
[Fakultät 4]

Implementierung eines selbsteinstellenden Filters auf Basis eines spannungsgesteuerten Biquad-Filters

by

Nils Renner (5197659)

Submitted to the Fakultät 4: Elektrotechnik und Informatik
in partial fulfillment of the requirements for the degree of

ELEKTROTECHNIK BACHELOR OF ENGINEERING

at the

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

June 1876

© 1876 Nils Renner (5197659). All rights reserved.

The author hereby grants to MIT a nonexclusive, worldwide, irrevocable, royalty-free license to exercise any and all rights under copyright, including to reproduce, preserve, distribute and publicly display copies of the thesis, or release the thesis under an open-access license.

Authored by: Nils Renner (5197659)
Fakultät 4: Elektrotechnik und Informatik
May 18, 1876

Certified by: Prof. Dr. Sören Peik
Professor der Elektrotechnik, Thesis Supervisor

Accepted by: Prof. Dr.-Ing. Mirco Meiners
Professor der Elektrotechnik
Fakultät 4

Inhaltsverzeichnis

Title page	2
Abbildungsverzeichnis	5
1 Einleitung	7
1.1 Vorbetrachtung	7
1.2 Beschreibung der Bachelorarbeit	7
1.3 Aus dem Exposé	8
1.3.1 Forschungsthema	8
1.3.2 Zielsetzung	8
2 Tools	11

Abbildungsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Vorbertragung

Durch das Modul ANS im letzten Semester wurde das arbeiten mit klassischen Analogen Filtern durch das Experiment 4 aus dem ASLK-Manual erlernt

Durch Berechnungen und Ausprobieren wurden analoge Filter entworfen und an die gewollten werte angepasst.

So ergaben sich Filter mit fester Freqenz, da die Bauteilgrößen einmal angenommen wurden (mit ausnahme der zwei Potis) und sich daraus die Frequenz ergab

In Experiment 5 des ASLK-Manuals soll es um selfe tuned Filter, also sich selbst automatisch anpassende/einstellende Filter gehen.

1.2 Beschreibung der Bachelorarbeit

In der Praxis schanken Bauteile (Temperatur, Alterung, Toleranzen).

Diese Probleme haben Filter die sich selbst einstellen nicht, da sie nicht rein von den physischen Paramentern der eingebauten Bauteile abhängen sondern einen gewissen Spielraum bieten, diese Inperfektionen auszugleichen.

Ziel ist es, dass der Filter selbstständig seine Mittenfrequenz nachstimmen kann. Dafür braucht er eine Referenzfrequenz und einen Mechanismus, der Prüft, ob der Filter noch auf der richtigen Frequenz liegt, oder weggedriftet ist.

Vorgehen: lernen wie man einen geregelten osz verwendet um Ref-Frequenz zu erzeugen. Ref-Frequenz wird verwendet um filter automatisch auf die Sollfrequenz einzustellen. Experiment ist also eine Kombination aus REgelungstechnik und Exp 4 (klassische Filtertheorie)

selbst anpassende Filter sind ein wichtiger Bestandteil der Filterungstechnik heutzutage, da da immer vorhandene Bauteiltolleranzen eine geringere Rolle spielen und aufgrund des Schaltungsdesigns weniger stark ins Gewicht fallen. Vieles innerhalb des Controll Loop kann heutzutage durch einen digitalen Microcontroller durchgeführt werden, während der Filter immernoch analog bleibt. So kann die Frequenz sehr präzise auf den exakt eingestellten wert absgestimmt werden (ohne auf Auswirkungen durch Bauteiltolleranzen zu achten). Wichtig: unsere schaltung ist bissher nur zum detektiern der Frequenz. Also wird einfach auf die

einkommende Frequenz abgestimmt. Vielleicht kommt noch ein modus für gezielte Frequenzen dazu? ist das sinnvoll?

1.3 Aus dem Exposé

1.3.1 Forschungsthema

Frequenzadaptive Filter werden in der heutigen Zeit immer wichtiger, da sie durch ihr Design die Auswirkungen von Bauteiltoleranzen in der Praxis deutlich reduzieren. Das trägt dazu bei, den Einsatz von teuren Spezialkomponenten zu minimieren und zeitgleich die Flexibilität von Systemen erheblich zu erhöhen. Auch die Entwicklungen im Bereich 5G und Industrie 4.0 tragen zur Bedeutung dieser Technologie bei, da das Datenaufkommen und zugleich die Anforderungen an Verlässlichkeit stetig steigen. Noch nie war das Datenaufkommen höher, sodass nach günstigen, verlässlichen Lösungen gesucht wird. Self-Tuned Filter bieten hier eine vielversprechende Lösung, um kostengünstige und belastbare Systeme zu realisieren.

Auch im Kontext der geopolitischen und wirtschaftlichen Veränderungen spielt diese Arbeit eine Rolle. Lieferkettenprobleme und politische Unsicherheiten der letzten Jahre verdeutlichen, wie wichtig europäische Unabhängigkeit ist. Durch den Einsatz von Open-Source-Software und europäischer Hardware (wie dem RP2350) wird die Souveränität von Europa als Wirtschaftszentrum gestärkt.

Diese Bachelorarbeit untersucht die Entwicklung und Implementierung eines selbsteinstellenden Filters auf Basis eines spannungsgesteuerten Biquad-Filters (VCF). Ziel ist es, die automatische Anpassung der Grenzfrequenz mithilfe eines Mikrocontrollers und digitaler Steuerung zu realisieren, um die praktischen Auswirkungen von Bauteiltoleranzen zu minimieren. Der Entwurf umfasst Schaltungsdesign, Hard- und Softwareentwicklung sowie Evaluierung mit Messungen. Das Projekt orientiert sich an Referenzdesigns aus dem ASLK PRO-Manual und setzt aktuelle Methoden der digitalen Signalverarbeitung zur Grenzfrequenzanalyse ein.

1.3.2 Zielsetzung

Die zentrale Fragestellung dieser Arbeit lautet: „Wie kann ein spannungsgesteuerter Biquad-Filter selbstständig und robust an wechselnde Eingangssignal-Frequenzen angepasst werden?“ Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll durch simulationstechnische und messtechnische Untersuchungen aufgezeigt werden, welche Funktionen und Bausteine im System dafür verantwortlich sind. Dadurch wird ein vertieftes Verständnis für Phasenschleifen (PLLs) und Self-Tuned Filter geschaffen.

Die Aufgaben werden gemäß der MoSCoW-Methode priorisiert, um eine klare Strukturierung und Fokussierung zu gewährleisten:

Must have:

- Entwicklung einer funktionsfähigen Schaltung inklusive passendem PCB auf Basis des im ASLK-PRO Manual beschriebenen Self-Tuned Biquad
- Programmierung des Mikrocontrollers zur Steuerung der bauteilbedingten Grenzfrequenz, der Güte und der Verstärkung des Filters

Should have:

- Entwicklung einer App oder webbasierten Oberfläche zur Visualisierung und komfortablen Steuerung des Filters

Could have:

- Einfache Frequenzbestimmung des Eingangssignals über einen Nulldurchgangszähler zur schnellen Übersicht über die getunte Frequenz
- Erweiterte Frequenzanalyse mittels FFT, voraussichtlich mit Einsatz eines vorprogrammierten FFT-Moduls
- Design und Konstruktion eines Gehäuses für das Gesamtsystem

Kapitel 2

Tools

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit kommen viele verschiedene Softwerkzeuge für Simulation, Messung, Schaltungsdesign und Darstellung von Messergebnissen zum Einsatz.

Zu den wichtigsten Tools zählt die ECAD-Software KiCad 9. Dieses Open-Source-Programm wird unter anderem vom CERN und einer internationalen Entwicklergemeinschaft weiterentwickelt. Es umfasst eine umfangreiche Komponentenbibliothek, einen integrierten Schaltplan- und PCB-Editor, 3D-Visualisierung, zahlreiche Exportformate sowie einen eingebetteten SPICE-Simulator für die Analyse analoger Schaltungen.

KiCad wird in dieser Thesis hauptsächlich für den Schaltplanentwurf, den Platinenentwurf sowie für die Simulation der Gesamt- und Teilsysteme verwendet. (Da im SPICE-Simulator von KiCad nicht alle Analysetypen zur Verfügung stehen, kann es erforderlich sein, für die Gesamtsimulation auf LTspice auszuweichen.)

!!!ACHTUNG!!! Das stimmt nicht; ngspice, der SPICE-Kern in KiCAD hat alles, was LTspice auch hat. Schauen Sie im Handbuch von ngspice nach.

Die Datenaufnahme der realen Messwerte erfolgt mithilfe eines RedPitaya STEMlab. Dies ist ein (in Europa entwickeltes,) vielseitiges Messgerät, das unter anderem die Funktion eines Oszilloskops, Signalgenerators und Spektrumanalysators in sich vereint. Es basiert auf einer (Open-Source - ich denke nicht) FPGA Entwicklungsplattform. Nach Abschluss einer Messung exportiert der RedPitaya (nein, der Benutzer kann die Messdaten exportieren, nicht das STEMlab) die Messdaten als CSV-Datei, welche anschließend zur weiteren Auswertung genutzt wird.

Zur visuellen Aufbereitung und Analyse der Messergebnisse wird Python 3.12 in der Open-Source Entwicklungsumgebung Spyder eingesetzt. Darüber hinaus wird Python zur systemtheoretischen Analyse des Gesamtsystems verwendet. (Sollte sich dabei eine unzureichende Funktionalität ergeben, kann alternativ auf MATLAB/Simulink zurückgegriffen werden.)

Die Programmierung des Mikrocontrollers erfolgt im Editor Thonny, einer kostenlosen Open-Source Plattform für Python. (Alternativ kann auch die Arduino IDE in der Programmiersprache C verwendet werden.)

Die Dokumentation der Thesis erfolgt in L^AT_EX. Die enthaltenen Schaubilder und elektronischen Schaltpläne werden ebenfalls in L^AT_EX TikZ/PGF realisiert.

Zur Versionsverwaltung und Datensicherung werden Git und GitHub eingesetzt.