

Ultra-Low-Power Schaltungen für Mikrosysteme in CMOS-Technologie

von Dominic A. Funke

Kurzfassung:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Entwurf von elektronischen Schaltungen für eine neuartige Klasse von Mikrosystemen, den sogenannten „Lablets“. Bei den Lablets handelt es sich um Mikrosysteme mit einer Grundfläche von $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ bzw. $200\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$, die innerhalb von chemischen Lösungen mit darin enthaltenen Chemikalien interagieren und so elektronisch-chemische Systeme ermöglichen. Die Arbeit beginnt mit der Analyse von Anwendungsszenarien anhand von High-Level Simulationen. Bedingt durch die, im Vergleich zu dem Stand der Technik, sehr geringe Systemgröße und folglich sehr begrenzten Menge an elektrischer Energie, die zum Betrieb der Lablets mitgeführt werden kann, war es erforderlich Systemkonzepte zu entwickeln, die eine mittlere Leistungsaufnahme von weniger als $2\ \text{nW}$ aufweisen. Daher wurden zunächst die wesentlichen Ursachen von Verlustleistung in CMOS-Schaltungen beschrieben. Als Energiespeicher und Spannungsversorgung der Lablets wurde ein integrierter Kondensator angenommen, dessen Spannung sich proportional mit der entnommenen Ladung verringert, was eine zusätzliche Herausforderung beim Schaltungsentwurf darstellte.

Zur Umsetzung der genannten Anforderungen wurden auf Basis einer $180\ \text{nm}$ CMOS-Technologie verschiedene Teilschaltungen entworfen, die anschließend zu mehreren Systemdemonstratoren kombiniert wurden. Eine zentrale Komponente der Labletschaltung ist der als Taktgeber genutzte Oszillator auf Basis von Pseudo-Thyristor-Verzögerungselementen. Dieses Oszillatorkonzept, das in der Literatur bisher nur in Ansätzen untersucht wurde, ermöglichte die Realisierung eines Oszillators mit der für Lablets erforderlichen Kombination aus sehr geringer Schaltungsgröße ($35\ \mu\text{m} \times 18\ \mu\text{m}$), sehr geringer Taktfrequenz ($< 20\ \text{Hz}$), sehr geringer Leistungsaufnahme ($< 227\ \text{pW}$, minimal ca. $3\ \text{pW}$) und einem Versorgungsspannungsbereich von $1,8\ \text{V}$ bis $0,2\ \text{V}$. Als weitere Systemkomponente für Lablets wurde eine Schaltung zur Auswertung von Ionen-sensitiven Feldeffekttransistoren entworfen, die es den Lablets ermöglicht, ihre chemische Umgebung zu erfassen und so auf das Unter- oder Überschreiten von Schwellenwerten zu reagieren. Neben den auch hier entscheidenden Anforderungen geringe Leistungsaufnahme und Schaltungsfläche war es erforderlich, den Eingangswiderstand des Sensors sehr groß zu dimensionieren, um die angenommenen Sensorschichten nicht zu belasten.

Auf Basis von Oszillator, Sensor und weiteren Grundsaltungen wurden mehrere Systemdemonstratoren entworfen, gefertigt und vermessen. Das in der Arbeit als Systemdemonstrator B bezeichnete Lablet besteht aus Oszillator und Sensorschaltung sowie einem Zustandsautomaten, der die Reaktion des Lablets auf Änderungen der Sensorwerte implementiert. Systemdemonstrator B wurde als einzelnes Lablet mit den Abmessungen $200\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \times 35\ \mu\text{m}$ messtechnisch charakterisiert. Die durch eine Spannungsversorgung des Lablets aus einer $1\ \mu\text{F}$ Kapazität ermittelte Laufzeit von 19 Minuten entspricht einer mittleren Leistungsaufnahme von $1,4\ \text{nW}$. Die Funktionalität der Sensorschaltung wurde ebenfalls mit diesem Systemdemonstrator durch eine Messreihe positiv evaluiert. Um komplexe Digitalschaltungen auf dem Lablet integrieren zu können, wurde eine Standardzellenbibliothek entworfen, die einen Schaltungsentwurf durch Hardwarebeschreibungssprachen ermöglicht. Als wichtiger Einfluss auf die Stromaufnahme der Standardzellen wurde der Leckstrom der verwendeten Transistoren erkannt. Daher wurden anstelle der Standardtransistoren, die IO-Transistoren genutzt, da diese aufgrund ihrer höheren Schwellenspannung einen geringeren Leckstrom aufweisen. Die dadurch entstandene Reduktion der Leistungsaufnahme wurde mit einem Faktor von 37 abgeschätzt. Weiterhin wurde ein Analog-Subsystem entworfen, das die analogen Funktionen bereitstellt, die zur Erweiterung der Digitalschaltung zu einer vollständigen Labletschaltung benötigt werden. Neben den bereits vorhandenen Teilschaltungen (u.a. Oszillator und Sensorschaltung) wurde einer Power-On-Reset-Schaltung entworfen, die einen definierten Anfangszustand der Digitalschaltung ermöglicht. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung ab.