



Doctoral Thesis

## **Analysis and design of CMOS LC and crystal oscillators**

**Author(s):**

Basedau, Philipp Michael

**Publication Date:**

1999

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-003821675> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 13216

# Analysis and Design of CMOS LC and Crystal Oscillators

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZURICH

for the degree of  
Doctor of Technical Sciences

presented by  
PHILIPP MICHAEL BASEDAU  
Dipl. El.-Ing. ETH  
born 17. February 1960  
citizen of Neuhausen am Rheinfall, Schaffhausen

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Qiuting Huang, examiner  
Prof. Dr. Werner Bächtold, co-examiner

1999

# Abstract

This thesis treats the analysis and design of CMOS LC and crystal oscillators for applications in communication systems. Low oscillator noise and low power consumption are very important in wireless communications. With regard to these contradictory requirements, system optimization is only possible if the relation between the significant parameters and the oscillator performance is evident. Hitherto, this knowledge has been insufficient. The aim of this work is to provide designers with an indepth understanding of the mechanism responsible for oscillator noise, and to develop an optimized oscillator design based on CMOS technology. Due to the rapid progress in recent years, this cost-effective technology has become suitable for analog circuits up to the low GHz frequency range.

A nonlinear theory which allows calculation of the oscillator amplitude has been verified by experiment. Oscillator amplitude calculation is not only required to ensure proper amplitude of oscillator output signal, but is also necessary for the calculation of oscillator noise.

A theory established for noise calculation of LC Colpitts oscillators has been expanded to enable analysis of any CMOS LC oscillator. The theory is based on the condition that the passive network consists of known linear components and that there is a single transistor. Verification of this theory has been performed by experiments on Colpitts and Clapp LC oscillators.

To demonstrate the potential of a 1  $\mu\text{m}$  SACMOS N-well technology, a fully integrated 1 GHz LC source coupled oscillator is presented. The quality factor of the coil was improved substantially by removing the

silicon underneath. Using the theories mentioned above, the oscillator amplitude was calculated and the noise estimated. Oscillator noise of  $-97$  dBc/Hz has been measured at 100 kHz offset from the carrier, at a current consumption of a few mA. This noise is sufficiently low for oscillators used in wireless spread spectrum systems.

As a feasibility study on 100 MHz fundamental wave mode crystal oscillators, two digitally coded fine-trimmable crystal oscillators were integrated in a  $1\ \mu\text{m}$  double poly CMOS technology. They differ in binary-coded and thermometer-coded capacitor banks for frequency tuning. Since LC circuits can be used to model the characteristics of crystals, analysis and design of crystal oscillators can be performed by the methods for LC Clapp oscillators. Fine tuning, wide tuning range and low power consumption were the main focus of this design. The measured results meet the required specifications with a comfortable margin.

# Zusammenfassung

Diese Dissertation behandelt Analyse und Entwurf von CMOS LC- und Quarzoszillatoren, wie sie für Kommunikationssysteme benötigt werden. In der drahtlosen Kommunikationstechnik ist ein niedriges Oszillatorrauschen sehr wichtig, gleichzeitig wird grösster Wert auf einen geringen Leistungsverbrauch gelegt. Eine Optimierung des gesamten Systems im Hinblick auf diese zwei weitgehend gegensätzliche Anforderungen ist nur möglich, wenn der Zusammenhang zwischen den relevanten Parametern und der Qualität des Oszillatorsignals ersichtlich ist. Die Erfassung dieses Zusammenhangs war unter Verwendung bisheriger Theorien nur schwer möglich. Die vorliegende Arbeit wurde mit dem Ziel durchgeführt, ein vertieftes Verständnis der Arbeitsweise des Oszillators zu gewinnen und den Entwurf auf der Basis einer CMOS-Technologie zu optimieren. Diese Technologie ist kostengünstig, hat in den letzten Jahren beachtliche Fortschritte erzielt und ist für analoge Schaltungen bestens bis in den unteren GHz-Bereich geeignet.

Zur Berechnung der Oszillatoramplitude ist im Rahmen dieser Arbeit eine neue nichtlineare Theorie experimentell verifiziert worden. Dadurch wird die Voraussagbarkeit des toleranzbedingten Amplitudenbereiches ermöglicht und eine wichtige Voraussetzung für die Berechnung von Oszillatorrauschen erfüllt.

Die Verifizierung und Verallgemeinerung der Theorie zur Berechnung des Rauschens von LC-Colpitts-Oszillatoren auf der Basis der Oszillatoramplitude ermöglicht die Rauschanalyse eines beliebigen CMOS LC-Oszillators. Voraussetzung ist, dass das passive Netzwerk aus bekannten linearen Komponenten besteht und nur ein Transistor für die Verstärkung eingesetzt wird. Die Überprüfung dieser Theorie ist mit

Experimenten an Colpitts- und Clapp-Oszillatoren erfolgt.

Um das Potential der CMOS Technologie aufzuzeigen, wurde ein source-gekoppelter LC-Oszillator zusammen mit einer Spule in einer  $1\ \mu\text{m}$  CMOS Technologie integriert. Die Güte der Induktivität konnte entscheidend verbessert werden durch Entfernung des Siliziums unter der Spule mittels Rückseitenätzung. Unter Anwendung der oben erwähnten Theorien wurde die Oszillatoramplitude berechnet und das Oszillatorrauschen abgeschätzt. Bei einem Speisestrom von wenigen mA wurde bei 100 kHz Abstand vom Träger ein Oszillatorrauschen von  $-97\ \text{dBc/Hz}$  gemessen. Dieses Rauschen ist genügend niedrig für den Einsatz des Oszillators in einem drahtlosen Breitbandssystem.

Im Rahmen einer Studie wurden zwei verschiedene digital fein-abstimmbare 100 MHz Grundwellen-Quarzoszillatoren in einer  $1\ \mu\text{m}$  Doppel-Poly-CMOS-Technologie integriert. Sie unterscheiden sich durch eine binär- beziehungsweise eine thermometerkodierte Kapazitätsbank zur Frequenzabstimmung. Weil ein Grundwellen-Quarzresonator als LC-Netzwerk modellierbar ist, konnten dieselben Methoden für Analyse und Entwurf angewandt werden wie für Clapp LC-Oszillatoren. Für den Schaltungsentwurf stand die Feinabstimmung bei gleichzeitig grossem Abstimmbereich und niedrigem Stromverbrauch im Vordergrund. Die gestellten Anforderungen wurden von beiden Oszillatoren mit Reserve erfüllt.