannt, die auf den Ebenen bei der Modellierung betrachtet wurden.

Auf der **Technologie-Ebene** werden die Eigenschaften einer Halbleiter-Technologie betrachtet und in Bauelemente-Modelle abgebildet. Für diese Ebene existieren mit TCAD (Technologie-CAD) [TCA16] eigene Simulationswerkzeuge. Über den Partner XFAB standen im Rahmen deren Hochvolttechnologie Charakterisierungsdaten für Teststrukturen bereit.

Auf der **Schaltungsebene** haben sich Netzwerksimulatoren wie z.B. SPICE zur Analyse von Schaltungskonzepten etabliert. Neben frei verfügbaren SPICE-Simulatoren haben die großen Anbieter von kommerziellen Entwurfswerkzeugen Cadence (Spectre) [SCS16], Mentor (Eldo) [ELD16], Synopsys (HSpice) [HSP16], Tanner [TAN16] spezifischen Erweiterungen entwickelt, um weitere spezielle Analysen und Optimierungen anbieten zu können. Auf der Schaltungsebene wurden Treiberschaltungen des Partners PE zur Ansteuerung von Aktoren auf der Hochvoltstrecke simuliert.

Auf der **Komponentenebene** werden komplexe Baugruppen eines Systems simuliert. Die Modellierung des Verhalten der Komponenten erfolgt mittels Hardware-Beschreibungssprachen. Der Projektpartner EnOcean entwickelte Sensor-Komponenten, die im Gesamtsystem der Gebäudeautomatisierung eine zentrale Rolle spielen. Diese Komponenten wurden mittels SystemC AMS modelliert und simuliert.

Auf der **Systemebene** werden Architekturkonzepte erarbeitet und evaluiert. Eine Unterscheidung in Hard- und Software-Realisierung einer Funktion ist hier häufig noch nicht gefallen. Der Partner BSC vertritt im Projekt die Systemebene und stellt aus den Komponenten Systeme der Gebäudeautomatisierung zusammen. Auf dieser Ebene wurde die Architektur eines solchen Systems unter Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen mit Hilfe von Simulationsmethoden untersucht.

Auf der **Anwendungsebene** wird das System in konkreten Anwendungsszenarien untersucht. Ziel ist hier die Validation der korrekten Funktion eines Systems für den geplanten Einsatzzweck. Im Projekt wird die Anwendungsebene durch den Partner ComTec vertreten. Um diesem Partner die kontextsensitive Steuerung von Systemen der Gebäudetechnik zu ermöglichen, wurden weitere Informationen wie Raumebelegung oder Aktivitätsmuster in die Simulation einbezogen.

2.1.1.2 Datenmodellierung

Auf der untersten betrachteten Abstraktionsebene wurden zunächst die Daten für die Parametrisierung von Transistormodellen erzeugt. Einige Transistormodelle haben sich als Quasi-Industriestandard etabliert. Für Standard-MOS-Devices werden typischerweise die BSIM-Modelle aus Berkeley ([TCA16], [VIR16]) zur Modellierung herangezogen. Daneben gibt es andere Modelle, wie EKV [EKV16] und HiSIM [HIS16], bei denen der Fokus eher auf einer physikalischen Beschreibung als auf einem mathematischen Fit der beobachteten Effekte und Eigenschaften beruht. Für die Beschreibung von Hochvolt-Devices steht ein vergleichbarer Quasi-Industriestandard aus. Mit HiSIM-HV wird versucht, diese Lücke zu füllen. Zukünftig geht der Trend dahin, anstelle von Standard-Device-Modellen auf Basis von bekannten Gleichungssätzen verschlüsselte Modelle mit Foundry-spezifischen Anpassungen zu verwenden und herauszugeben.

Neben dem Nominalverhalten müssen die Modelle auch nichtfunktionale Eigenschaften aus den Nichtidealitäten der Technologie abbilden. Dazu gehören Prozessvariationen ebenso wie auch das Degradationsverhalten. Hierzu sind separate Modellbeschreibungen erforderlich, die nahtlos in die vorhandenen Modelle für das Nominalverhalten zu integrieren sind. Im Projekt wurden insbesondere Parameter-Statistik und Alterungseigenschaften von Hochvolt-Devices betrachtet. Für die Modellierung kamen mathematische Werkzeuge wie Matlab ([JAN05], [MAT16]), Mathematica [WOL16] und R [RSC16] zum Einsatz. Hinsichtlich der Methodik wurden einerseits analytische Beschreibungen des beobachteten Verhaltens betrachtet. Aufgabe ist hier die Parametrisierung gegebener, möglichst physikalisch motivierter Modellgleichungen. Andererseits fanden auch Tabellenmodelle Verwendung, bei denen die Charakterisierungsdaten unmittelbar als Grundlage für die Modellauswertung dienen. Abb. 6 zeigt exemplarisch Kennliniendaten aus der Charakterisierung eines Bauelements der betrachteten Hochvolt-Technologie des Partners XFAB.

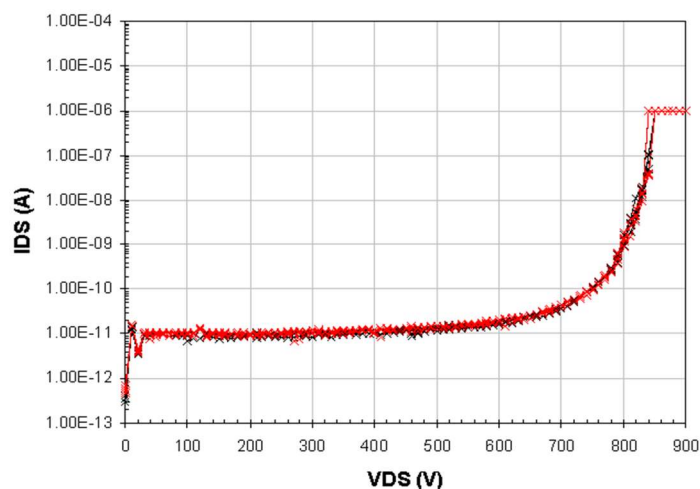


Abb. 6 Beispiel für Kennliniendaten eines Hochvolt-Devices des Partners XFAB

2.1.1.3 Schaltungssimulation

In der Schaltungssimulation wurden die Kompaktmodelle der darunterliegenden Technologie-Ebene zu Schaltungen zusammengefügt, um das Verhalten der Bauelemente einzubeziehen. Neben dem nominalen Verhalten spielten auch hier die Nichtidealitäten eine Rolle, die aus der Technologie herrühren. Sie wurden im Ergebnis der Datenmodellierung in die Kompaktmodelle eingefügt. Primäres Untersuchungsziel auf dieser Abstraktionsebene war die Analyse von Robustheit und Leistungseffizienz der Implementierung, wobei diverse Methoden zur Verfügung standen, um ausgehend von der Schaltungssimulation Verhaltensmodelle der betrachteten Schaltungsblöcke abzuleiten. Modelle für die simulierten Nichtidealitäten wurden zusätzlich zum Nominalverhalten in die Verhaltensmodelle eingefügt. So konnte auf dieser Ebene beispielsweise die Verlustleistung einer Schaltung abgeschätzt und als Modell für den Leistungsverbrauch eingefügt werden. Im Projekt wurde dazu insbesondere die Simulation der Aktor-Komponenten betrachtet, also der Schaltungsblöcke, die sich auf der Hochvoltseite befinden und der Ansteuerung der Leuchtmittel dienen.

Abb. 7 zeigt eine grobe Übersicht über die Aktor-Seite der untersuchten Gebäudesteuerung. Dargestellt ist der Ansteuer-IC des Partners PE. Dieser ist in der Lage, aus der Netzspannung die notwendige Betriebsspannung für LED-Ketten zur Verfügung zu stellen.

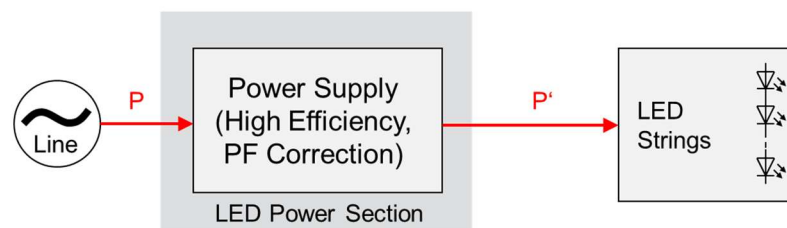


Abb. 7 Übersichtsbild für die Aktor-Komponenten der LED-Ansteuerung

Als Werkzeuge kamen die Entwicklungsumgebungen von Cadence und Tanner für die Schaltungssimulation und die anschließende Simulation der entwickelten Verhaltensmodelle zum Einsatz. Als Sprache zur Verhaltensbeschreibung auf dieser Ebene diente Verilog-A, da diese Sprache in beiden Entwicklungsumgebungen unterstützt wird.

2.1.1.4 Systemsimulation

Die Systemsimulation bildet den Übergang von der Komponenten- zur Systemebene. Von einzelnen Blöcken und Komponenten lagen Verhaltensmodelle vor, die als Input für die Simulation dienten. Diese enthalten nur so viel Detailinformation wie nötig, um interessierende Effekte, wie die Leistungsaufnahme noch analysieren zu können. Andererseits sind die Modelle soweit wie möglich abstrahiert, um trotzdem komplexe aus vielen Teilkomponenten aufgebaute Systeme untersuchen zu können. Dadurch konnte dann die Vielzahl von Simulationen ausgeführt werden, die bei der Monte-Carlo-Simulation erforderlich ist.

Neben der Verhaltensmodellierung wurde auf der Ebene der Systemsimulation auch eine Fehlersimulation eingesetzt. Die Prinzipien entsprechen denen der Fehlersimulation auf Schaltungsebene [HBH10]. Es konnten mögliche Fehlerorte identifiziert, dort parametrische oder strukturelle Fehler (Unterbrechungen und Kurzschlüsse) systematisch eingebaut und deren Effekte analysiert werden. Damit konnten die Auswirkungen angenommener Fehler effektiv untersucht werden, selbst wenn deren genaue Ursache nicht bekannt war. Umgekehrt konnte im Rahmen einer Fehlerdiagnose mit Hilfe der Fehlersimulation zu einem beobachteten Fehlerbild dessen Ursache bzw. der Fehlerort eingegrenzt werden [SVC06].

Die verwendeten Beschreibungssprachen sind für diese Art der Abstraktion ausgelegt. Ein typischer Vertreter dafür ist SystemC einschließlich seiner Erweiterung auf SystemC AMS zur Beschreibung von analogen und mixed-signal Komponenten. Neben der Architektur konnten hier Protokolle und der damit zusammenhängende Datentransfer simuliert werden.

Die Abb. 8 zeigt die Architekturen eines Binary Amplitude Shift Keying (BASK) Modulator-Blocks. Die Resultate einer Systemsimulation sind als schematisch veranschaulichte Signalverläufe an den Schnittstellen der einzelnen Module dargestellt.

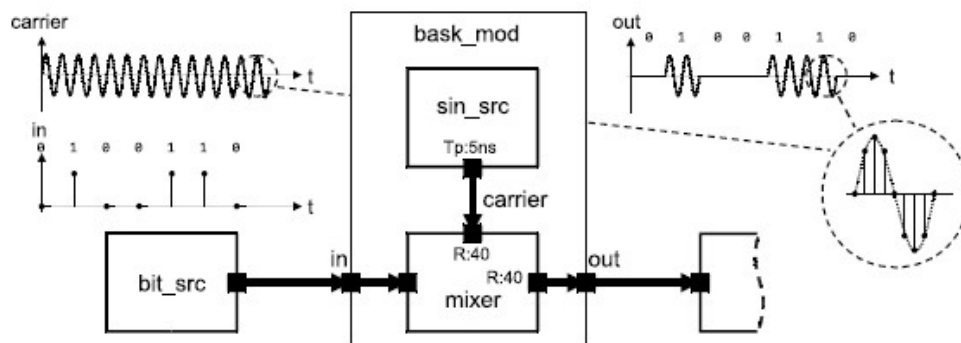


Abb. 8 Systemmodell eines BASK Modulators: Aufbau und schematisch dargestellte Signalverläufe als Resultat einer Systemsimulation [AMS10]

2.1.1.5 Protokoll-Simulation

Auf der höchsten hier betrachteten Ebene wurden Protokoll-Simulationen ausgeführt. Diese bezogen die Systemmodelle, Umgebungsbedingungen sowie Protokoll-Abläufe ein. Damit konnten typische Anwendungsszenarien nachgestellt und deren korrekte Abarbeitung unter verschiedensten Randbedingungen analysiert werden. Ziel war dabei der Vergleich verschiedener Varianten der Systemarchitektur. Neben den funktionalen Modellen aus den darunterliegenden Abstraktionsebenen spielten hier Modelle der räumlichen Ausbreitungsbedingungen eine Rolle, die durch Gebäudemodelle bereitgestellt wurden (s. Abb. 9). Für die Verifikation des Systems in der Anwendung war eine solche Einbeziehung von Betriebsbedingungen notwendig. So konnten für die Übertragung von typischen Datenpaketen beispielsweise variierende Ausbreitungsbedingungen und gestörte Übertragungskanäle durch Gebäudewände eingefügt werden. Damit konnte die Zuverlässigkeit der Übertragung unter realen Betriebsbedingungen verifiziert werden.

Auf Protokoll-Ebene kam als Simulator OMNeT++ [OMN16] zum Einsatz. Damit konnte die Abarbeitung von Kommunikationsprotokollen unter variierenden Eigenschaften der Netzknoten simuliert werden.

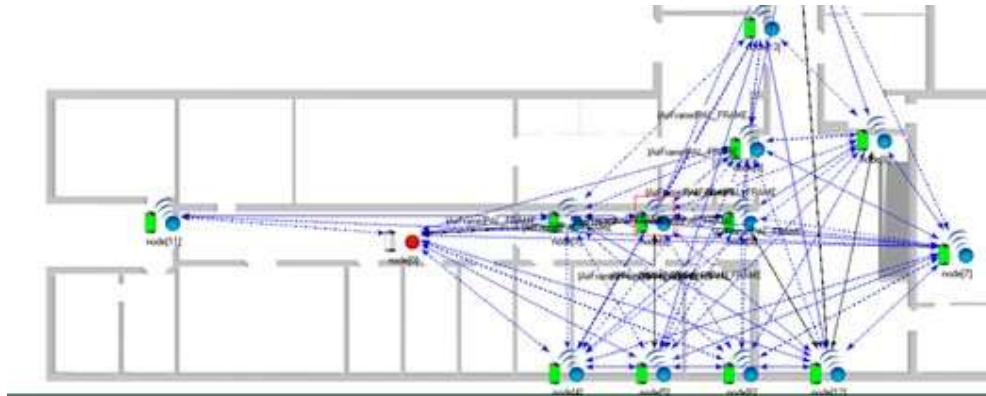


Abb. 9 Beispiel für die Simulation funkvernetzter Sensorknoten

2.1.2 Methoden zur automatisierten Erstellung von Nominalmodellen der Schaltungsblöcke

Eine grundsätzliche Unterscheidung von Modellierungsverfahren in der Anlogsynthese wird von Gielen vorgenommen [GIE02]. Danach stehen auf der einen Seite Black-Box-Methoden („fitting approaches“), bei denen lediglich das Ein-/Ausgangsverhalten als Ausgangspunkt für die Approximation des Verhaltens dient. Der innere Aufbau der zu modellierenden Schaltung wird jedoch als „Black Box“ angesehen. Demgegenüber gehen die White-Box-Methoden („constructive approaches“) von der Originalstruktur der Schaltung aus und versuchen dessen Beschreibung zu vereinfachen.

Einfache und gut automatisierbare Black-Box-Verfahren zur Modellerstellung sind die **numerischen Methoden**. Dabei wird eine Eigenschaft der Schaltung bzw. des Teilsystems in Abhängigkeit von einem oder mehreren Parametern über einem Raster von Stützstellen durch Simulation ermittelt und in Form von Tabellen abgelegt. Diese Tabellen können einerseits direkt Bestandteil des generierten Modells werden, man spricht dann von Tabellenmodellen. Ein Wert zwischen zwei Stützstellen wird unmittelbar beim Aufruf, meist durch lineare Interpolation erzeugt. Andererseits lässt sich eine numerische Approximation dazwischenschalten. Das ermittelte numerische Kenndatenfeld wird in diesem Fall durch Überlagerung von vorgebbaren Ansatzfunktionen genähert. Beispiele für Ansatzfunktionen sind Polynome oder Splines. Die Basisfunktionen zusammen mit den errechneten Koeffizienten bilden schließlich das Modell, so dass nicht mehr das gesamte Kenndatenfeld abgespeichert und durchsucht werden muss. Ein Nachteil numerischer Verfahren ist die feste Bindung an sämtliche Randbedingungen. Ändert sich ein weiterer Parameter (beispielsweise Betriebsspannung), so sind die Simulationen erneut durchzuführen.

Demgegenüber dienen bei einem **symbolisch** generierten Modell sämtliche Transistorgleichungen der Originalschaltung als Ausgangspunkt. Es handelt sich also um eine White-Box-Methode. Ausgehend vom vollständigen Gleichungssystem werden verschiedene Vereinfachungs- und Ersetzungsverfahren angewendet mit dem Ziel, die Anzahl der Gleichungen und Terme im System deutlich zu reduzieren. Dazu wird eine Referenzsimulation im interessierenden Bereich durchgeführt und anschließend durch weitere Simulationen ermittelt, welche Terme gestrichen werden können, da sie innerhalb einer vorgebbaren Fehler-schranke keinen Einfluss auf das Simulationsergebnis haben. Die verbliebenen Terme können weiterhin symbolische Größen beinhalten. Dabei ist wichtig, dass die resultierenden Modellgleichungen nur bezüglich der anfangs durchgeführten Referenzsimulation gültig sind. Eine Mischform stellen die semisymbolischen Verfahren dar, bei denen einige Parameter symbolisch belassen und andere durch numerische Werte ersetzt werden.

Bei der **analytischen** Modellierung dient dagegen die zu erfüllende Funktion der Schaltung als Ausgangspunkt. Dafür werden „von Hand“ analytische Gleichungen aufgestellt, wobei natürlich auch hier Rechner-

unterstützung in Form von numerischen und symbolischen Verfahren Anwendung findet. Analytische Modelle können für die Syntheseunterstützung effektiv eingesetzt werden, wenn für häufig wiederkehrende Schaltungsklassen parametrisierbare Templates erstellt werden. Darin ist mittels Gleichungen und Zuweisungen das grundsätzliche Verhalten beschrieben während durch freie Parameter ein konkreter Kennlinienverlauf berücksichtigt wird und sich wichtige Einflussfaktoren einstellen lassen. Gerade für die schnelle Variantensimulation bei der Optimierung und Dimensionierung können diese parametrisierbaren Modelltemplates sehr effektiv eingesetzt werden. In gewissem Sinne kann man die analytische Verhaltensmodellierung als Grey-Box-Methode auffassen: die Ansatzfunktionen der Kennliniengleichungen werden aus der Funktion des Blockes entnommen, die Parameter und Koeffizienten dieser Ansatzfunktionen ermittelt man aber durch Simulation des Ein-/Ausgangsverhaltens.

Die Parameterwerte für **parametrisierbare Verhaltensmodelle** gewinnt man durch Charakterisierung einer konkreten, nachzubildenden Schaltung. Dazu werden automatisch ablaufende Charakterisierungsumgebungen benötigt, die eine Schaltung simulieren und anschließend aus den Simulationsergebnissen die charakteristischen Kenndaten extrahieren. Viele Simulatoren bieten dafür Skriptsprachen an, die Charakterisierung und Parameterextraktion unterstützen sollen, nur wenige bereiten solche Umgebungen bereits vor, z.B. [VIR16].

2.1.2.1 Bewertung der Methoden zur automatisierten Erstellung von Nominalmodellen

Als sehr genau kann das Verfahren der **symbolischen Approximation** eingeschätzt werden. Als Ausgangspunkt dienen hier die Gleichungen der verwendeten Elemente. Für eine größere Anzahl Transistoren wird das entstehende Gleichungssystem jedoch schnell unhandlich. Die durchgeführten Untersuchungen an einer Schaltung mit 7 MOS-Transistoren (MOS-Level 1) zeigten bereits die Grenzen des Verfahrens auf. Eine Schaltung mit mehr als 20 Transistoren wird auf diese Art und Weise nicht mehr analysiert und modelliert werden können. Ansätze zur Lösung des Komplexitätsproblems liegen in der Vereinfachung der Transistormodelle. Nicht für jede Untersuchung ist ein komplettes BSIM-Modell erforderlich mit teilweise mehreren hundert Gleichungen. Dazu ist allerdings eine weitreichende Kenntnis der Modellgleichungen und der damit nachgebildeten Effekte notwendig. Automatische Vereinfachungen können bestenfalls bestimmte Kennlinienbereiche ausschließen, wenn diese in der fraglichen Schaltung nicht erreicht werden, beispielsweise wird ein Transistor ausschließlich in Sättigung betrieben. Ansätze für derartige Lösungen werden derzeit von Herstellern symbolischer Analysewerkzeuge untersucht.

Für große Schaltungen sind dagegen eher **Tabellenmodelle** geeignet. Die Gruppe der Fast-SPICE-Simulatoren verwendet Tabellenmodelle und ermöglicht dadurch die Simulation kompletter integrierter Schaltungen mit mehreren hundert oder tausend Transistoren. Demzufolge liegt es nahe, für ganze Blöcke einer Schaltung – unabhängig von der Größe – Tabellenmodelle einzusetzen. Wenn dabei viele Abhängigkeiten zu berücksichtigen sind, entstehen jedoch schnell hochdimensionale Tabellen, deren Auswertung beim Modellaufruf durch Interpolation zwischen den Stützstellen oder durch Berechnung einer Approximationsfunktion ebenfalls sehr rechenintensiv sein kann. Für die Modellierung von Hochfrequenz-Frontends wird seit Jahren auf dem Gebiet der Generierung von Tabellenmodellen geforscht.

Einen Kompromiss stellen die **parametrisierbaren Verhaltensmodelle** dar. Diese verwenden Wissen über den internen Aufbau eines Blocks, allerdings auf der Ebene der Beschreibungsgleichungen des gesamten Blocks. Im Einzelfall kann das System der Beschreibungsgleichungen das Ergebnis einer symbolischen Approximation sein. Häufig werden aber die Gleichungen von Hand aufgestellt und damit die wichtigen Zusammenhänge von den zu vernachlässigenden Eigenschaften getrennt. Dieser Prozess der Modellerstellung setzt sehr gutes Wissen in Schaltungstechnik und Modellierung voraus und kann normalerweise nicht dem Designer überlassen werden. Erfreulicherweise entstammt jedoch ein Großteil der verwendeten Schaltungen in der Analogtechnik einer überschaubaren Anzahl von Schaltungsklassen. Für solche typischen Schaltungsklassen können parametrisierbare Verhaltensmodelle vorbereitet werden. Durch Parameter werden die Modelle dann an eine konkrete Schaltungsrealisierung aus dieser Klasse angepasst. Dadurch wird Genauigkeit mit Flexibilität bei der Modellbildung vereint.

2.1.2.2 Symbolische Modellierung

Symbolische Modellierungsmethoden gehören zur Klasse der konstruktiven Verfahren (auch „White-Box-Methoden“) [GIE02]. Diese gehen direkt von der Struktur des nachzubildenden Systems aus. Durch die sehr enge Kopplung des Modells an die Schaltungsstruktur machen Änderungen in der Schaltungstopologie im Allgemeinen eine neue Modellierung notwendig.

Das Modellierungsprinzip besteht darin, das vollständige Gleichungssystem einer Schaltung mittels verschiedener Verfahren zu vereinfachen. Dabei wird eine Fehlerschranke vorgegeben, bis zu der die Simulation der Beschreibungsgleichungen des Modells von den Ergebnissen der Schaltungssimulation abweichen darf. Demzufolge ist das entstehende Modell von der Wahl der Vergleichssimulation abhängig.

Das vollständige Algebro-Differential-Gleichungssystem (DAE) dient als Ausgangspunkt für die Modellierung. Darin sind die Beschreibungsgleichungen aller Schaltungselemente (R, L, C, ...) enthalten. Für Transistoren kommen im Zeitbereich nichtlineare Modellgleichungen zum Einsatz. Es stehen verschiedene Modellansätze zur Verfügung, wie die Standard-MOS-Modelle (auf Berkeley-SPICE-Modellen beruhend), das Gummel-Poon-Modell, die BSIM-Modelle, die EKV-Modelle sowie die HICUM-Modelle für Bipolar-Transistoren. Im Kleinsignalbereich werden im Allgemeinen linearisierte Ersatzschaltung für die Transistoren angegeben. Erst in jüngster Zeit wird dazu übergegangen, in den Modellen anstelle von Ersatzkapazitäten direkt die Ladungsverschiebungen im Silizium zu beschreiben.

Hinzu kommen die linearen Kirchhoff'schen Knoten- und Maschengleichungen, welche die Verschaltung der Elemente repräsentieren. Zunächst wird für dieses vollständige DAE-System im interessierenden Bereich eine Referenzsimulation durchgeführt. Damit wird festgelegt, in welchem Bereich und bezüglich welcher Eingangssignale die Modellierung erfolgt.

Die symbolische Notation des Gleichungssystems erlaubt zunächst eine Reduktion der Anzahl der Gleichungen mittels automatischer Substitution und Elimination. Es werden Zwischenvariablen eliminiert und durch aufgelöste Gleichungen substituiert. Dieser Modellierungsschritt ist exakt und beinhaltet keine Näherung. Bei der Reduktion der Variablen und Gleichungen erhöht sich unter Umständen die Anzahl der Terme in den Gleichungen oder deren Komplexität. Durch Wahl der Verfahrensparameter kann der Anwender die Suche nach einem geeigneten Kompromiss beeinflussen.

Die eigentliche Abstraktion erfolgt durch systematisches, schrittweises Vereinfachen der Gleichungen. Entscheidend ist dabei der Einfluss eines Terms auf das Simulationsergebnis. Mit Hilfe des Sherman-Morrison-Theorems lässt sich dieser Einfluss für die Approximation im Kleinsignalbereich berechnen. Bei der transienten Analyse gibt es bisher keine Möglichkeit, diesen Einfluss zu berechnen. Deshalb werden einzelne Terme der Reihe nach gestrichen und nach jedem Schritt wird mit der anfangs durchgeführten Referenzsimulation verglichen, ob nach der Vereinfachung immer noch die vorgegebene Fehlerschranke eingehalten wird. Ansonsten ist der Schritt rückgängig zu machen [HAL03].

Für die durchgeführten symbolischen Analysen und Vereinfachungen stand das leistungsfähige Werkzeug Analog Insydes [ANA16] vom Fraunhofer Institut ITWM in Kaiserslautern zur Verfügung. Neben der Vereinfachung linearer Blöcke im Kleinsignalbereich können auch nichtlineare Blöcke mit Analog Insydes analysiert und bezüglich des Verhaltens im Zeitbereich approximiert werden. Weiterhin sind Verfahren zur Vereinfachung stückweise definierter Kennlinien implementiert, die gerade die Beschreibung von MOS-Transistoren wesentlich reduzieren können, wenn diese nur in bestimmten Teilen der Kennlinie betrieben werden.

Die Approximation nichtlinearer Schaltungen mit symbolischer Analyse [JAN05] wird an nachfolgendem Beispiel erläutert.

Beispiel: Komparator

Die DC-Transfer-Kennlinie eines Komparators ist in Abb. 10 dargestellt (durchgezogen). Die zugehörige Schaltung beinhaltet 14 MOS-Transistoren. Das DAE-System mit 79 Gleichungen und 250 Termen wurde mit Analog Insydes bezüglich der dargestellten DC-Transfer-Kennlinie analysiert.

Die symbolische Approximation dieser nichtlinearen Charakteristik erbrachte ein System von 7 Gleichungen mit 25 Termen, also eine Reduzierung etwa um den Faktor 10. Die resultierende DC-Transfer-Kennlinie des Modells ist ebenfalls in Abb. 10 eingezeichnet (gestrichelt). Die Abweichung liegt bei unter einem Prozent. Um eine Vorstellung von den auftretenden Gleichungen zu bekommen, ist das Ergebnis der Approximation in Abb. 11 angegeben, wobei zur einfacheren Illustration schon teilweise numerische Werte eingesetzt wurden.

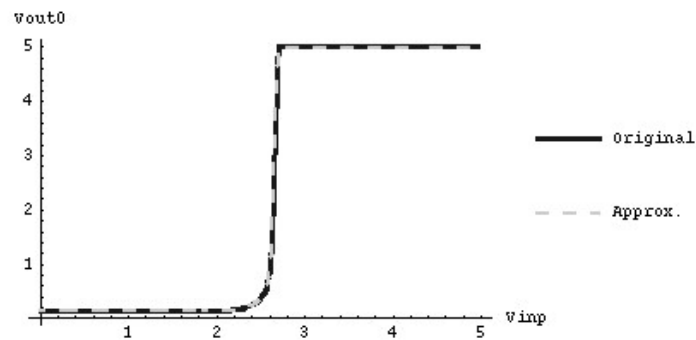


Abb. 10 Transfer-Kennlinie eines Komparators

$$\left\{ \begin{aligned} & \left\{ 0.008 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{-VT0\$NMOS+V\$left[t]}{2 VT}} \right]^2 - 0.0152 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{VT0\$PMOS-V\$inp[t]+V\$POWER[t]}{2 VT}} \right]^2 + \right. \\ & \quad 0.0032 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{-VT0\$NMOS+V\$right[t]}{2 VT}} \right]^2 + 3. \text{GMIN } V\$left[t] == 0, 0.008 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{VT0\$PMOS}{2 VT}} \right]^2 + \\ & \quad 0.008 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{-VT0\$NMOS+V\$left[t]}{2 VT}} \right]^2 - 0.008 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{Vdd+VT0\$PMOS-V\$mirroroutstage[t]}{2 VT}} \right]^2 == 0, \\ & \quad -0.008 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{Vdd+VT0\$PMOS-V\$mirroroutstage[t]}{2 VT}} \right]^2 + 0.008 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{VT0\$PMOS-V\$mirroroutstage[t]+V\$netl1l[t]}{2 VT}} \right]^2 + \\ & \quad 0.008 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{-VT0\$NMOS+V\$right[t]}{2 VT}} \right]^2 - 0.008 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{-VT0\$NMOS-V\$netl1l[t]+V\$right[t]}{2 VT}} \right]^2 == 0, \\ & \quad -0.0066 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{Vdd+VT0\$PMOS-V\$netl1l[t]}{2 VT}} \right]^2 + 0.0033 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{-2.5+I. Vkomp-VT0\$NMOS+V\$netl1l[t]}{2 VT}} \right]^2 - \\ & \quad 0.0033 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{-VT0\$NMOS+V\$netl1l[t]-V\$out0[t]}{2 VT}} \right]^2 + 0.0066 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{VT0\$PMOS-V\$netl1l[t]+V\$out0[t]}{2 VT}} \right]^2 == 0, \\ & \quad -0.032 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{VT0\$PMOS}{2 VT}} \right]^2 + 0.0152 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{-Vkomp+VT0\$PMOS+V\$POWER[t]}{2 VT}} \right]^2 + \\ & \quad 0.0152 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{VT0\$PMOS-V\$inp[t]+V\$POWER[t]}{2 VT}} \right]^2 == 0, \\ & \quad 0.0032 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{-VT0\$NMOS+V\$left[t]}{2 VT}} \right]^2 - 0.0152 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{-Vkomp+VT0\$PMOS+V\$POWER[t]}{2 VT}} \right]^2 - \\ & \quad 0.0032 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{-VT0\$NMOS+V\$left[t]-V\$right[t]}{2 VT}} \right]^2 + 0.008 VT^2 \text{Log} \left[1. + e^{\frac{-VT0\$NMOS+V\$right[t]}{2 VT}} \right]^2 == 0, \\ & \quad -2.5 - IN + Vkomp + V\$inp[t] == 0, \{ V\$inp[t], V\$left[t], V\$mirroroutstage[t], \\ & \quad V\$netl1l[t], V\$out0[t], V\$POWER[t], V\$right[t] \} \end{aligned} \right\}$$

Abb. 11 Gleichungssystem des Komparators

2.1.2.3 Numerische Modellierung

Interpolation

Komplexe, mehrdimensionale Abhängigkeiten im Modellverhalten lassen sich häufig schlecht analytisch beschreiben. Stattdessen kommen hier Tabellenmodelle (Table-Look-up models TLU) zum Einsatz. Dabei wird das Ein-/Ausgangsverhalten in Form einer Tabelle abgelegt, die mehrere Dimensionen beinhalten kann, beispielsweise kann die Ausgangsspannung eines Verstärkers in Abhängigkeit von Eingangsspannung, Biasstrom, Temperatur und Betriebsspannung aufgenommen werden (siehe Beispiel in Abb. 12). Bei der Messung und Tabellierung ist kein Wissen über den inneren Aufbau des Blocks notwendig (sogenann-

tes „Black-Box“-Modell), wenn man davon absieht, dass die Eingangswerte natürlich so gewählt sein müssen, dass der eigentlich interessierende Bereich des Verhaltens angesprochen wird. Allerdings wird die Messung von Tabellenwerten immer nur auf einem (nicht unbedingt äquidistanten) Gitter von Stützwerten erfolgen. Wird vom Modell ein Wert zwischen den Gitterpunkten verlangt, ist eine Interpolation notwendig. Im einfachsten Falle kommen dafür Polynome in Betracht. Je nach Art der Abhängigkeit und geforderter Modellgenauigkeit sollte entsprechend die Ordnung der Interpolation gewählt werden. Neben Polynomansätzen werden auch Spline-Interpolationen verwendet.

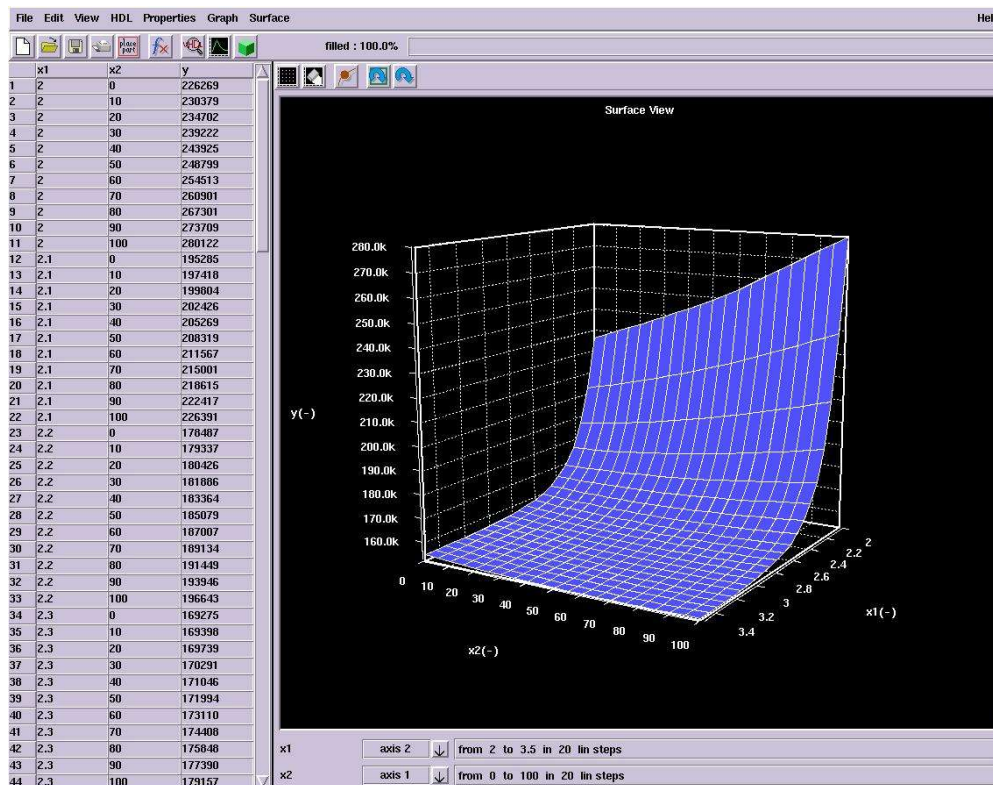


Abb. 12 Visualisierung eines Tabellenmodells für die Abhängigkeit der Bandbreite (y) von Temperatur (x2) und Betriebsspannung (x1)

Ein Teil der Modellierungssprachen und Simulatoren am Markt unterstützt die Abarbeitung von Tabellenmodellen durch effizient implementierte Interpolationsalgorithmen. Dadurch ist die schnelle Abarbeitung solcher Modelle in der Simulation gewährleistet. Beispielsweise enthält Verilog-A bereits im Standard eine entsprechende Anweisung „table“.

In der neuesten Version des Simulators ADVanceMS von Mentor Graphics wird diese Anweisung über eine spezielle Bibliothek auch für Modelle in VHDL-AMS zugänglich gemacht. Der VHDL-AMS-Standard enthält keine Konstrukte für Table-Look-up Modelle. Dadurch sind die Modelle nicht in einem anderen VHDL-AMS-Simulator nutzbar.

Von Synopsys wird im Rahmen der Saber Tools ein Werkzeug Model Architect angeboten, mit dem sich für einzelne Klassen von Schaltungen und Systemen (Batterien, Sicherungen, Power Electronics, ...) Modelle generieren lassen. Unter anderem wird dabei auch ein Hilfsmittel zur Generierung von Table-look-up Modellen angeboten (siehe Abb. 12). Eingelesene ASCII-Tabellen können in MAST und VHDL-AMS generiert werden. Der zugrundeliegende Interpolationsalgorithmus steckt auch hier in einer eigenen Bibliothek. Die Modelle sind demnach ebenfalls nicht portierbar.

Approximation

Eine Alternative zur Interpolation von abgelegten Tabellen ist die Approximation der Tabellendaten mittels Ansatzfunktionen im Zuge der Modellbildung. Zum Zeitpunkt des Modellaufrufs tritt an die Stelle einer Interpolationsaufgabe die Auswertung der Approximationsfunktion. Eine bekannte Methode ist der Einsatz von radialen Basisfunktionen (RBF) als Ansatz für die Approximation. Verschiedene Typen von Ansatzfunktionen eignen sich für diese Art der Approximation als Kerne (siehe Abb. 13).

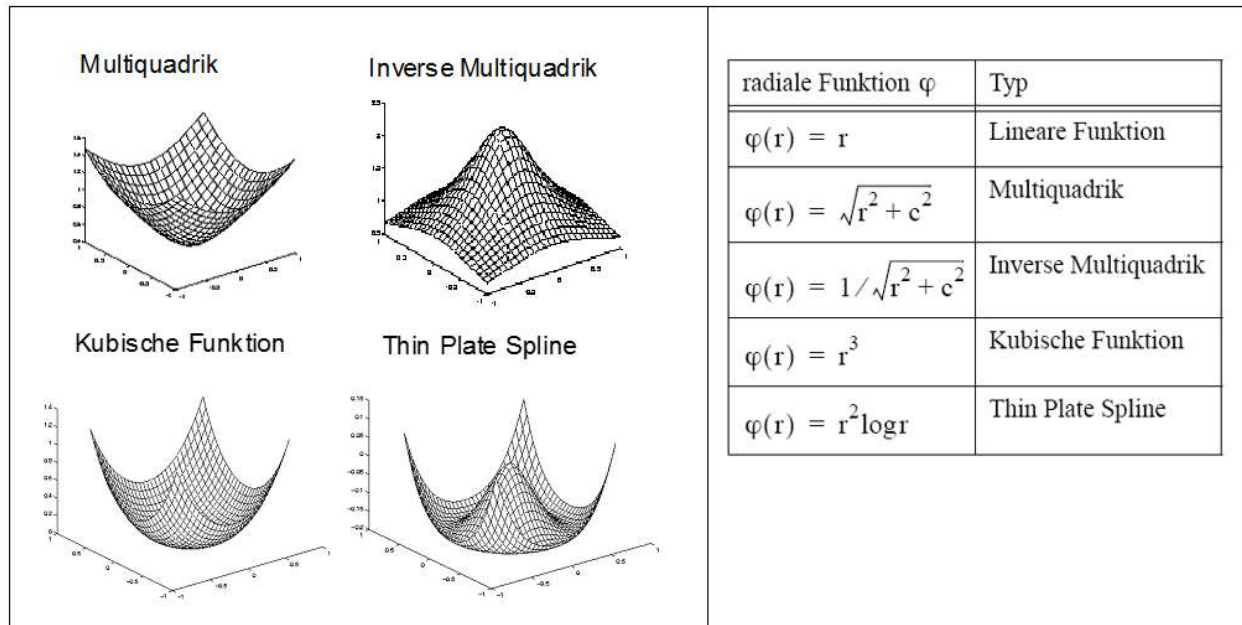


Abb. 13 Typen von RBF-Ansatzfunktionen

Der Vorteil einer Approximation besteht darin, dass die Funktion zum Zeitpunkt des Modellaufrufs bekannt ist und lediglich ausgewertet werden muss. Allerdings kann diese Aufgabe ebenso zeitintensiv sein, wenn die Anzahl der „Zentren“ (Zentralpunkt eines radialen Basiskerns) sehr groß ist. Es können Methoden eingesetzt werden, die Anzahl dieser Kerne zu verringern.

Bei Fraunhofer IIS/EAS ist ein Werkzeug entwickelt worden, welches die Approximation mittels Radialer Basisfunktionen ermöglicht (Multivariate Approximation mit RADialen BasisfUnktionen – MARABU). Die in Abb. 13 gezeigten Basisfunktionen sind darin implementiert und können per Kommandozeilenschalter ausgewählt werden. Die Approximation wird ausgeführt und in Form von Koeffizientenmatrix, Stützstellenmatrix und Normierungsvektor abgelegt. Zum Zeitpunkt des Modellaufrufs wird ein Funktionswert durch Matrizenoperationen berechnet. Als Modellformate stehen C, VHDL-AMS sowie HDL-A zur Verfügung. Eine Routine zur Auswertung der Modellmatrizen und Berechnung des Funktionswertes ist selbst zu schreiben. Die Erfahrung mit MARABU bei der Approximation von Tabellen in der Modellierung von Anlogschaltungsblöcken zeigte, dass eine Auswerteroutine in der Hardwarebeschreibungssprache VHDL-AMS ineffizient ist. Eine Auswerteroutine, die in den Simulator eingebaut ist, wäre hier deutlich schneller, ebenso wie auch beim Interpolationsproblem. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Güte der Approximation entscheidend von der Form der zu approximierenden Funktion abhängt. Beispiele mit stückweise linearen Ein-/Ausgangsfunktionen in Abhängigkeit von Betriebsspannung oder Temperatur konnten aufgrund des sehr steilen Übergangs im Verstärkungsbereich und dem sehr flachen Verlauf in den Sättigungsbereichen nur sehr schlecht mit dem RBF-Ansatz approximiert werden. Es kommt dann zu typischen Überschwing-Erscheinungen (siehe Abb. 14).

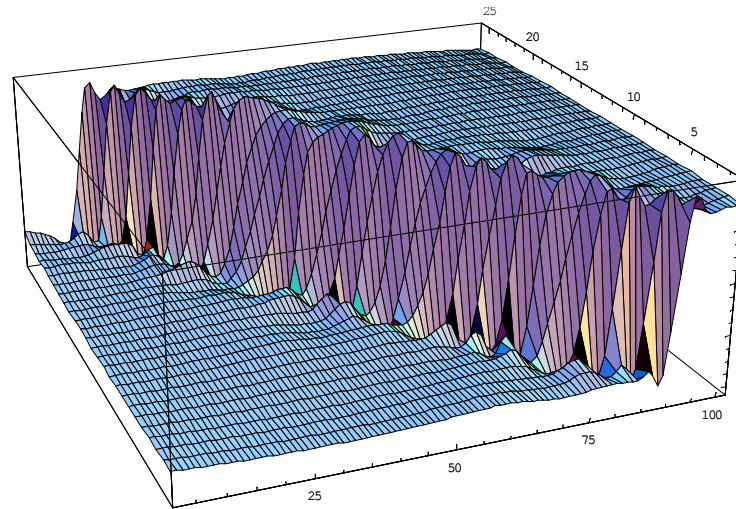


Abb. 14 I/O-Kennlinie eines Operationsverstärkers in Abhängigkeit von der Betriebsspannung nach Approximation mittels RBF-Ansatz

Parametrisierbare Verhaltensmodelle

Ein Nachteil der SPICE-Makromodelle ist der zusätzliche Aufwand für ihre Parametrisierung. Möchte man ein Modell für eine ganze Klasse von Schaltungen erzeugen (z.B. für alle single-ended Operationsverstärker), so sind die Parameter des Modells (Verstärkung, Bandbreite, Offsetspannung, Eingangswiderstand, ...) variabel zu halten. Bei der Verwendung eines solchen Modells zur Nachbildung einer konkreten Schaltung müssen die angegebenen Modellparameter in interne Größen der Ersatzelemente umgerechnet werden (z.B. werden aus den Angaben zu Polen und Nullstellen die Werte für RC-Glieder einer SPICE-Ersatzschaltung). In der Regel beeinflusst die Änderung eines Modellparameters die Werte mehrerer Elemente der Ersatzschaltung. Einen allgemeinen Ansatz bietet die Modellierung unter Verwendung von Verhaltensbeschreibungssprachen. Insbesondere eignen sich so genannte parametrisierbare Verhaltensmodelle für die Modellierung ganzer Klassen von elektronischen Schaltungen. Darin werden für die Nachbildung der grundsätzlichen Funktionalität Ansatzfunktionen gewählt. Die Ansatzfunktionen enthalten freie Parameter, welche freie Parameter des Modells werden oder aus den Modellparametern in einem Initialisierungsschritt berechnet werden können. Bei diesem Modellierungsverfahren ist der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen im Allgemeinen bekannt. Damit kann eine an das Problem angepasste Ansatzfunktion gewählt werden. Beispielsweise werden für das Begrenzungsverhalten von Verstärkern häufig als Ansatzfunktionen Tangens hyperbolicus oder ungerade Polynome verwendet. Die Koeffizienten dieser Ansatzfunktionen werden dann aus den entsprechenden Modellparametern berechnet (z.B. aus dem Intercept Point 3.Ordnung IP3 bei einem Hochfrequenzverstärker).

Die Modellbildung verlangt, stets den Gültigkeitsbereich des Modells zu beachten. Ansatzfunktionen werden typischerweise nur für einen gewissen interessierenden Arbeitsbereich des Modells aufgestellt. In diesem Bereich wird durch geeignete Parametrisierung der Funktion für Übereinstimmung von Modell und Schaltung gesorgt. Die gesetzten Grenzen der Ansatzfunktion während der Parameterermittlung bilden gleichzeitig auch den Gültigkeitsbereich des Modells. Der Anwender des Modells ist auf die Grenzen des Modellgültigkeitsbereichs hinzuweisen. Außerhalb der Gültigkeitsgrenzen kann das Modell durch die parametrisierten Ansatzfunktionen weiterhin sinnvolles Verhalten zeigen, das jedoch nicht notwendigerweise mit dem Verhalten der Schaltung in diesem Bereich übereinstimmt. Andere Ansatzfunktionen verhalten sich jenseits der spezifizierten Grenzen numerisch instabil. Polynomansätze neigen zu Oszillationen, Exponentialfunktionen zu numerischen Überläufen. Dies zeigt die Notwendigkeit einer Überwachung der Modellgrenzen.

Beispiel: Klasse der Operationsverstärker

Die Aufgabe bestand darin, für die Klasse pinkompatibler Schaltungen ein allgemeines Modelltemplate zu erstellen. Es soll die prinzipiellen Zusammenhänge der betrachteten Schaltung als analytische Gleichungsbeschreibung enthalten. In diesen Gleichungen müssen freie Parameter verbleiben, die eine Anpassung des Modells an eine konkrete Schaltungsrealisierung erlauben. Im Allgemeinen sind die freien Parameter der analytischen Gleichungen nicht mit den Modellparametern, die nach außen hin sichtbar sind, identisch. Es ist demzufolge ein Abschnitt in der Initialisierung des Modells erforderlich, der äußere in innere Parameter umrechnet.

Die Modellparameter werden mittels Charakterisierung einer Schaltungsrealisierung ermittelt. Dazu müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein: Erstellung von Testbenches, mit den die charakteristischen Größen der Schaltung automatisiert ermittelt werden können und Vorbereitung von Extraktionskripten, mit denen die charakteristischen Werte aus der aufgenommenen Waveform extrahiert werden können. Das Modelltemplate zusammen mit einem Parametersatz bildet dann ein Modell. Es ist günstig, wenn ein parametrisierbares Verhaltensmodell modular aus Teilblöcken aufgebaut werden kann. Das ist möglich, wenn entkoppelbare Effekte vorliegen, wie beispielsweise das Ein- und Ausgangsverhalten, welches sich häufig recht gut vom Übertragungsverhalten entkoppeln lässt. Auch die Unterteilung nach Teilblöcken für das Zeitverhalten im Großsignalbereich gegenüber dem Frequenzverhalten im Kleinsignalbereich ist im Allgemeinen sinnvoll. Das Konzept eines modularen Aufbaus hat auch den Vorteil, dass verschiedene Beschreibungen eines Moduls möglich sind, um die Flexibilität des Modells sicherzustellen. Der Austausch einer Beschreibung gegen eine andere für ein Modul ermöglicht eine Anpassung des Modells an das gewünschte Verhältnis von Genauigkeit zu Geschwindigkeit. So ist es für einfache Anwendungen ausreichend, das Sättigungsverhalten eines Operationsverstärkers mit einer stückweise linearen Kennlinie nachzubilden. Für genauere Untersuchungen kann diese beispielsweise durch eine tanh-Kennlinie ersetzt werden. Abb. 15 zeigt beispielhaft eine Operationsverstärkerschaltung. Durch Charakterisierung wurden die tabellarisch aufgeführten typischen Kenngrößen für diese Schaltung ermittelt. Mit diesen Werten wird das als Blockdiagramm dargestellte Verhaltensmodell parametrisiert.

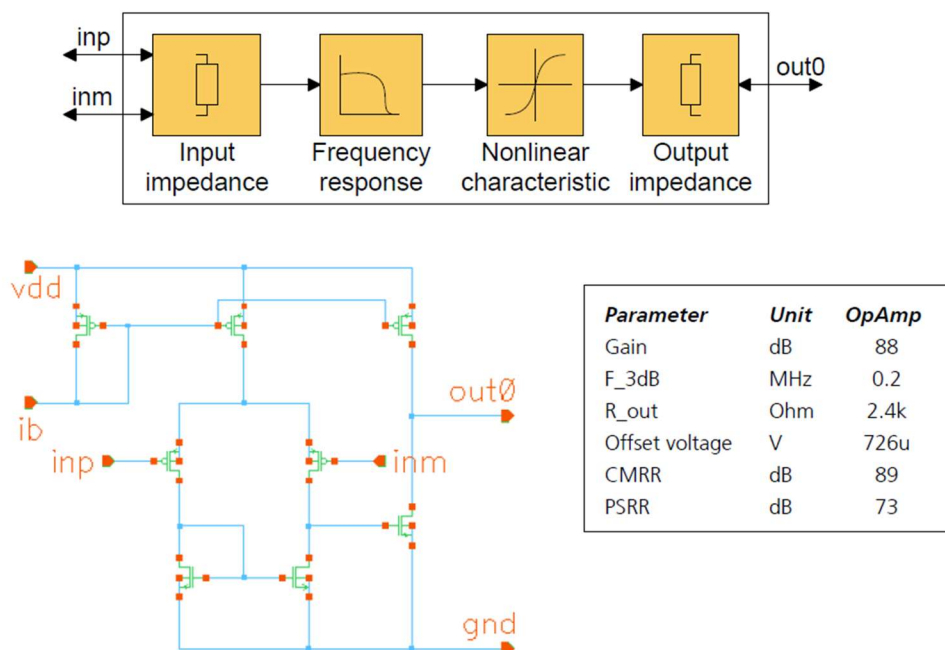


Abb. 15 Beispiel Charakterisierung eines Operationsverstärkers

2.1.3 Modellierung der ausführbaren Spezifikation der Kommunikationsarchitektur

2.1.3.1 Überblick

Angelehnt an die Sensor-Aktor-Struktur von Abb. 2 wurde ein SystemC-AMS-Systemmodell entwickelt, das die Komponenten Bewegungsmelder, Line, Power Supply (LED Power Supply), LED-Strings und eine Transceiver-Strecke umfasst. Damit sind z.B. Untersuchungen zu Bit-Fehlerraten, zum Signal-Rausch-Leistungsverhältnis und/oder anderen Kenngrößen für ein Kommunikationssystem in Abhängigkeit der einstellbaren Parameter der jeweiligen Teilmodelle möglich. Beschrieben werden nachfolgend die ausführbare Spezifikation der für den Bericht ausgewählten Modelle. Graphische Darstellungen illustrieren das Verhalten ausgewählter Signale an den Baugruppen.

2.1.3.2 Transceiver-Strecke

Die Transceiver-Strecke wurde zunächst als BASK-Übertragungsstrecke (Binary Amplitude Shift Keying) mit binärer Amplitudenumtastung im Zeitbereich als Passband-Modell (TXRX_PB) [MEY08], [FRE05], das aus einem BASK-Modulator und einem BASK-Demodulator besteht, aufgebaut. Diese Modelle sind die Umsetzung der in [JAN14] aufgeführten und aus [AMS10] übernommenen Architekturen (Abb. 16).

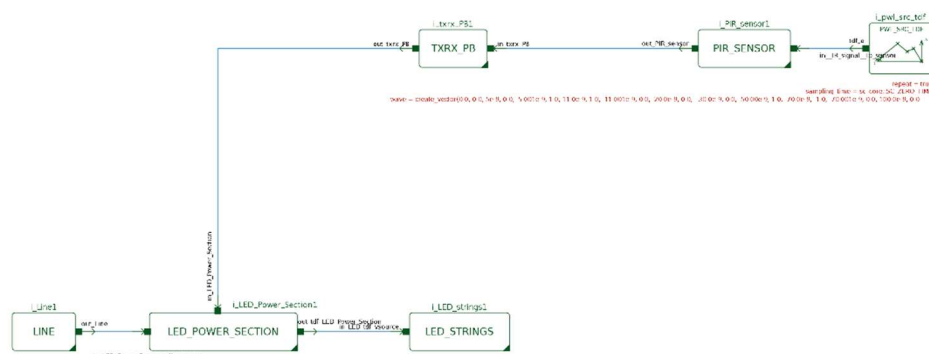


Abb. 16 Schematic des Gesamtsystems bestehend aus Bewegungsmelder, LED Power Supply, LED-Strings und Passband-Modell der BASK-Transceiver-Strecke

2.1.3.3 Bewegungssensor

Der Bewegungssensor wurde als PIR-Sensor¹ in Anlehnung an [FRA10] modelliert (Abb. 17). Sein Schematic ist in Abb. 18 abgebildet. Der ADC am Ausgang dient der Wandlung in den binären Datentyp, der vom Modulator einlesbar ist bzw. verarbeitet werden kann.

¹ PIR-Sensor – Passive InfraRed Sensor based on pyroelectric effect

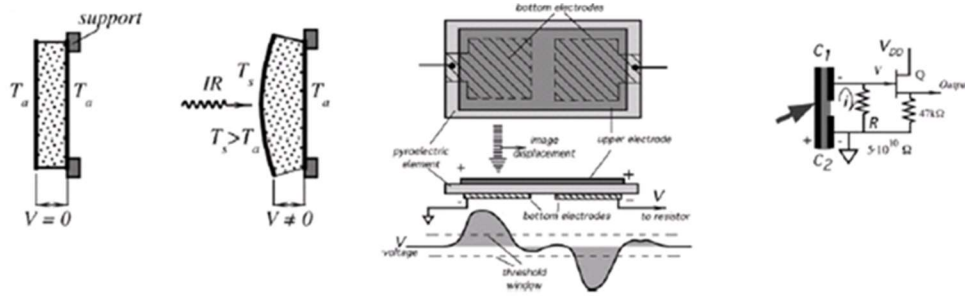


Abb. 17 Modellierung eines PIR-Sensors nach [FRA10]

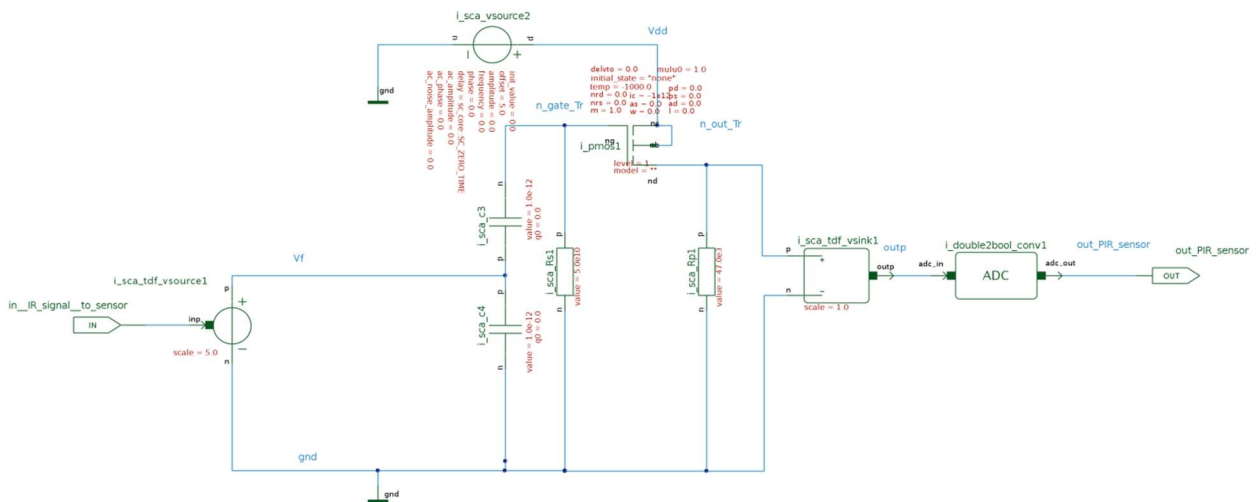


Abb. 18 Schematic des in SystemC-AMS nach [FRA10] modellierten PIR-Sensors

2.1.3.4 Line und LED Power Supply

Die Module Line und LED_Power_Section bilden gemeinsam die Spannungsversorgung mit Power Factor Correction (PFC) für die nachfolgende LED-Kette. Der Modul Line bildet dabei den Spannungsanschluss an das öffentliche Netz nach. Der Modul LED_Power_Section (Abb. 19) dient der eigentlichen Spannungsversorgung mit Power Factor Correction für die nachfolgende LED-Kette. Über den Schalter wird gewährleistet, dass an der LED-Kette immer nur dann eine Spannung anliegt, wenn aus der Übertragungsstrecke gemeldet wird, dass der Bewegungssensor eine Aktivität feststellt.

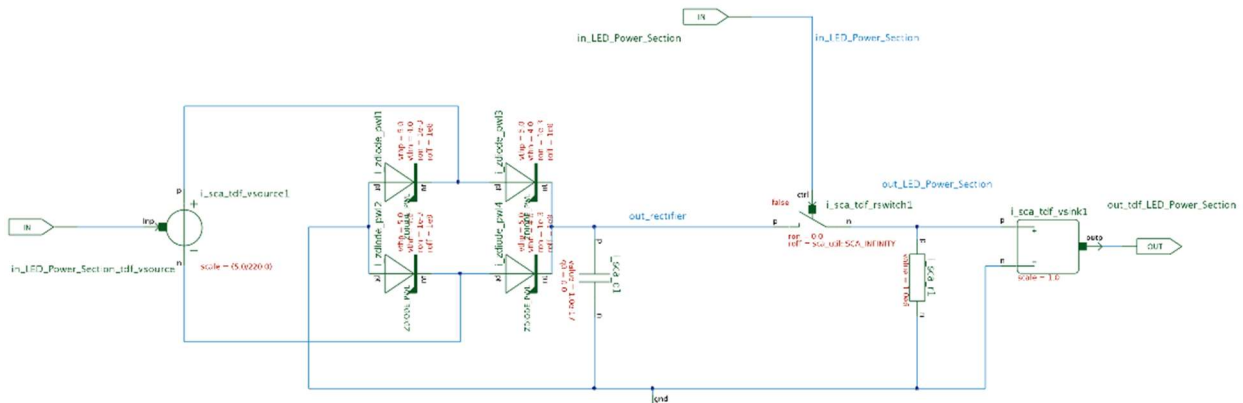


Abb. 19 Schematic des Moduls LED_Power_Section zur Spannungsversorgung der nachfolgenden LED-Kette in Anlehnung an [LED15]

2.1.3.5 Transceiver-Strecke – Passbandmodelle BASK-Modulator und BASK-Demodulator

BASK-Modulator (Abb. 20) und BASK-Demodulator sind als Modelle mit binärer Amplitudenumtastung im Zeitbereich als Passband-Modelle [MEY08], [FRE05] gestaltet und eine Umsetzung der in [JAN14] aufgeführten Architekturen. Beim BASK-Modulators wird ein Bit-Stream auf ein Sinus-Signal von 868.3 MHz aufmoduliert.

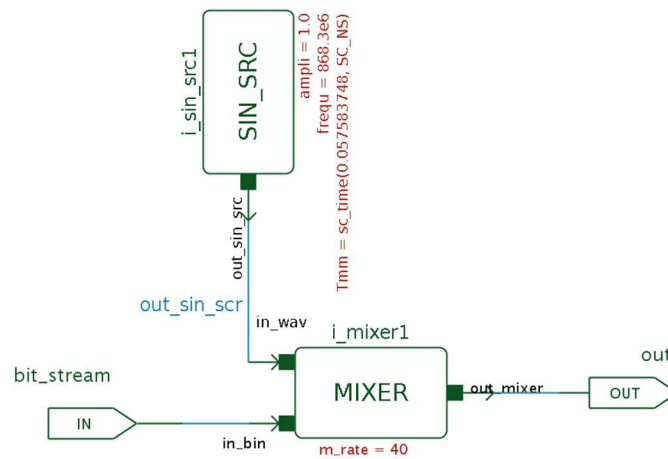


Abb. 20 Schematic des BASK-Modulators

Im BASK-Demodulators wird ein moduliertes Eingangssignal über die Blöcke Rectifier, Ltf_nd_filter und Sampler verarbeitet und demoduliert, und dann als Bit-Stream ausgegeben. Die Blöcke dienen als Mittelpunktgleichrichter (Rectifier), zur Glättung durch Tiefpassfilterung (Ltf_nd_filter – als Laplacetransformierte beschriebenes Tiefpassfilter) und zur Signalabtastung (Sampler).

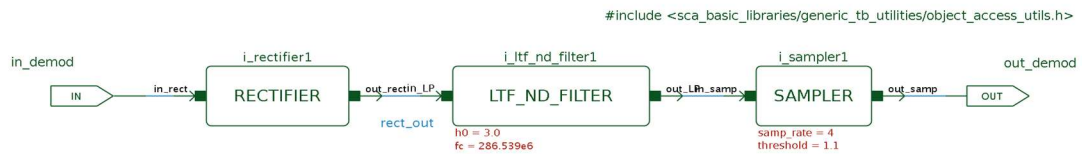


Abb. 21 Schematic des BASK-Demodulators

2.1.3.6 Transceiver-Strecke – Basisbandmodell

Zur Erhöhung der Simulationsgeschwindigkeit und um die Möglichkeit zu haben, Charakteristiken des Übertragungskanals detaillierter einstellen zu können, wurde die Übertragungsstrecke im Bildbereich als Modell im komplexen Basisband [MEY08], [FRE05] formuliert und die entsprechenden Modelle entwickelt. Dabei ist die Transceiver-Strecke als EnOcean Transceiver-Strecke mit wesentlichen Parametern gemäß des Physical Layer des Entwurfs des Standards ISO/IEC DIS 14543-3-10 [ISO11] modelliert (Modul TXRX_BB_BASK_TXCHRX in Abb. 16) worden.

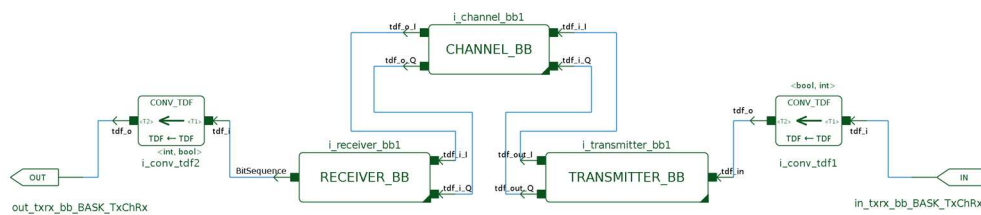


Abb. 22 Basisband-Modell der BASK-Transceiver-Strecke

2.1.3.7 Channel-Modell und Signalverhalten

In Abb. 23 ist die Realisierung des Basisband-Modells des in der Übertragungsstrecke enthaltenen eigentlichen Übertragungskanals (Channel) dargestellt. Der im Kanal enthaltene Modul NOISE_GEN modelliert das Kanalrauschen. Die Modellierung als Kanalmodell erfolgte hier durch additives weißes gaußsches Rauschen (AWGR), das den I- und Q-Nutzsignalen überlagert wird. Denkbar ist auch die Ergänzung durch zusätzliche Effekte, wie z.B. dem Dopplereffekt.

Die Konstellationsdiagramme für den Eingang und den Ausgang dieses Moduls sind in Abb. 23 dargestellt. Beim Konstellationsdiagramm für den Ausgang ist die nunmehrige zusätzliche Streuung durch das Kanalrauschen bez. der In-Phase-Achse zu erkennen.

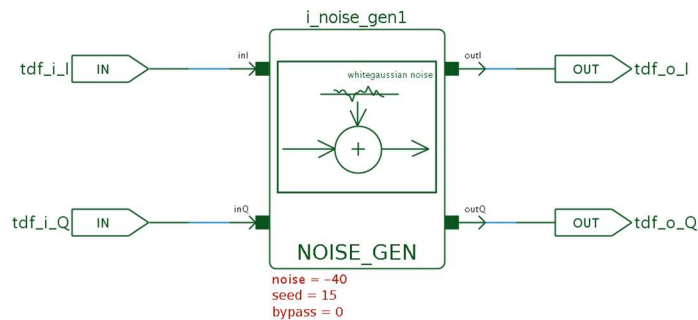


Abb. 23 Schematic für das Basisband-Modell des in der Übertragungsstrecke enthaltenen Channels

2.1.3.8 Signalverhalten an Baugruppenanschlüssen des Gesamtsystems

Abb. 24 zeigt das Signalverhalten an den Baugruppenanschlüssen des Gesamtsystems bestehend aus Bewegungsmelder, LED Power Supply, LED-Strings und BASK-Transceiver-Strecke im Zeitraum von 0-50 ms. Das ist ein 1000-fach größerer Zeitbereich als beim Passbandmodell. Aufgrund der Modellabstraktion zeigen die Signale kein Übergangsverhalten mehr zwischen den Signalfanken und den Signalpegeln.

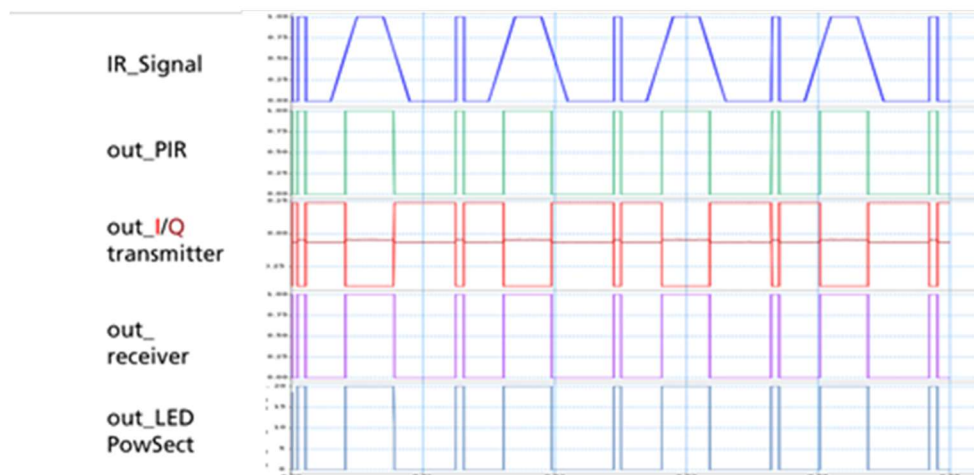


Abb. 24 Signalverhalten an Terminals von IR_Sensor, Transmitter, Receiver und PowerSection

2.1.4 Poweranalyse unter statistischen Aspekten

2.1.4.1 Projektdemonstrator Smart Home

Ziel des Projektdemonstrators war die Simulation des Gesamtsystems unter realen Bedingungen. Für die Beiträge von Fraunhofer IIS/EAS in diesem Komplex wurden - in Konsistenz zu den Demonstratorarbeiten der Projektpartner - die Kernkomponenten gemäß Abb. 2 in der realistischen, komplexen, virtuellen Anwendungsumgebung „ComTecFlat“ modelliert und unter ebenfalls wirklichkeitsnahen Anwendungsszenarien simuliert. ComTecFlat entspricht dabei in Abmessung und Ausstattung weitgehend dem am Lehrstuhl ComTec der Universität Kassel für Forschungszwecke eingerichteten, eine Küche sowie einen Wohnraum umfassende Smart Home (siehe Abb. 25). Der Grundriss von ComTecFlat ist in Abb. 26 angegeben. Grau

gekennzeichnet sind dabei die Möbel (Sessel, Tische, Schränke, ...), grün die Sensoren (PIR, Drucksensor, ...) und Verbraucher (LED, Kühlschrank, ...) und rot das Kontroll-Panel (über das alle Sensordaten ausgewertet und Verbraucher angesteuert/aktiviert werden).



Abb. 25 Smart Home des Lehrstuhles ComTec der Universität Kassel (ComTecFlat)

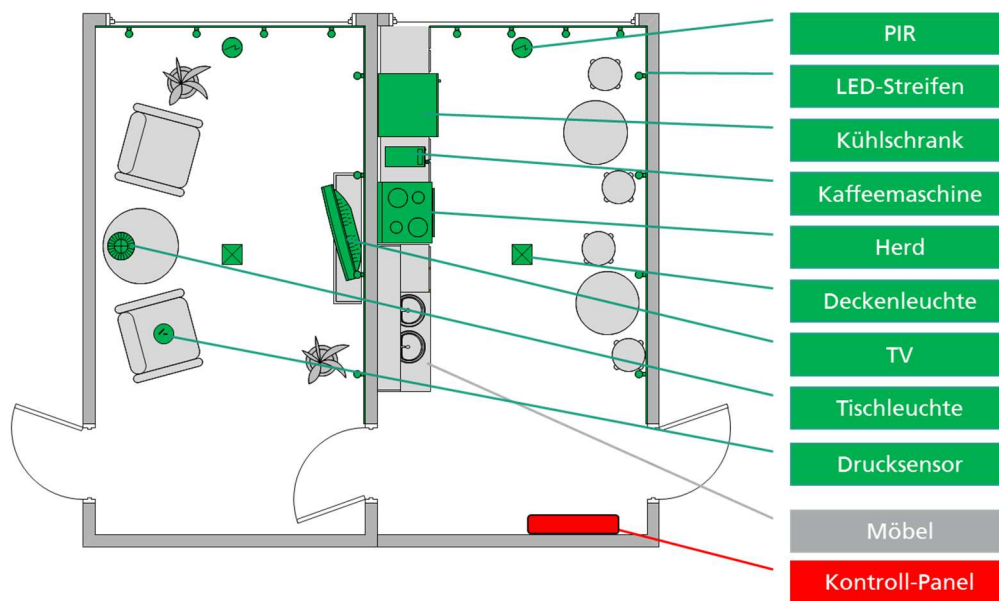


Abb. 26 Grundriss und Ausstattung von ComTecFlat

2.1.4.2 Analyseumgebung und Model Library

Als Analyseumgebung wurde das Softwaresystem OMNeT++ 5.0 („Objective Modular Network Testbed in C++“) [OMN16] ausgewählt, ein als Open-Source-Lizenz erhältliches, modulares Simulationsframework mit einer C++-basierten Komponentenbibliothek zur Generierung von Modellen und diskreten Ereignis-Simulatoren. In der Version 5.0 ist OMNeT++ als auf der Eclipse-Plattform [ECL16] basierende, integrierte Entwicklungsumgebung (Integrated Development Environment – IDE) verfügbar, die auch 2- und 3-dimensionale Grafikausgaben unterstützt (u.a. Qt-/Tk- oder OSG-basierte [OSG16] Laufzeitumgebung). Bei der Modellierung erfolgt die Erstellung von Verhaltensbeschreibungen mit C++, was das für EnKonSens gewünschte hohe Abstraktionsniveau ermöglicht; die Strukturbeschreibung erfolgt mit OMNeT++-spezifischen Ausdrucksmitteln (NED); ebenso die Modellkonfiguration (INI). Weiterhin wurde mit INET 3.4.0 eine

open-source Model Library eingesetzt, die z.B. die Modellierung von Netzwerk-Komponenten (unterschiedlichste Netzwerk-Protokolle; Kommunikation über Messages; Internet-Stacks) und einer Reihe von Modellen verschiedener OSI-Layer ermöglicht sowie Zugänge zur Modellierung drahtloser Kommunikation und Unterstützung der grafischen 2D/3D-Visualisierung bietet [INE16].

2.1.4.3 Modellierung

Modulare, parametrisierbare Modellerstellung der Kernkomponenten

Abb. 27 zeigt im linken Teil die grafische Repräsentation des Strukturmodells „EnoceanLedStripe“ der Kernkomponenten, wobei der eigentlichen LED-Teil aus folgenden Elementen besteht: Empfänger „rx“, Microcontroller „uc“, LED Power Controller „ledController“ und LED „led“. Für die (Verhaltens- sowie die strukturelle) Modellierung des Empfängers wurden INET-Komponenten adaptiert („antenna“, „transmitter“, „receiver“), siehe Abb. 27 rechter Teil. Der Energieverbrauch des Empfängers wurde im Empfänger-Modul selbst modelliert, während die Energieverbräuche von Microcontroller, LED Controller und LED im Modul „energyConsumer“ modelliert wurden. Alle Energieverbräuche werden in Modul „mains“ erfasst und akkumuliert.

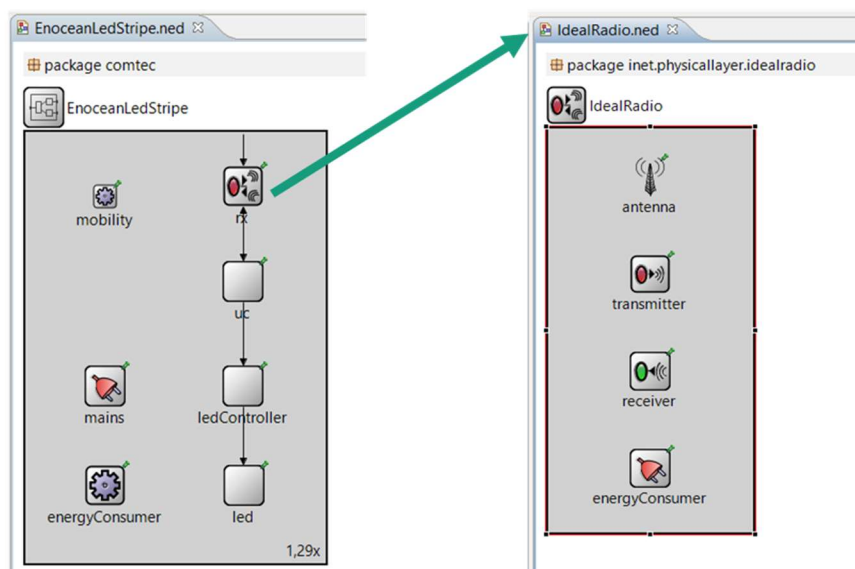
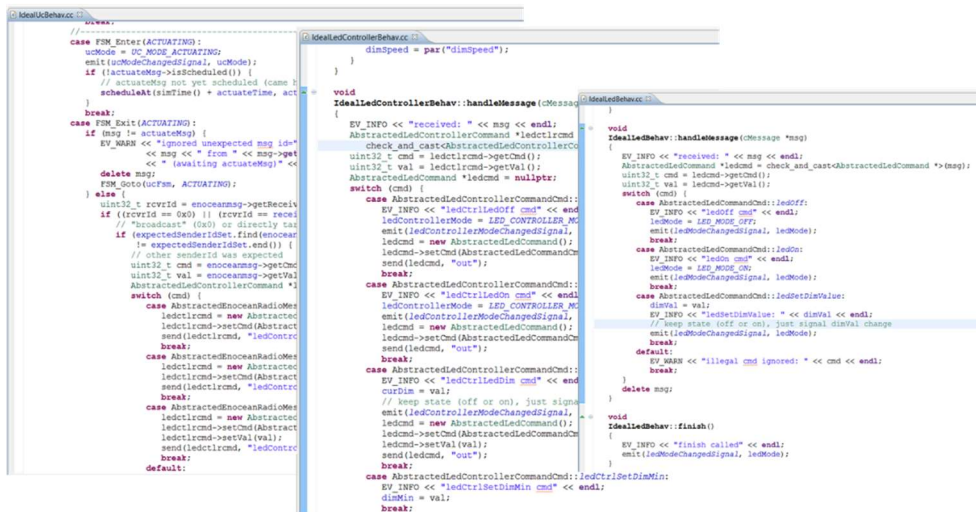


Abb. 27 Struktur-Modell der Kernkomponenten (links) und des Empfängers (rechts)

Wesentliche Ausschnitte der Verhaltensmodellierung (mit C++) der Komponenten „uc“, „ledController“ und „led“ des LED-Teils sind in Abb. 28 dargestellt, wobei insbesondere die abstrakte Beschreibung durch Zustandsgraphen (FSM) unter Verwendung der C++-Konstrukte switch/case ersichtlich wird.



The image shows three overlapping code editors displaying C++ code for behavioral modeling. The leftmost editor shows a state machine (FSM) for 'IdealLedBehav' with states like 'ACTUATING' and 'LEDMODE_CHANGED'. The middle editor shows 'IdealLedControllerBehav' with a 'handleMessage' function and a 'dimSpeed' parameter. The rightmost editor shows 'IdealLedBehav' with a 'handleMessage' function and various state transitions and signal emissions.

Abb. 28 Verhaltensmodellierung für Teilkomponenten von „ledStripe“ (Ausschnitte)

Modellierung einer abstrakten Anwendungsumgebung

Abb. 29 zeigt einen Ausschnitt der Strukturbeschreibung (NED) im Rahmen der Modellierung der komplexen Anwendungsumgebung des SmartHomes von ComTec (vergleiche Abb. 26). Auf der obersten Hierarchieebene wurde das Module „ComTecFlat“ modelliert, wobei als Hintergrundgrafik der maßstabsgemäße Grundriss des Demonstrator-SmartHomes ohne Sensoren und Aktoren (Verbraucher) verwendet wird. Sensoren und Aktoren wurden als Submodule von ComTecFlat modelliert, und grafisch als Icons (für Sensoren und Beleuchtungselemente) bzw. als Bild (für TV, Kühlschrank, Kaffeemaschine und Herd) dargestellt. Für diese grafischen Darstellungen können auch Farben definiert und während der Abarbeitung der Simulation dynamisch verändert werden, was genutzt wurde, um den Betriebszustand anzuzeigen (grün: deaktiviert bzw. aus; rot: aktiviert bzw. ein). Weiterhin wurde ein Kontroll-Panel modelliert, das mit allen Sensoren und Aktoren interagiert und über das die Auswertung und Analyse der Sensordaten, sowie davon abgeleitet die Ansteuerung der Aktoren erfolgt. Das Kontroll-Panel besitzt ein Display-Modul zur Anzeige des Aktivierungszustandes (bei LEDs auch Dimmlevel) von Verbrauchern und des akkumulierten Energieverbrauchs aller Komponenten.

```

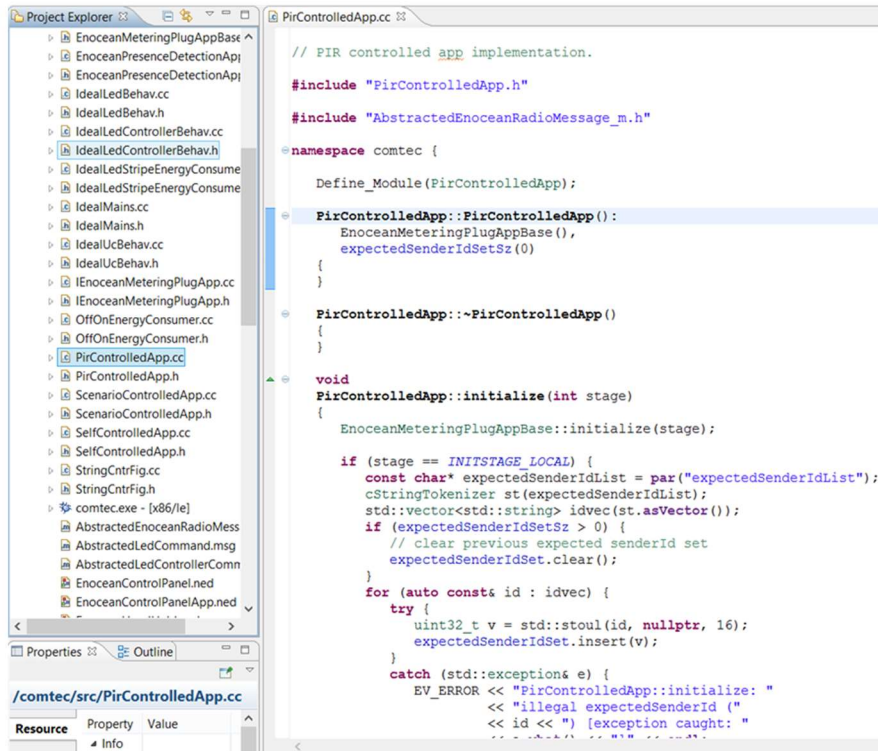
ComTecFlat.ned
submodules:
  scenarioManager: ScenarioManager {
    @display("p=9.5,1.3");
    script = default(xml("<scenarios/>")); // dummy, must set via omnetpp.ini
  }
  radioMedium: IdealRadioMedium {
    @display("p=9.5,2.1");
  }

  TV: EnOceanMeteringPlug {
    parameters:
      // TV set will be switched via PL presence detector (PIR)
      // (expectedSenderIdList set in omnetpp.ini)
      appType = "PirControlledApp";
      // NOTE that imageFigureName attribute must match @figure name above.
      imageFigureName = "TV";
      @display("p=3.6628757,2.5424666;i=transparent");
  }
  TL: EnOceanLedStripe {
    parameters:
      @display("i=TL,red,100;p=1.3,2.6");
  }
  DL1: EnOceanLedStripe {
    parameters:
      @display("i=DL,red,100;p=2.400128,2.223648");
  }
  DL2: EnOceanLedStripe {
    parameters:
      @display("i=DL,red,100;p=5.55,2.214824");
  }
  LS1: EnOceanLedStripe {
    parameters:
      @display("i=transparent;p=3.7151635,0.23695804");
      isLedStripe = true;
  }
  LS2: EnOceanLedStripe {

```

Abb. 29 Strukturbeschreibung von ComTecFlat (Ausschnitt)

Die Modellierung der Verlustleistung von ereignisgesteuerten Verbrauchern illustrieren die nachfolgenden Abbildungen. Abb. 30 zeigt dies für Verbraucher, die mittels Präsenzdetectoren aktiviert werden (für Drucksensoren wurde dieses Prinzip ebenfalls adaptiert). In Abb. 31 ist links die Modellierung der Aktivierung von Verbrauchern in Abhängigkeit von Anwendungsszenarien wiedergegeben, während rechts die Modellierung der Aktivierung von Verbrauchern nach vorgegebenen Mustern (consumptionIntervall/sleepIntervall) dargestellt ist.



```

// PIR controlled app implementation.
#include "PirControlledApp.h"
#include "AbstractedEnoceanRadioMessage_m.h"

namespace comtec {
    Define_Module(PirControlledApp);

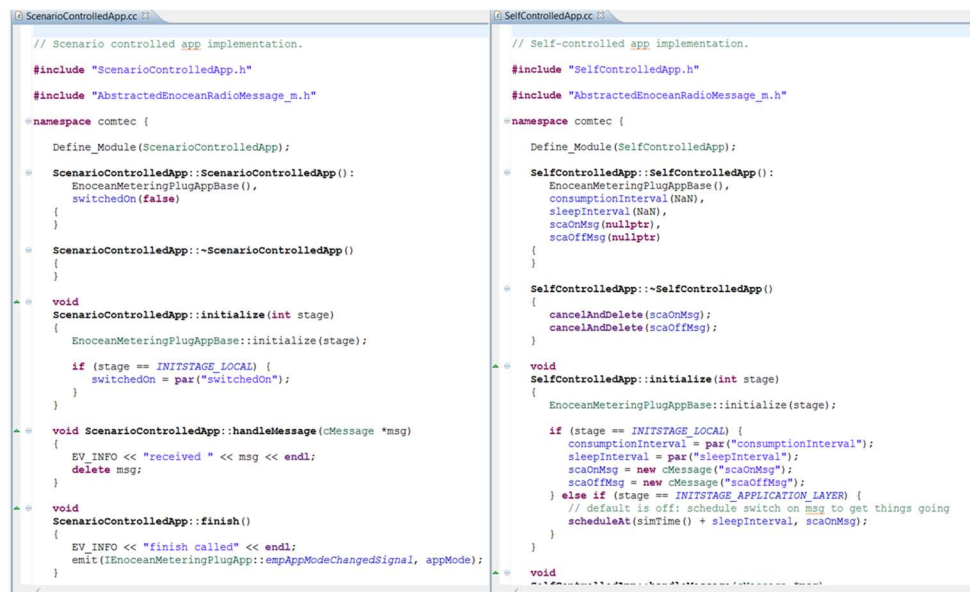
    PirControlledApp::PirControlledApp() :
        EnoceanMeteringPlugAppBase(),
        expectedSenderIdSetSz(0)
    {
    }

    PirControlledApp::~PirControlledApp()
    {
    }

    void
    PirControlledApp::initialize(int stage)
    {
        EnoceanMeteringPlugAppBase::initialize(stage);

        if (stage == INITSTAGE_LOCAL) {
            const char* expectedSenderIdList = par("expectedSenderIdList");
            cStringTokenizer st(expectedSenderIdList);
            std::vector<std::string> idvec(st.asVector());
            if (expectedSenderIdSetSz > 0) {
                // clear previous expected sender id set
                expectedSenderIdSet.clear();
            }
            for (auto const& id : idvec) {
                try {
                    uint32_t v = std::stoul(id, nullptr, 16);
                    expectedSenderIdSet.insert(v);
                }
                catch (std::exception& e) {
                    EV_ERROR << "PirControlledApp::initialize: "
                        << "illegal expectedSenderId "
                        << id << " [" << exception caught: "
                        << e.what() << "]" << endl;
                }
            }
        }
    }
}
    
```

Abb. 30 Verhaltensbeschreibung PirControlledApp (Ausschnitt)



```

// Scenario controlled app implementation.
#include "ScenarioControlledApp.h"
#include "AbstractedEnoceanRadioMessage_m.h"

namespace comtec {
    Define_Module(ScenarioControlledApp);

    ScenarioControlledApp::ScenarioControlledApp() :
        EnoceanMeteringPlugAppBase(),
        switchedOn(false)
    {
    }

    ScenarioControlledApp::~ScenarioControlledApp()
    {
    }

    void
    ScenarioControlledApp::initialize(int stage)
    {
        EnoceanMeteringPlugAppBase::initialize(stage);

        if (stage == INITSTAGE_LOCAL) {
            switchedOn = par("switchedOn");
        }
    }

    void ScenarioControlledApp::handleMessage(cMessage *msg)
    {
        EV_INFO << "received " << msg << endl;
        delete msg;
    }

    void ScenarioControlledApp::finish()
    {
        EV_INFO << "finish called" << endl;
        emit(IEnoceanMeteringPlugApp::empAppModeChangedSignal, appMode);
    }
}
    
```

```

// Self-controlled app implementation.
#include "SelfControlledApp.h"
#include "AbstractedEnoceanRadioMessage_m.h"

namespace comtec {
    Define_Module(SelfControlledApp);

    SelfControlledApp::SelfControlledApp() :
        EnoceanMeteringPlugAppBase(),
        consumptionInterval(NAN),
        sleepInterval(NAN),
        scaOnMsg(nullptr),
        scaOffMsg(nullptr)
    {
    }

    SelfControlledApp::~SelfControlledApp()
    {
        cancelAndDelete(scaOnMsg);
        cancelAndDelete(scaOffMsg);
    }

    void
    SelfControlledApp::initialize(int stage)
    {
        EnoceanMeteringPlugAppBase::initialize(stage);

        if (stage == INITSTAGE_LOCAL) {
            consumptionInterval = par("consumptionInterval");
            sleepInterval = par("sleepInterval");
            scaOnMsg = new cMessage("scaOnMsg");
            scaOffMsg = new cMessage("scaOffMsg");
        }
        else if (stage == INITSTAGE_APPLICATION_LAYER) {
            // default is off: schedule switch on msg to get things going
            scheduleAt(simTime() + sleepInterval, scaOnMsg);
        }
    }

    void
    SelfControlledApp::handleMessage(cMessage *msg)
    {
        EV_INFO << "received " << msg << endl;
        delete msg;
    }
}
    
```

Abb. 31 Verhaltensbeschreibung ScenarioControlledApp und SelfControlledApp (Ausschnitte)

Modellierung von Anwendungsszenarien

Die Modellierung von Anwendungsszenarien hat einen engen Bezug zur Spezifikation von Simulationsläufen und basiert darum auf den hierzu in OMNeT++ 5.0 verfügbaren Ausdrucksmitteln. Die Konfiguration und Parametrisierung von Modellen für die Simulation erfolgt über das INI-File omnetpp.ini. Dort sind auch Ausdrucksmittel für die Definition von Szenarien und die Verwaltung eines Scenario Managers (als INET 4.3.0 Komponenten) verfügbar. Die gebotene Möglichkeit, durch den Scenario Manager XML-Files (und in

diesen hierarchisch wiederum XML-Files) zu referenzieren, erleichtert die modulare, transparente Erstellung von Anwendungsszenarien.

Für die realitätsnahe Beschreibung von Anwendungsszenarien wurden verschiedene angenommene Tagesabläufe für das Ehepaar „Paul und Paula“ und ihre Reinigungskraft „Gerda“ konzipiert (Abb. 32). Zur Modularisierung der Bewegungsabläufe wurden Fixpunkte in ComTecFlat definiert und darauf basierende, in unterschiedlichen Anwendungsszenarien/Tagesabläufen wiederverwendbare Segmente für Bewegung der Personen in XML spezifiziert.

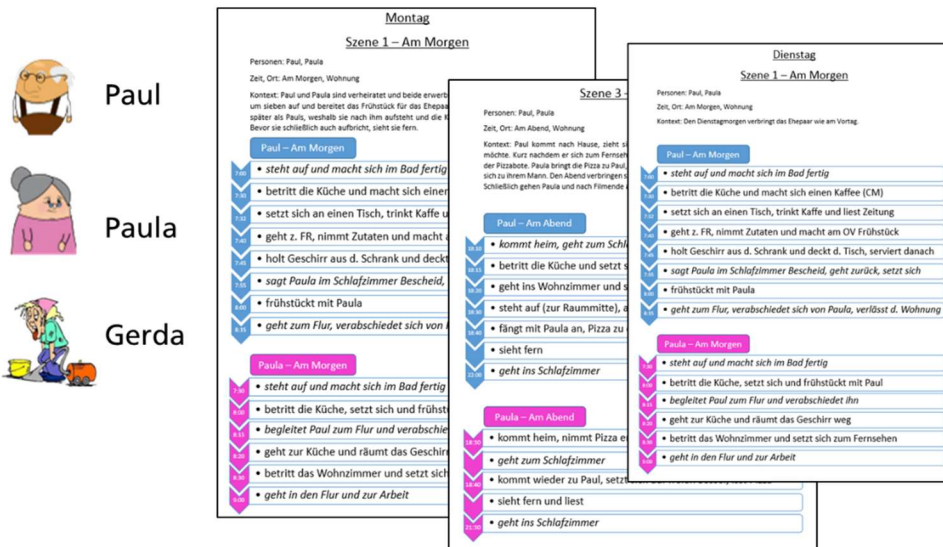


Abb. 32 Ausschnitte aus der Konzeption von angenommenen Tagesabläufen

2.1.4.4 Simulation

Zur Analyse zustands-diskreter Modelle – zu dieser Klasse zählen auch die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Netzwerk-Modelle mit Charakterisierung des Leistungsverbrauchs – ist die Simulation eine bewährte Methode. Genutzt wird dabei die Möglichkeit, das dynamische Verhalten solcher Modelle für gewünschte Konfigurationen in einer virtuellen Umgebung (also auf dem Rechner) zu beobachten. Dafür werden in der Simulation spezifizierte Anwendungsszenarien experimentell „durchgespielt“. OMNeT++ 5.0 bietet solche Möglichkeiten zum ereignisorientierten Austausch von Nachrichten zwischen Modulen zu diskreten Zeitpunkten und ist darüber hinaus mit seinen vielfältigen Zugängen zu Monitoren, Objekt-Navigation, Aufzeichnen und Auswerten der Simulationsabläufe und Simulationsergebnisse für die bestehenden Analyseaufgaben des EnKonSens-Projektbeitrages gut geeignet. Weiterhin bietet OMNeT++ mit seiner grafischen Benutzerschnittstelle (2D: auf Tk- bzw. Qt-basiert, 3D: OSG-basiert) den Zugang zur bildlichen Darstellung von Modulen und Nachrichten, auch zur Visualisierung von Zuständen und Ereignissen während einer interaktiven Simulation. Für die Projektarbeit in EnKonSens wurde die 2D-Visualisierung als geeignete Variante ausgewählt, wobei der Qt-Modus Geschwindigkeitsvorteile bei der Visualisierung von Nachrichten (z.B. zur Funkkommunikation zwischen Komponenten) brachte. Prinzipiell bietet aber das OMNeT++-IDE die Möglichkeit, interaktive Simulationen in unterschiedlichen Geschwindigkeiten ablaufen zu lassen (auch: jederzeit anzuhalten), bzw. in einem (schnellen) Batch-Modus grafische Visualisierungen zu deaktivieren und damit die Simulation im Command Mode auf der Konsole auszuführen. Der Command Mode bietet weiterhin den für z.B. Parameterstudien hilfreichen Geschwindigkeits-Vorteil, auch mehrere Prozesse parallel laufen zu lassen und dafür Multi-Core-Architekturen der für die Simulation verwendeten Rechner auszunutzen.

Abb. 33 zeigt eine Momentaufnahme der interaktiven (grafischen) Simulation mit Darstellung der (drahtlosen) Kommunikation zwischen Control Panel und den anderen Komponenten. Wie in den Modellbeschreibungen vorgesehen, sind zum jeweiligen Simulationszeitpunkt aktivierte Sensoren und Verbraucher grün und nicht-aktivierte rot markiert. Zum Simulationszeitpunkt in ComTecFlat anwesende Personen (im Simulationsausschnitt ist das Paul) sind ebenfalls als Bild dargestellt. Im rechten Teil ist die Konsole mit der Anzeige von aktuellen und akkumulierten Energieverbräuchen und Aktivierungszuständen der Verbraucher in Abhängigkeit des aktuellen Zustandes in den zugrundeliegenden Anwendungsszenarien erkennbar.

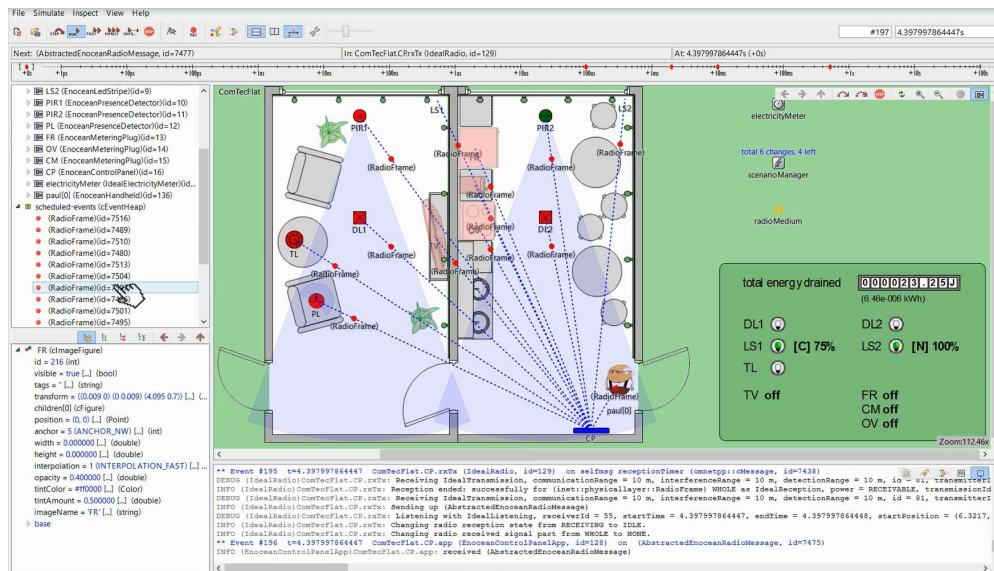


Abb. 33 Momentaufnahme der interaktiven Simulation

Während der Simulation werden die Energieverbrauchsdaten aller Verbraucher aufgezeichnet. Zu jedem Datum sind eine Reihe von Detailinformationen verfügbar, u.a. die zugehörige Konfiguration (also das simulierte Szenario des Simulationslaufes) sowie Minima/Maxima und Durchschnittswerte. Aus den generierten Daten können beliebige Mengen ausgewählt und zu Datensätzen in unterschiedlicher Granularität zusammengestellt, graphisch dargestellt und analysiert werden.

Für die Langzeitanalyse des Energieverbrauchs der Komponenten von ComTecFlat wurden drei realitätsnahe, die Dauer eines ganzen Tag betreffende, Anwendungsszenarien simuliert, für die Analyse aufbereitet und ausgewertet (Abb. 34).

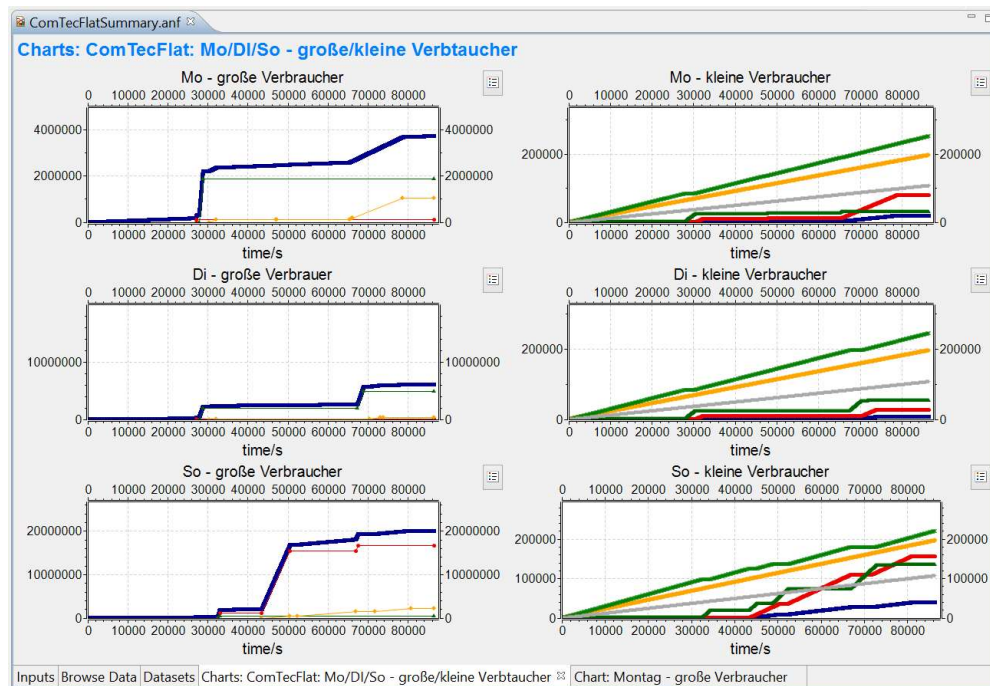


Abb. 34 Simulierte Energieverbrauchswerte für mehrere Anwendungsszenarien

2.2 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen

Durch das Projekt EnKonSens konnte die Expertise von Fraunhofer IIS/EAS zum anwendungsorientierten Entwurf zuverlässiger Systeme, insbesondere zur Modellierung und Bewertung von nichtfunktionalen Aspekten und zur Modellierung und Simulation von Nutzungsszenarien wesentlich erweitert werden. Damit können wir in diesem Bereich erweiterte Kompetenz nachweisen. In Übereinstimmung mit den Satzungszwecken verwertet Fraunhofer als gemeinnützige Forschungseinrichtung ihre Ergebnisse nicht durch eigene Produktion oder eigenen Vertrieb, wird aber im Einklang mit den Zielen der Förderung öffentlicher Forschungseinrichtungen das im Projekt erworbene Wissen für erfolgreiches Agieren auf dem F&E- Markt einzusetzen und andere Firmen bei der Systementwicklung unterstützen.

Mit der wachsenden Digitalisierung aller Lebensbereiche werden künftig zu entwickelnden Sensor-Aktor-Systeme komplexer, immer mehr vernetzt und intelligenter werden, und insbesondere bei mobilen und energieautarken Systemkomponenten hohe Anforderungen an Energieverbrauch und Zuverlässigkeit stellen. Entsprechend nehmen die Herausforderungen an die Systementwickler zu. Insbesondere die Qualität und Robustheit solcher Systeme wird nur dann hinreichend sichergestellt werden können, wenn in allen Entwurfsphasen entsprechende Effekte angepasst modelliert und analysiert werden. Der Bedarf an dafür geeignete Plattformen wird enorm wachsen, aktuell orientieren aber noch viele Entwurfsabläufe auf einen punktuellen Nachweis der geforderten Eigenschaften. Mit EnKonSens wurden neue Ansätze geschaffen, die zur Überwindung dieses Flaschenhalses beitragen. Die Lösungen von EnKonSens zur frühzeitigen und abstraktionsniveauübergreifenden Validierung von Alterungseffekten und Energieverbrauch erlauben die lückenlose, effektive modellbasierte Überprüfung entsprechender Kundenanforderungen vom Zulieferer bis zum Systemintegrator, was Entwurfskosten senkt und die Sicherheit sowie Robustheit der Produkte erhöht.

In EnKonSens wurden prototypische Lösungen erarbeitet, die im Anschluss an das Projekt in erster Linie durch die KMU-Partner weiterentwickelt und wirtschaftlich verwertet werden. Fraunhofer wird diesen Prozess je nach Bedarf und Anforderung, z.B. im Rahmen weiterer Projekte und Direktaufträge, begleiten. Die Zielgruppe unserer im Projekt erarbeiteten Lösungen umfasst insbesondere deutsche Hersteller in der Anwendungsdomäne von Smart Home, wobei auch Ansätze für den künftigen Ausbau und Transfer unserer Angebote für Sensorsystem-Anwendungen in den Bereichen Smart City, Industrie 4.0 und Smart Health gesehen werden. Dafür wurde begonnen, entsprechende Kontakte zu geeigneten Firmen und Forschungspartnern aufzunehmen und auszubauen sowie sich gemeinsam aus diesem Netzwerk um entsprechende Projekte zu bewerben. Langfristiges Ziel ist es, führender Partner der Industrie im Bereich des Entwurfs robuster Systeme zu werden.

2.3 Fortschritt an anderen Stellen

Die von Fraunhofer im Projekt erarbeiteten Zugänge zur Modellierung und Simulation ordnen sich in das durch das Gesamtprojekt bereitgestellte Instrumentarium zur Bereitstellung zuverlässiger Elektronikkomponenten für Anwendungen im Smart-Home und der Gebäudeautomatisierung ein. Während der Laufzeit des Vorhabens wurden die Fortschritte auf dem Gebiet der rechnergestützten/automatisierten und qualitätsorientierten Entwicklung von Gebäudeautomatisierungslösungen – Modellierung und Simulation ordnet sich hier ein – verfolgt, u.a. im Rahmen der Kooperationsartion mit anderen akademischen Einrichtungen, wie TU München und OFFIS. Meist sind diese Arbeiten auf konkrete Teilgebiete (wie Energiemanagement, Sensorkonfiguration) oder konkrete Anwendungsdomänen (wie Facility Management, Ambient Assisted Living) fokussiert. Gegenüber konkurrierenden Ansätzen ermöglicht unser Plattformkonzept die Nutzung angepasster, effizienter Modellierungs- und Simulationszugänge für nichtfunktionale Systemeigenschaften über eine große Bandbreite von Abstraktionsniveaus von der Schaltung einzelner Komponenten bis zum Endprodukt und im Anwendungskontext konkreter Nutzungsszenarien.

2.4 Erfolgte Veröffentlichung der Ergebnisse

- [AMS10] -, <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/icdea/for/projekt-enkonsens.html> Webseite Projekt EnKonSens (abgerufen am 23.12.2016)
- [IRL13] -, Presseinformation Fraunhofer IIS/EAS „Im richtigen Licht“, 17. Mai 2013
- [JAN14] R. Jancke, W. Vermeiren: Spezifikation der Anforderungen an die Modelle und die Simulationsumgebung. Projekt EnKonSens (Projektreferenz 16SV6022); Meilensteinbericht M1.2.2; Fraunhofer IIS/EAS, 28.7.2014
- [JAS15] Jancke, Roland; Sohrmann, Christoph: Quantitative Bewertung der Halbleiter-Zuverlässigkeit im automobilen Umfeld Tagungsband, 27. VDI-Fachtagung Technische Zuverlässigkeit, 20.-21.5.2015, Leonberg (Stuttgart), S. 295-306, ISBN 978-3-18-092260-7
- [JLM13] Jancke, Roland; Lange, André; Müller, Leif; Sohrmann, Christoph: Herausforderungen und Lösungsansätze für die Berücksichtigung des Alterungsverhaltens beim Entwurf integrierter Schaltungen Tagungsband, Zuverlässigkeit und Entwurf (ZuE) 2013, 24.-26.9.2013, Dresden, VDE-Verlag, Berlin, 2013, ISBN: 978-3-8007-3539-6, pp. 25–31
- [KRE16] Kreitmeier, Markus, „IoT facilitated by EnOcean: Technology, Applications and Business Cases“, Wireless World Research Forum (WWRF) Kassel 2016
- [RUE16] Rülke, Steffen, Fehlauer, Erhard, „Modellierung und Simulation auf Anwendungsebene“, Abschlussworkshop EnKonSens, Dresden 14.12.2016
- [SCH14] Schröder, Tim: „Robuste Chips fürs schlaue Haus“, Fraunhofer-Magazin 3/14 weiter.vorn, 2014

Literatur

- [AMS10] -, SystemC AMS extensions User's Guide, Copyright © 2009, 2010 by the Open SystemC Initiative (OSCI)
- [ANA16] -, Analog Insydes - Design System for Analog Circuits. <http://www.itwm.fraunhofer.de/en/departments/system-analysis-prognosis-and-control/electronics-mechanics-mechatronics/analoginsydes.html> (abgerufen am 23.12.2016)
- [BSI16] -, BSIM Group website. <http://www-device.eecs.berkeley.edu/bsim/> (abgerufen am 23.12.2016)
- [EKV16] -, EKV MOSFET Model website. <http://ekv.epfl.ch/> (abgerufen am 23.12.2016)
- [ELD16] -, Eldo Platform website. https://www.mentor.com/products/ic_nanometer_design/analog-mixed-signal-verification/eldo-platform (abgerufen am 23.12.2016)
- [FRA10] J. Fraden: Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, Fourth Edition, S. 267ff. Springer 2010
- [FRE05] Frevert, R., Haase, J., Jancke, R., Knöchel, U., Schwarz, P., Kakerow, R., Darianian, M.: Modeling and Simulation for RF System Design. Springer, 2005. ISBN 0-387-27584-3.
- [FRK05] R. Frevert; U. Knöchel; I. Harasymiv; W. Hartong; J. Hartung: Automatische Generierung templatebasierter HF-Basisband-Modelle. ANALOG '05 - 8. GMM/ITG-Diskussionssitzung: Entwicklung von Analog-schaltungen mit CAE-Methoden, Hannover, Deutschland, 2005
- [HAL03] Halfmann, T.; Wichmann, T.: Overview of Symbolic Methods in Industrial Analog Circuit Design, Reports of Fraunhofer ITWM, No. 44, Kaiserslautern, Germany, 2003
- [HBH10] F. Hopsch, B. Becker, S. Hellebrand, I. Polian, B. Straube, W. Vermeiren, H.-J. Wunderlich, "Variation-aware fault modeling," 19th IEEE Asian Test Symposium, ATS 2010, Shanghai, China, 1-4 December 2010
- [HIS16] -, HiSIM Research Center website. <http://www.hisim.hiroshima-u.ac.jp> (abgerufen am 23.12.2016)
- [HSP16] -, HSPICE website. <https://www.synopsys.com/verification/ams-verification/circuit-simulation/hspice.html> (abgerufen am 23.12.2016)
- [ISO11] Draft ISO/IEC 14543-3-10: INFORMATION TECHNOLOGY – HOME ELECTRONIC SYSTEM (HES) – Part 3-10: Wireless Short-Packet (WSP) protocol optimized for energy harvesting–Architecture and lower layer protocol. Date: 2011-05-10 Reference number: ISO/IEC JTC 1/SC 25 N.
- [JAN05] Jancke, R.; Böhme, S.; Clauß, C.; Halfmann, T.; Schwarz, P.; Sommer, R.; Trappe, P.: Modellierungsunterstützung für Mixed-Signal-Systeme durch symbolische Vereinfachung nichtlinearer Blöcke. Proc. ANALOG'05, Hannover
- [JAN14] R. Jancke, W. Vermeiren: Spezifikation der Anforderungen an die Modelle und die Simulationsumgebung. Projekt EnKonSens (Projektreferenz 16SV6022); Meilensteinbericht M1.2.2; Fraunhofer IIS/EAS, 28.7.2014
- [LED15] -, <http://www.lumileds.com/uploads/resources/files/philips-lumileds-DRE301.pdf>, Driver Configuration C, (abgerufen Feb. 2015)
- [MAT16] -, Mathworks – Makers of MATLAB and Simulink website. <https://de.mathworks.com/> (abgerufen am 23.12.2016)
- [MEY08] M. Meyer: Kommunikationstechnik: Konzepte der modernen Nachrichtenübertragung. Vieweg+Teubner, 3. Auflage 2008.
- [RSC16] -, The R Project for Statistical Computing website. <https://www.r-project.org/> (abgerufen am 23.12.2016)
- [SCS16] -, Spectre Circuit Simulator website. https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/tools/custom-ic-analog-rf-design/circuit-simulation/spectre-circuit-simulator.html (abgerufen am 23.12.2016)

- [SVC06] B. Straube, W. Vermeiren, T. Coym, M. Lindig, L. Grobelny, A. Lerch, "Fault diagnosis of analog integrated circuits using an analog fault simulator," 12th International Mixed Signal Testing Workshop (IMSTW) 2006. Informal Digest: Edinburgh, United Kingdom, 21-23 June, 2006
- [TAN16] -, Tanner EDA HiPer Silicon – Mentor Graphics website. <https://www.mentor.com/tannereda/resources/overview/tanner-eda-hiper-silicon-e02701ca-8afb-4631-9427-35f4b677e0c0> (abgerufen am 23.12.2016)
- [TCA16] -, TCAD website. <https://www.synopsys.com/silicon/tcad.html> (abgerufen am 23.12.2016)
- [VER06] -, Using Verilog-A Baseband Models of RF Blocks – Application Note, Nov. 2006, Product Version 6.1.0; Cadence 2006.
- [VIR16] -, Virtuoso Analog Design Environment website. https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/tools/custom-ic-analog-rf-design/circuit-design/virtuoso-analog-design-environment.html (abgerufen am 23.12.2016)
- [WOL16] -, Wolfram Mathematica website. <http://www.wolfram.com/mathematica> (abgerufen am 23.12.2016)