

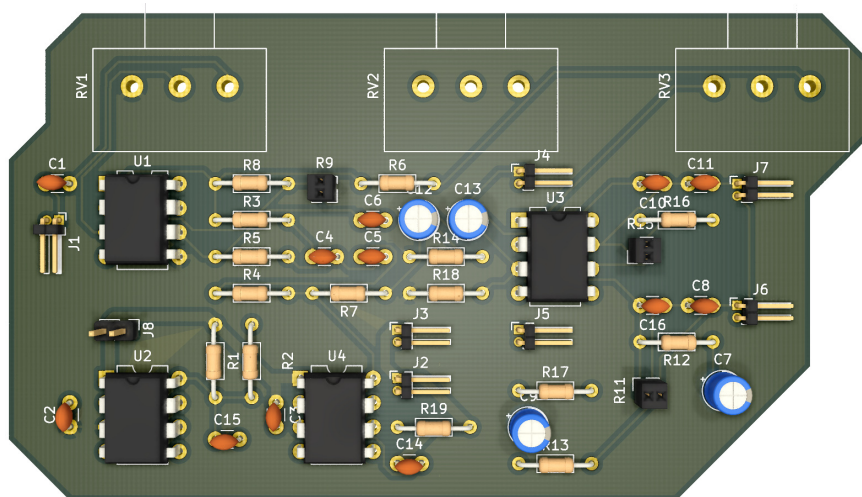
Sturla Myklebost

# Et prosessorientert forsøk på design av elektriske og elektromekaniske lydeffekter

Bacheloroppgave i Musikkteknologi

Veileder: Daniel Buner Formo

Mai 2021



3D-modell av kretskort utviklet i oppgaven



Sturla Myklebost

# **Et prosessorientert forsøk på design av elektriske og elektromekaniske lydeffekter**

Bacheloroppgave i Musikkteknologi  
Veileder: Daniel Buner Formo  
Mai 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Det humanistiske fakultet  
Institutt for musikk



Kunnskap for en bedre verden



Jeg vil takke min veileder Daniel Buner Formo, mine foreldre og min kjære Ida for all hjelp og støtte som jeg har fått det siste året. Takk for at dere tror på meg.

---

## Sammendrag

Denne oppgaven gir innsyn i et prosessorientert forsøk på å utvikle og designe lyd-effekter ved hjelp av elektronikk. Rapporten vil belyse hvilke endringer som oppstår gjennom flere iterasjoner, og hvordan ulike valg påvirker sluttproduktet. Målet med arbeidet har vært å gi mulighet til å kontrollere lyd med et effektivt brukergrensesnitt og høy lyd kvalitet. Det er lagt til grunn et praktisk arbeid som skal redegjøres for i denne rapporten. Rapporten vil ta for seg grunnleggende teori, fremgangsmåte og tankegang. Videre vil en analyse av prosessen legges frem, samt en diskusjon rundt valgene som ble tatt. Det vil vektlegges et fokus på lyd kvalitet, brukergrensesnitt og enkelhet. Det praktiske arbeidet har bestått av å utvikle to effekter; en spring-reverb i stereo, og en tremolo. Dette er effekter med lang historie, og som har blitt brukt i utallige musikalske sammenhenger. Det er vedlagt lydklipp, med mål om å belyse ulike idéer og bruksområder. Arbeidet resulterte i to fysiske effekter og innsikt i designprosessen i krysningspunktet mellom kunst og teknologi.

## Abstract

This thesis provides insight into a process-oriented attempt to develop and design sound effects using electronics. The report will shed light on the changes that occur through several iterations, and how different choices affect the end product. The aim of the work has been to provide the opportunity to control sound with a efficient user interface and high sound quality. A practical work has been done as a basis for this report. The report will address basic theory, procedures and thought processes. Furthermore, an analysis of the process will be presented, as well as a discussion of the choices that were made. Emphasis will be placed on sound quality, user interface and simplicity. The practical work has consisted of developing two effects; a spring reverb in stereo, and a tremolo. These are effects with a long history, and which have been used in countless musical contexts. Audio clips are included, with the aim of illuminating different ideas and areas of use. The work resulted in two physical effects and insight into the design process at the crossroads between art and technology.

---

# Innholdsfortegnelse

<b>Sammendrag</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>Figurer</b>	<b>iii</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Romklangens historie . . . . .	1
1.2 Tremoloens historie . . . . .	1
1.3 Arbeidets kontekst . . . . .	2
<b>2 Problemstilling</b>	<b>2</b>
<b>3 Metode</b>	<b>3</b>
<b>4 Teori</b>	<b>3</b>
4.1 Design . . . . .	3
4.2 Elektronikk . . . . .	4
4.2.1 Grunnleggende komponenter . . . . .	5
4.2.2 Filter . . . . .	10
4.2.3 Impedans i inngang og utgangstrinn . . . . .	14
4.2.4 Aktive kretser . . . . .	14
4.3 Transduser . . . . .	15
4.4 Elektromekanisk fjærklang . . . . .	16
<b>5 Fremgangsmåte</b>	<b>16</b>
5.1 Tidlige iterasjoner . . . . .	16
5.1.1 Fjærklang . . . . .	16
5.1.2 Tremolo . . . . .	19
5.2 Kretsdesign fjærtank driver . . . . .	21
5.3 Kretsdesign Tremolo . . . . .	25

---

<b>6 Konklusjon</b>	<b>30</b>
---------------------	-----------

<b>Litteraturliste</b>	<b>31</b>
------------------------	-----------

## Figurer

1	Symbolet for en elektrisk motstand med resistans på $200\Omega$ . . . . .	5
2	Kretsskjema for enkel spenningsdeler . . . . .	6
3	Symbolet for en kondensator med kapasitans på $1\mu F$ . . . . .	7
4	Krets for opplading av kondensator . . . . .	7
6	Symbolet for en 5mH spole med luftkjerne . . . . .	8
7	Koblingskjema spole . . . . .	9
10	Frekvens- og faserespons for 1.ordens lavpassfilter med knekkfrekvens 1kHz . . . . .	11
12	Frekvens- og faserespons for 1.ordens høypassfilter med knekkfrekvens 1kHz . . . . .	12
13	RLC båndpassfilter koblingsskjema . . . . .	13
14	Frekvens- og faserespons for 2.ordens båndpassfilter med knekkfrekvens 1kHz . . . . .	13
15	Inngangsimpedans ekvivalentkrets . . . . .	14
17	Elektrisk symbol for en transkonduktansforsterker . . . . .	15
18	Skjema for fjærtank . . . . .	16
19	Fender reverb driver . . . . .	17
20	Første test reverb . . . . .	18
21	Utkast til tremolo med fotoresistor . . . . .	19
22	Oscillator collage . . . . .	20
23	Fjærklangdriver, fullført krets . . . . .	21
24	Forforsterker . . . . .	22
25	Tonekontroll . . . . .	22
26	Buffer . . . . .	23
27	Pick up forsterker . . . . .	23



---

28	Spenningsdeler . . . . .	24
29	Tremolo, fullført design . . . . .	25
30	Spenningsforsyning MAX1044 . . . . .	26
31	Oscillatorkrets ICL8038 . . . . .	26
32	Tremolo med full intensitet . . . . .	27
33	Tremolo med intensitet helt av . . . . .	27
34	VCA . . . . .	28
35	Output buffer . . . . .	28

---

# 1 Innledning

Både romklang og tremolo er effekter for manipulering av lyd som brukes hyppig i moderne musikk. De er imidlertid et resultat av gammel teknologi, og den historiske rammen for denne teknologien vil nå redegjøres for.

## 1.1 Romklangens historie

I årtusener har mennesker benyttet akustikk for å manipulere lyd. Hypogeene på Malta hadde nisjer i veggene som kunne forsterke lyd og lage ekko (Debertolis [2015]). Disse er anslått å være bygget i år 3000 fvt. Siden antikken har konserthaller blitt spesielt designet for å kontrollere forplantningen av etterklang i rommet (Brown [2020]). Lydbølger blir omdirigert mot publikum, på en slik måte at de blir forsterket og etterklangen gjør at musikken henger igjen i rommet lenge etter at siste tone er spilt (den lengste målingen er på 112 sekunder). I moderne tid er naturlig romklang fremdeles ettertraktet og det finnes innspillingsrom som er verdenskjent for sine etterklangssignaturer. Columbia Records' 30th Street Studio er et slikt rom. Dette er rommet hvor Miles Davis spilte inn sitt legendariske album 'Kind of Blue' i 1959. På denne tiden ble også muligheten for å lage kunstig romklang oppdaget (Brown [2020]).

Da Hammondorglene ble introdusert for hjemmemarkedet ble det klart at det var noe som manglet ved lyden (Brown [2020]). Orgler er vanligvis forbundet med kirker, altså rom med mye etterklang. Lyden fra Hammondorglene følte feil når de ble spilt i små stuer uten denne velkjente etterklangen. Det ble derfor utviklet en enhet som kunne monteres på orglene for å etterligne lyden av kirkerom (Meinema [1958]). Den besto av et sett med springfjær som lyden kunne sendes gjennom. Lydsignalet spretter frem og tilbake i springfjærene, ikke ulikt slik lyden spretter frem og tilbake mellom veggene i et kirkerom. I dag er fjærklang hovedsaklig tilknyttet gitarforsterkere.

På 70-tallet kom digitale løsninger, og da kunne man manipulere og endre romklangen ved et enkelt tastetrykk. Disse brukte sampling og tidsforsinkelse/ekko i ulike kombinasjoner for å etterligne kirker og konserthaller. I 1999 introduserte Sony den første sanntids konvolusjonsenhet (Brown [2020]). Dette ga muligheten til å sample rom. Ved hjelp av såkalte impulsresponser kunne man fange etterklangssignaturen til et hvilket som helst rom. Det var nå mulig å få soundet til Columbia Records' 30th Street Studio, eller hypogeene på Malta, rett i sin egen stue.

## 1.2 Tremoloens historie

En annen kjent måte å manipulere lyd på er tremolo. Denne effekten er mer tilknyttet utøvelse av musikk og består i å endre volumet på en tone i et periodisk forløp. Å bruke tremolo har vært mulig siden menneskene lærte å synge og det er derfor ikke mulig å stadfeste et tidspunkt for tremoloens opprinnelse. En av de tidligste mekaniske tremoloeffekter finnes på et orgel i San Martino Maggiore kirken

---

i Italia (Formosa [2013]). Dette orgelet er fra 1500-tallet og er over 470 år gammelt. Det inkluderer en mekanisme som åpner og lukker et membran som varierer lufttrykket i orgelet. Variasjoner i lufttrykk gjør at lydstyrken fra orgelet også varierer. Teknologien tilknyttet tremolo er altså svært gammel og den er fortsatt i bruk 500 år senere.

I 1940 kom Lesliékabinettene. Disse hadde roterende høytalere som gjorde at både tonehøyde og volum varierte periodisk. Denne effekten ble svært populær, noe som førte til at aktører som Gibson, Danelectro og Fender introduserte gitarforsterkere med integrert tremolo sent på 40-tallet (Formosa [2013]). Det spesielle med tremoloen i gitarforsterkerene var at effekten var rent elektronisk. Det vil si at et varierende spenningsignal ble benyttet for å styre forspenningen til en elektrisk forsterkerkrets bestående av radiorør. Dette førte igjen til periodiske variasjoner av lydvolym. I dag er tremolo en svært utbredt effekt og er ofte brukt på gitar, elpiano og orgler. Dette er instrumenter som ikke har noen naturlig måte å lage periodiske variasjoner i lydstyrke (i motsetning til sangere, strykere og blåsere) og som trenger en ekstern mekanisme for å oppnå effekten. I dag er tremoloeffekten vanligvis oppnådd ved hjelp av transistorteknologi og forsterkerkretser (Brown [2020]).

### 1.3 Arbeidets kontekst

Dette er den historiske rammen for arbeidet som er gjennomført i denne oppgaven. Oppgaven er et forsøk på å eksperimentere med disse to effektene. Den er også et forsøk på å designe og undersøke viktige aspekter ved analoge og elektromekaniske lydeffekter. Både fjærklang og tremolo er ofte brukt i mono, som en del av effektkjeden til en gitarist. For å sette arbeidet i en ny kontekst skal jeg forsøke å benytte disse effektene i stereo. Prosjektet tar utgangspunkt i grunnleggende elektroteknisk kunnskap og Herbert Simons teorier om design. Jeg ønsker å lære mer om utvikling av lydelektronikk og tar derfor utgangspunkt i disse to historiske effektene. Målet er å bygge to effekter fra bunnen av og undersøke prosessen underveis. Arbeidet er viktig i forståelsen av møtetpunktet mellom kunst og teknologi, et veikryss som hele tiden definerer og omdefinerer verdenen vi lever i.

## 2 Problemstilling

Personlig har jeg en sterk interesse for å arbeide med lydelektronikk. Det gir en ukonvensjonell arbeidsprosess hvor det ikke alltid er mulig å forutsi hvordan endringer i kretsdesign vil påvirke lyd. Jeg ønsket derfor å begrense oppgaven til analoge og elektromekaniske effekter. På grunn av denne begrensningen var jeg ikke interessert i digitale løsninger. Videre ønsket jeg å lære mer om designprosessen. Det finnes ingen fasitsvar for fremgangsmåte under design, og jeg synes det er spennende å undersøke nettopp dette. Derfor har jeg kommet frem til følgende spørsmålstilling:

*Hvordan gå frem for å designe elektroniske lydeffekter som fjærklang og tremolo, og hva kan vi lære av prosessen?*

---

## 3 Metode

Denne oppgaven har design i fokus, og arbeidet er derfor gjort på en utforskende måte. Den tar utgangspunkt i Herberts Simons utsagn om at alle kompliserte systemer består av et sammensatt nettverk av enkelhet (Simon [1969]). Det er valgt å dele designprosessen i tre deler: Først må de ulike kretsens spesifikasjoner defineres. Deretter skal det utvikles en løsning som forsøker å tilfredstille kravene. Videre skal kretsen testes for å avdekke mulige feil eller mangler. Denne prosessen gjentas helt til resultatet er tilfredstillende, eller jeg går tom for tid. Prosessen må loggføres for å gi innsyn i refleksjoner, problemer og uventede hendelser. Det er et mål å avdekke praktiske og estetiske problemer og reflektere rundt løsningen av disse. Til slutt vil en refleksjon over arbeidsprosessen fremstilles.

## 4 Teori

Det skal nå redegjøres for relevant teori for oppgaven. Først skal begreper og teori tilknyttet design presenteres. Designteori er relevant i undersøkelsen av det praktiske arbeidet som er gjennomført og bidrar til forståelse av den undersøkende prosessen. Videre skal det fremstilles en gjennomgang av grunnleggende elektroteknikk. Dette er essensielt da diskusjoner i oppgaven vil bruke denne teorien for å utforske og argumentere for ulike muligheter og valg som har oppstått i arbeidet. Teorien skal bidra til forståelsen av det praktiske arbeidet og senere diskusjoner.

### 4.1 Design

Å definere ordet design er ingen enkel oppgave. Definisjonen er avhengig av om design er ansett som en idé, kunnskap, en prosess, et produkt eller et livssyn (Findeli [1990]). Findeli påstår i sitt essay "*Moholy-Nagy's Design Pedagogy in Chicago (1937-46)*" at for å definere design, trenger man underliggende modeller. Videre forklarer han at etablerte utdanningsinstitusjoner for design legger konseptet et sted mellom naturvitenskap, kunst og teknologi.

På norsk kan ordet design være knyttet til formgivning og utseende, men ordet kan også brukes i betydningen plan, skisse eller mal (Dyrhaug [2020]). I denne oppgaven forstås design som en prosess som innebærer både utforming og gjennomførelse.

Herbert Simon skrev i 1969 boken "*The Sciences of the Artificial*". Dette er ofte kreditert som pionerende arbeid innen designteori. Simons arbeid forsøkte å vise at komplekse systemer egentlig er et sammensatt nettverk av enkelhet [Simon, 1969, s. 2]. Herbert Simon er en av utviklerne av *den rasjonelle modellen* ([Koh et al., 2015, s. 18]).

---

Den rasjonelle modellen antyder følgende:

1. Designeren prøver å optimalisere et design for kjente begrensninger og mål.
2. Designprosessen er planstyrt.
3. Designprosessen forstås i form av en diskret sekvens av trinn.

I boken *"Succes via Design"* gir forfatterne Jens Bernsen og Earl Powell innsikt i en lignende prosessmodell for design (Bernsen and Powell; [1990]). Den består av 9 trinn:

1. Oppgaveidentifikasjon
2. Analyse
3. Definisjon
4. Utforskning av muligheter
5. Valg
6. Detaljprosjektering
7. Tekniske spesifikasjoner
8. Gjennomføring
9. Introduksjon på markedet

De gjør et poeng ut av at denne lineære fremstillingen av prosessen ikke nødvendigvis er helt korrekt. Modellen på 9 trinn fremstiller at prosessen går fra problem til løsning. I en reell situasjon kan det være omvendt. I noen tilfeller vil avsløringen av et problem være en del av løsningen. Videre forklares det at prosessen egentlig er syklisk, hvor små løkker undersøker om designet tilfredstiller alle krav, i tillegg til en større løkke som alltid utforsker og re-evaluerer designets mening.

Man kan trekke ut fra dette at en designprosess kan være flytende. Alle valg man tar kan påvirke tidligere valg, og kan i noen tilfeller omdefinere meningen til hele produktet. Det går likevel an å rasjonalisere designprosessen. Diskrete trinn kan konkretisere arbeidsoppgaver og bidra til å lage en plan for å løse problemer som tilsynelatende er overveldene. Designprosessen blir kanskje aldri like konkret og planstyrt som den rasjonelle modellen tilskriver, men modellen kan ansees som et nyttig verktøy i arbeidet med design.

## 4.2 Elektronikk

Rapporten skal nå redegjøre for grunnleggende elektroteknisk teori. Den vil presentere hva elektriske systemer er og hvordan de kan påvirke lyd. Det fokuseres på strøm, spenning, filtre og forsterkerkretser. Teorien er begrenset til det som er nødvendig for å forstå diskusjon og argumenter som fremkommer senere. Dette gjøres av hensyn til oppgavens omfang.

---

## 4.2.1 Grunnleggende komponenter

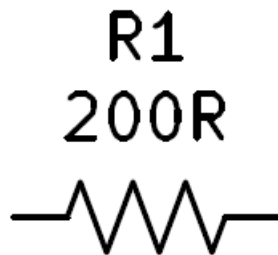
### Strøm og spenning

Spenning er forskjellen i elektrisk potensial mellom to punkter og oppgis i volt [V] [Boylestad, 2016, s. 50]. En spenningskilde er etablert ved å skape separasjon mellom positive og negative ladninger. Ladning oppgis i coulomb (C), hvor 1 coulomb er ladningen assosiert ved  $6.242 \times 10^{18}$  elektroner. Hvis 1 joule energi brukes til å flytte en ladning på 1 coulomb, vil det være en forskjell på 1V mellom punktene. Dette er beskrevet med ligningen  $U = \frac{W}{Q}$ , hvor W er antall joule, Q er ladning og U er spenning.

Når en spenning blir påtrykt i en elektrisk krets vil dette føre til en reaksjon kjent som strøm [Boylestad, 2016, s. 53]. Strømmen er altså resultatet av spenning og elektrisk motstand, og oppgis i ampere [A]. Hvis  $6.242 \times 10^{18}$  elektroner passerer gjennom et tenkt plan iløpet av 1 sekund er strømmen definert som 1 ampere. Dette beskrives med ligningen  $I = \frac{Q}{t}$ , hvor I er strømmen, Q er ladning og t er tid. I en elektrisk krets defineres forholdet mellom spenning, motstand og strøm som  $U = R \times I$ , dette er kjent som *Ohms lov*. U er spenning, I er strøm og R er elektrisk motstand.

### Motstand

Motstand er en elektrisk komponent som begrenser strøm. Frie elektroner i bevegelse vil oppleve friksjon når de passerer et materiale med elektrisk motstand, og elektrisk energi blir omdannet til varme [Boylestad, 2016, s. 83]. Elektrisk resistans betegnes med symbolet  $\Omega$  og oppgis i ohm. Forholdet mellom omdannet effekt i en motstand, spenning og strøm beskrives med  $P = U \times I$ . P er termisk effekt, U er spenningsfallet over motstanden og I er strømmen gjennom motstanden.

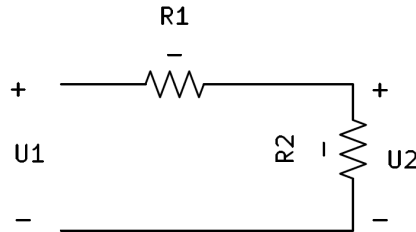


Figur 1: Symbolet for en elektrisk motstand med resistans på  $200\Omega$ .

---

## Spenningsdeling

Dette avsnittet skal redegjøre for spenningsdeling. Dette er et viktig prinsipp, fordi det er relevant for fenomener som skal diskuteres senere i oppgaven. For å forklare spenningsdeling henvises det til følgende krets.



Figur 2: Kretsskjema for enkel spenningsdeler

Hva blir spenningen U2? For å svare på dette kan man slå sammen motstandene R1 og R2. På denne måten kan Ohms lov brukes for å finne strømmen i kretsen. Videre kan man bruke produktet av strømmen i kretsen og motstanden til R2 for å finne spenningen U2.

$$U1 = (R1 + R2) \times I \Rightarrow I = \frac{U1}{R1 + R2}$$

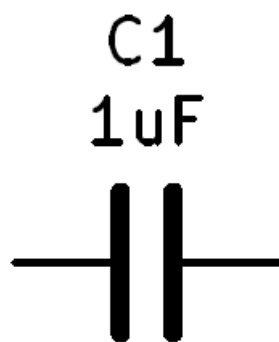
$$U2 = I \times R2 = \frac{U1}{R1 + R2} \times R2$$

$$U2 = U1 \times \frac{R2}{R1 + R2}$$

Det fremkommer her at hvis R2 er mye større enn R1 vil mesteparten av spenningsfallet ligge over R2, og hvis R1 er mye større enn R2 vil spenningsfallet ligge over R1. Er motstandene like store vil U2 være halvparten av U1.

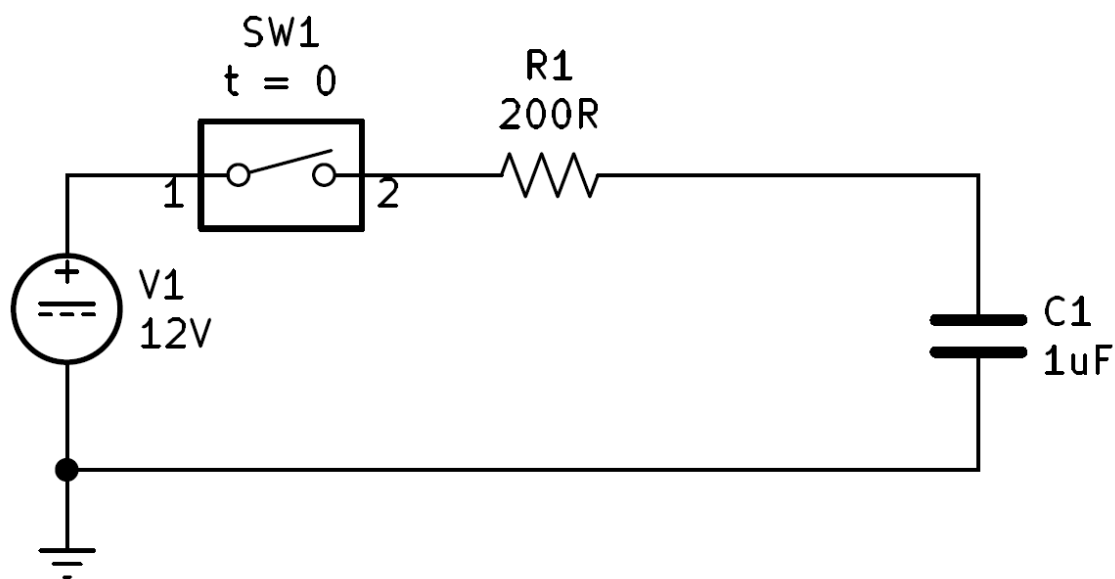
## Kondensator

Kondensatoren er en komponent som kan lagre elektrisk energi. Den er vanligvis oppbygd av to parallelle plater i aluminium [Boylestad, 2016, s.429]. Mellom platene vil det være et luftgap eller et annet dielektrisk materiale. Platene er altså elektrisk isolert, og vil derfor ikke lede strøm under vanlige omstendigheter.



Figur 3: Symbolet for en kondensator med kapasitans på  $1\mu F$

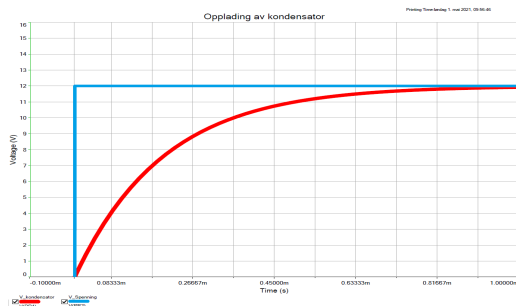
Platene vil likevel kunne holde en netto ladning. Det vil si at hvis en spenning blir påført platene, vil elektroner samle seg på platen som er tilkoblet den negative terminalen, og forlate platen som er tilkoblet den positive terminalen. Denne prosessen vil fortsette helt frem til potensiale mellom platene er lik spenningen påført kretsen. Når potensialet er like stort på begge sider, vil ikke elektronene lenger bevege seg. Resultatet blir en netto positiv ladning på topplaten og en netto negativ ladning på bunnplaten. Her følger et forklarende eksempel:



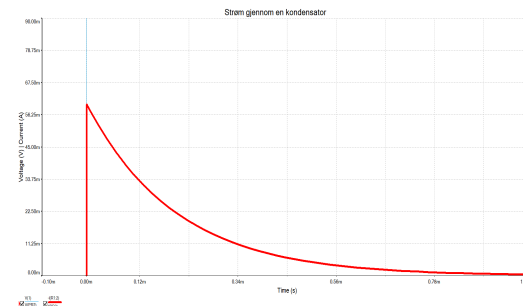
Figur 4: Krets for opplading av kondensator

Ved  $t > 0$  vil bryteren kobles inn og det blir påført en spenning over motstanden og kondensatoren. Kondensatoren vil lades opp over tid. Hvor lang tid det tar er avhengig av størrelsen på kondensatoren og motsanden. Når det elektriske feltet mellom kondensatoren er like stort som det over spenningskilden vil det ikke lenger gå noe strøm i kretsen. Her følger en grafisk fremstilling av forløpet for kondensatorstrøm- og spenning.





(a) Spenning over kondensator



(b) Kondensatorstrøm

Det er viktig å presisere at det ikke passerer strøm gjennom kondensatoren. Strømmen i kretsen er et resultat av at kondensatorplatene lades opp.

### Andre viktige egenskaper

$$Q = C \times U$$

Forholdet mellom kapasitans [C], ladningen på platene [Q] og påført spenning [U].

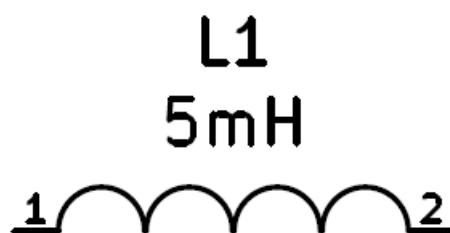
$$I = \frac{dU}{dt} \times C$$

Forholdet mellom strøm [I] og spenning [U] for en kondensator med kapasitans [C]. Kondensatoren motsetter seg altså endring i spenning.

Kondensatorens vekselstrømimpedans er definert ved  $X_C = \frac{1}{j \times \omega \times C}$ , hvor j er den imaginære enhet,  $\omega$  er vinkelfrekvens og C er kapasitans. Hvis frekvensen går mot null vil impedansen gå mot uendelig. Det kan derfor sies at en kondensator blokkerer likestrøm [Boylestad, 2016, s. 449].

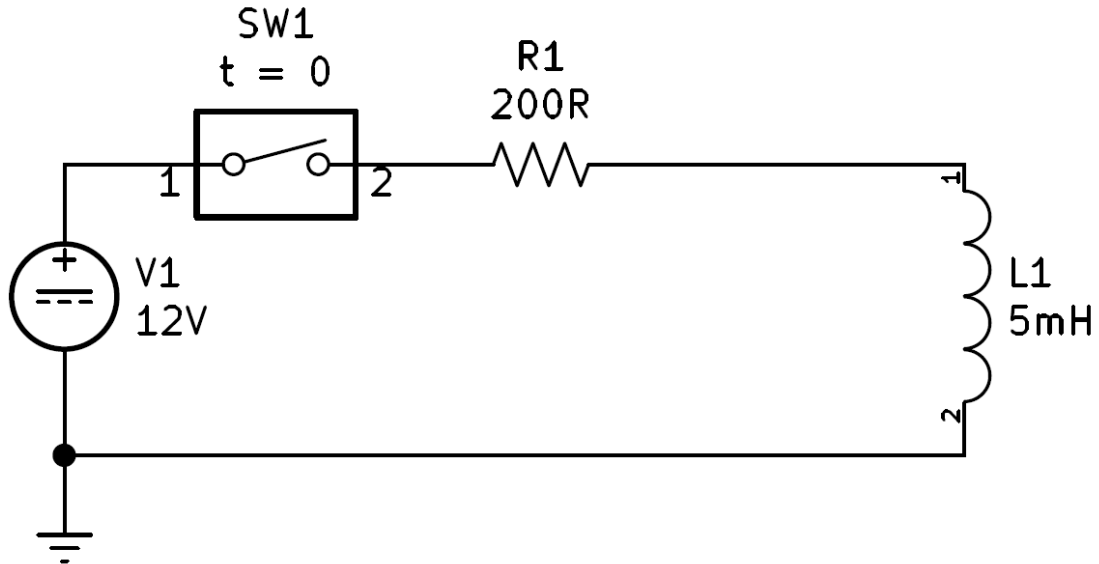
### Spole

Spolen er en komponent som kan lagre elektrisk energi i form av magnetiske felt. Den er vanligvis oppbygd av tvinnet kobbertråd [Boylestad, 2016, s.498]. Spolen har en kjerne bestående av luft eller et ferromagnetisk materiale. Kjernetype og antall tvingninger [turns] er avgjørende for induktansen til spolen. Induktans er evnen til å lagre energi i form av magnetisk felt.



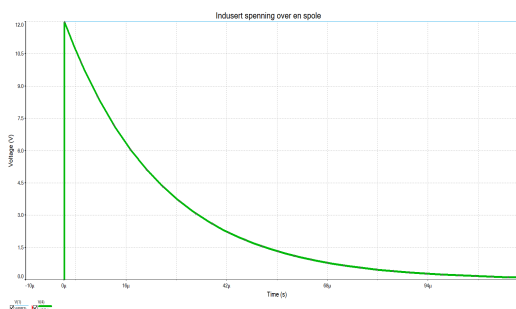
Figur 6: Symbolet for en 5mH spole med luftkjerne

Når en strøm går gjennom spolen vil det oppstå et magnetisk felt. Endring i strøm gjennom spolen inducerer en spenning som motsetter seg strømmen. Raskere endring i strøm vil indukere høyere spenninger, og dette er forklart gjennom formelen  $U = \frac{dI}{dt} \times L$ . Spolen motsetter seg altså endring i strøm. Når det magnetiske feltet har nådd stasjonær verdi, vil strømmen gjennom spolen ideelt sett kun være definert av spenningskilden og motstanden. Her følger et forklarende eksempel:

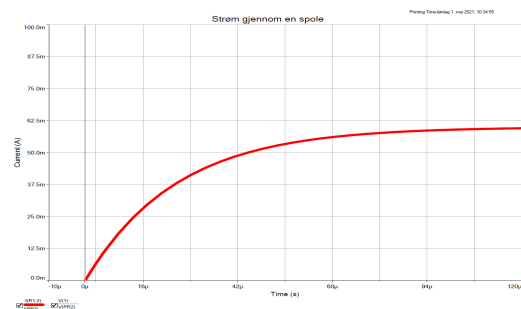


Figur 7: Koblingskjema spole

Ved  $t > 0$  vil bryteren kobles inn og det blir påført en spenning over motstanden og spolen. På dette tidspunktet faller hele spenningen over spolen, og det går ikke strøm gjennom kretsen. Over tid øker strømmen, og spenningen over spolen faller. Det har nå bygget seg opp et magnetisk felt i spolen.



(a) Indusert spenning over spole



(b) Strøm gjennom spole

Etter hvert som det magnetiske feltet har nådd stasjonær verdi er strømmen gjennom spolen lik  $I = \frac{U}{R} = \frac{12V}{200\Omega} = 60mA$ , og spenningen over spolen er lik 0.

---

## Andre viktige egenskaper

$$L = \frac{d\Phi}{di_L} \times N$$

Forholdet mellom induktans [L], antall turns [N] og endring i mangetisk fluks med hensyn på strøm i spolen  $[\frac{d\Phi}{di_L}]$ .

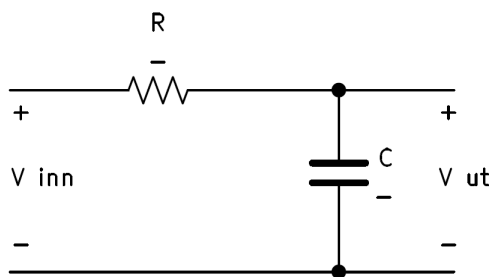
Spolens vekselstrøميمpedans er definert ved  $X_L = j \times \omega \times L$ , hvor j er den imaginære enhet,  $\omega$  er vinkelfrekvens og L er induktans.

### 4.2.2 Filter

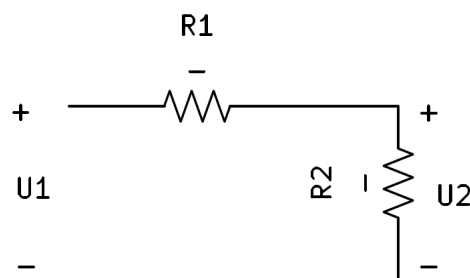
Et filter er enhver kombinasjon av passive R, L og C elementer, med eller uten aktive komponenter som transistorer og operasjonsforsterkere, som er designet for å endre frekvensresponsen til et system [Boylestad, 2016, s. 981]. Et filter kan brukes for å fjerne støy og uønskede frekvenser, eller det kan brukes for å isolere/understreke spesifikke frekvensbånd. Det er tidligere nevnt at både kondensatorer og spoler har en frekvensavhengig elektrisk motstand, og det er dette prinsippet som benyttes i utforming av filter.

For å forstå hvordan et førsteordens filter fungerer må vi se tilbake på delkapittel 4.2.1 som omhandler spenningsdeling. Der fremkommer at spenning kan oppdeles, hvor utgangsspenningen er avhengig av forholdet mellom to motstander. Vi vet også at kondensatorer og spoler oppfører seg som frekvensavhengige impedanser. Ved å slå sammen disse prinsippene kan man enkelt forklare et filter [Boylestad, 2016, s.983]. Videre følger en gjennomgang av oppbygningen til passive filtre.

#### 1. ordens lavpassfilter



(a) RC lavpassfilter koblingskjema



(b) Spenningsdeler

Fra tidligere er  $U_2 = U_1 \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ . Denne formellen kan modifiseres på følgende måte:

$$V_{ut} = V_{inn} \times \frac{X_C}{R + X_C}$$

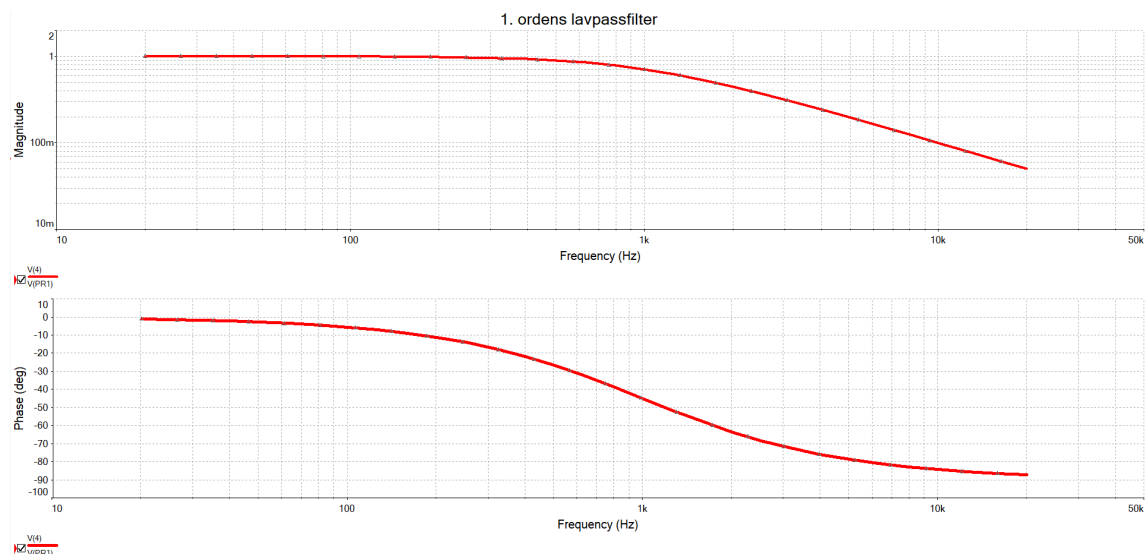
Hvis man nå bytter ut  $X_C$  med formelen for elektrisk motstand i en kondensator:  $X_C = \frac{1}{j \times \omega \times C}$  får man følgende resultat:

$$V_{ut} = V_{inn} \times \frac{\frac{1}{j \times \omega \times C}}{R + \frac{1}{j \times \omega \times C}} = V_{inn} \times \frac{1}{j\omega RC + 1}$$

Overføringsfunksjonen er forholdet mellom utgangsspenning og inngangsspenning, og blir i dette tilfellet  $H(j\omega) = \frac{V_{ut}}{V_{inn}} = \frac{1}{j\omega RC + 1}$ .

Fra utledningen ser vi nå et frekvensavhengig system. Ved lave frekvenser vil impedansen i kondensatoren være mye større enn motstanden, og signalet vil ikke påvirkes. Ved høye frekvenser vil impedansen i motstanden være mye større enn den i kondensatoren, og signalet vil dempes. Frekvensen hvor dempningen på signalet er -3dB kalles knekkfrekvensen. Den definerer hvor filteret begynner å påvirke signalet.

Alle filter har en frekvensrespons og en faserespons. Responserne sier noe om hvordan amplitude og fase blir påvirket for alle frekvenser. Her følger et bodeplott som viser hvordan amplitude og fase blir påvirket av et førsteordens lavpassfilter med knekkfrekvens  $f_k = 1kHz$ .

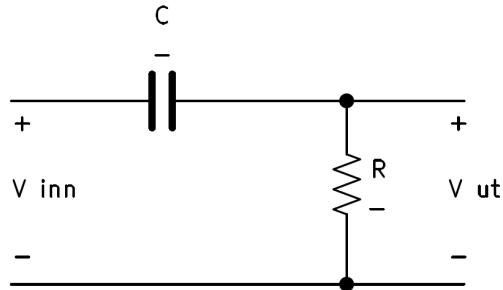


Figur 10: Frekvens- og faserespons for 1.ordens lavpassfilter med knekkfrekvens 1kHz

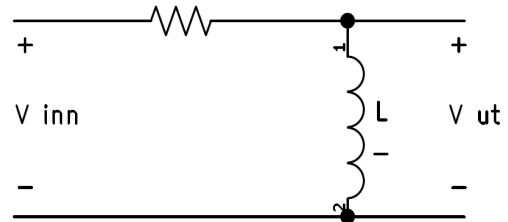
Knekkfrekvensen for et førsteordens RC-filter er definert ved  $f_k = \frac{1}{2\pi RC}$ , og oppgis i Hz.

## 1. ordens høypassfilter

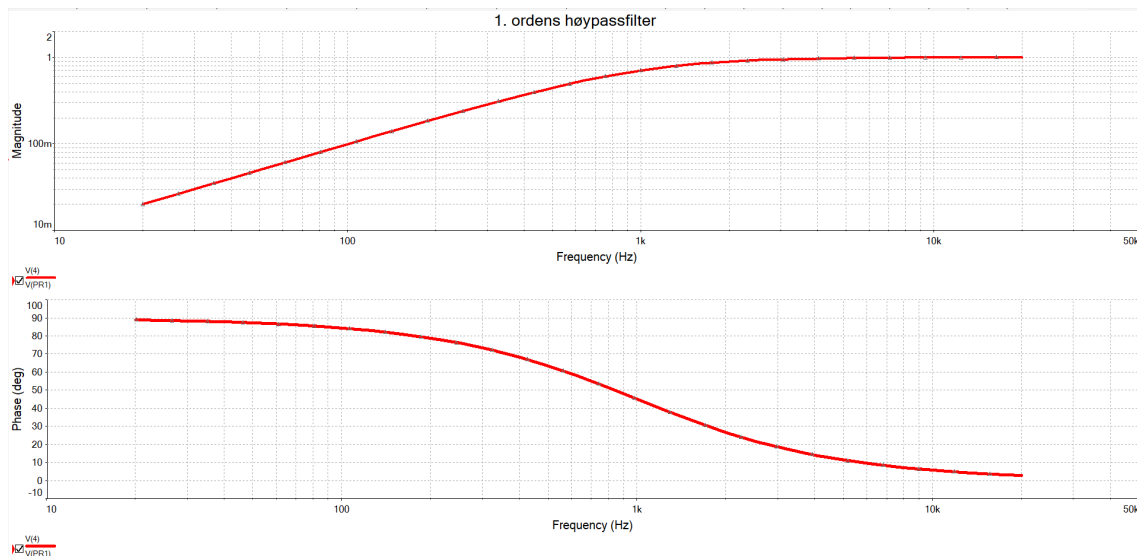
Her følger kretsskjema for førsteordens høypassfilter. Prinsippet er det samme som det for et førsteordens lavpassfilter, men kondensatoren og motstanden har byttet plass [Boylestad, 2016, s.987]. Vi kan også lage filter med spoler.



(a) RC høypassfilter koblingsskjema



(b) RL høypassfilter koblingsskjema

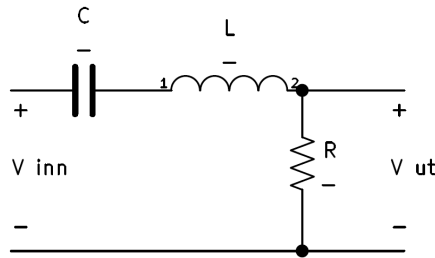


Figur 12: Frekvens- og faserespons for 1.ordens høypassfilter med knekkfrekvens 1kHz

## Båndpass

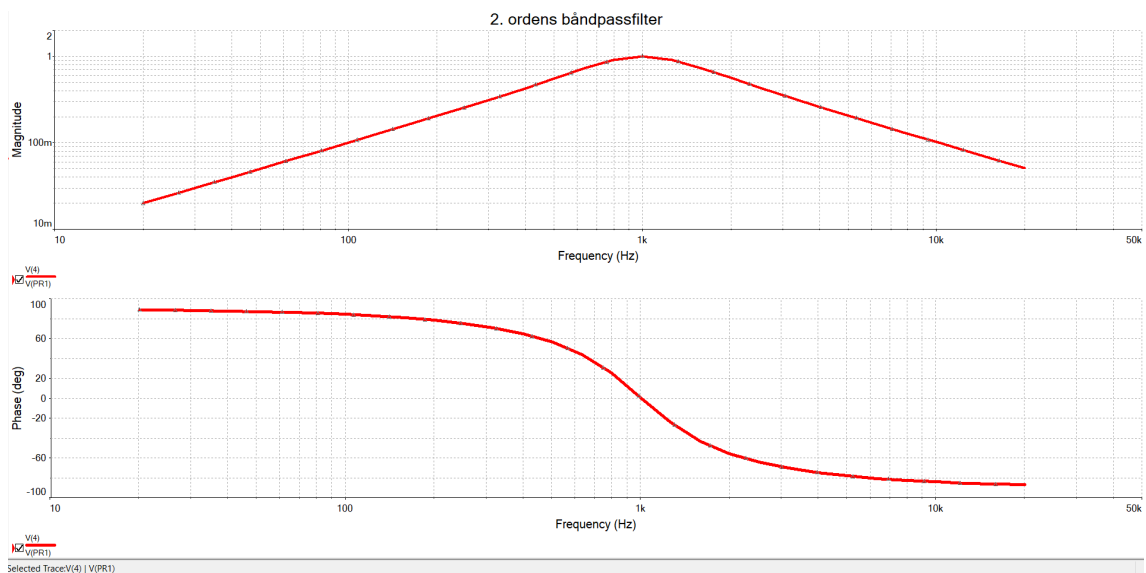
Ved å koble sammen et høypass og et lavpassfilter får man et båndpassfilter [Boylestad, 2016, s. 990]. Overføringsfunksjonen til et slikt filter er litt mer komplisert, og vil gi et andregradsledd. Derfor kalles slike filtere andreordensfilter.

$$H(j\omega) = \frac{V_{ut}}{V_{Inn}} = \frac{1}{(j\omega)^2 + \frac{j\omega}{RC} + \frac{1}{LC}}$$



Figur 13: RLC båndpassfilter koblingskjema

Knekkfrekvensen for et slik båndpassfilter er definert ved  $f_k = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ , merk at frekvensresponsen ikke er avhengig av motstanden.

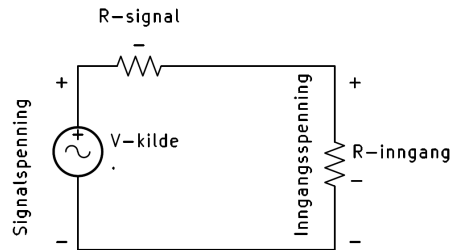


Figur 14: Frekvens- og faserespons for 2.ordens båndpassfilter med knekkfrekvens 1kHz

---

### 4.2.3 Impedans i inngang og utgangstrinn

Prinsippet for impedans i inngang og utgangstrinn kan forklares med utgangspunkt i spenningsdeling. En reell signalkilde vil alltid ha en impedans. Når man kobler denne signalkilden til en videre krets kan systemet forenkles som vist i figuren under.



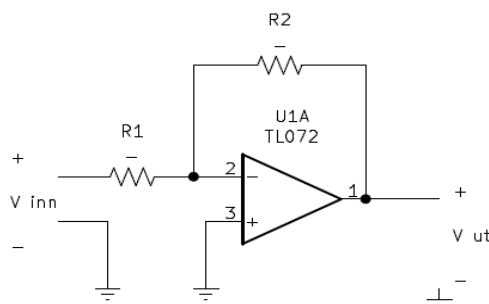
Figur 15: Inngangsimpedans ekvivalentkrets

Her vises en spenningskilde og to motstander. Det fremkommer at denne kretsen er en spenningsdeler (se delkapittel 4.2.1). For at signalet skal kunne overføres effektivt fra spenningskilden til inngangstrinnet er det ønskelig med så lite signalimpedans som mulig, og så høy inngangsimpedans som mulig. Dette prinsippet er viktig i utforming av forsterkerkretser.

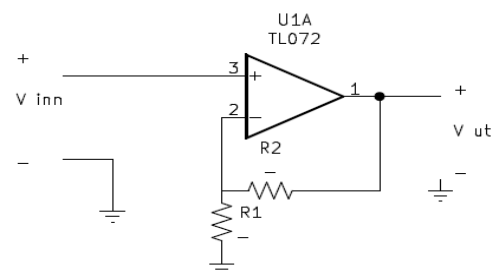
### 4.2.4 Aktive kretser

#### Operasjonsforsterker

En operasjonsforsterker er en integrert krets som er svært allsidig. Den har et differensielt inngangstrinn med høy impedans og et utgangstrinn med lav impedans ([Sedra and Smith, 2016, s. 98]). Inngangsterminalene er avhengig av å dra en likestrøm fra jord eller en spenningskilde. En operasjonsforsterker kan utføre mange ulike oppgaver og er ofte enklere å bruke enn transistorer. Den kan brukes til blant annet forsterkning, filtrering og buffring av lyd. Operasjonsforsterkeren benytter negativ tilbakekobling i de fleste kretser. Det vil si at utgangsterminalen er tilkoblet den negative inngangsterminalen. Av hensyn til oppgavens omfang vil det ikke bli redegjort for operasjonsforsterkerens virkemåte. Her følger illustrasjon av to vanlige koblingskjema for bruk av operasjonsforsterker:



(a) Inverterende forsterker



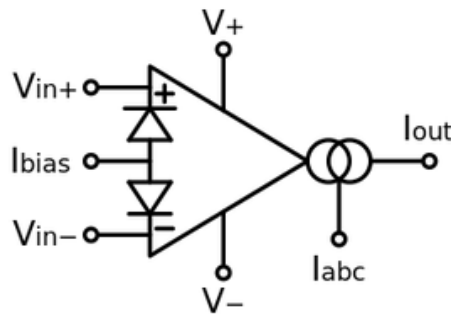
(b) Ikke-inverterende forsterker

---

Forsterkningen i en inverterende forsterker er definert ved  $-\frac{R2}{R1}$ . Forsterkningen i en ikke-inverterende forsterker er definert ved  $1 + \frac{R2}{R1}$ .

### Transkonduktansforsterker

En transkonduktansforsterker er relativt lik en operasjonsforsterker ([TI, LM13700 Datablad]). Den største forskjellen er at forsterkningen til en transkonduktansforsterker ikke er avhengig av tilbakekobling, men en strøm  $I_{ABC}$ . En transkonduktansforsterker gir altså mulighet til å styre forsterkning ved hjelp av et strømsignal. En annen forskjell er at utgangssignalet er et strømsignal og ikke et spenningsignal.



Figur 17: Elektrisk symbol for en transkonduktansforsterker

## 4.3 Transduser

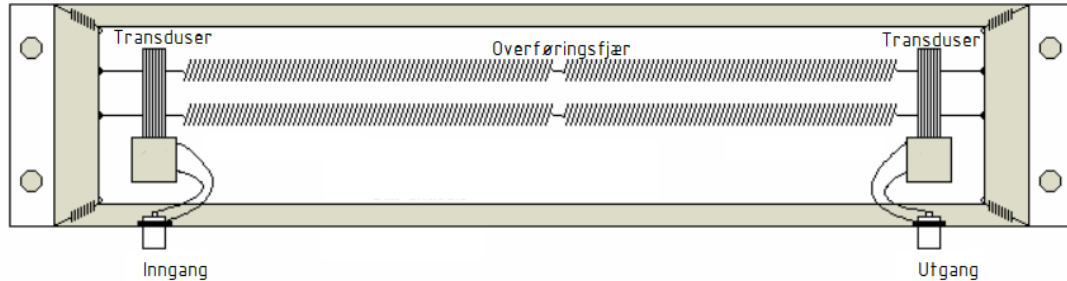
En transduser er en komponent som omdanner energi fra en form, til en annen. I vårt tilfelle er det hovedsaklig snakk om overgang mellom elektrisk, magnetisk og mekanisk energi. En høytaler er en transduser. Et elektrisk signal blir påtrykt en spole, hvor magnetfeltet fra spolen flytter på en magnet ([Boylestad, 2016, s. 497]). Bevegelsen til magneten skaper akustiske bølger som vi kan høre. Det samme prinsippet gjelder for dynamiske mikrofoner. Men da er det mekanisk bevegelse i magneten som induserer spenning i spolen. Transdusere som er brukt til lyd er hovedsaklig induktive. Det betyr at de kan påvirke frekvensresponsen til signalet som blir påtrykt.



---

## 4.4 Elektromekanisk fjærklang

En fjærtank består hovedsakelig av to transdusere og overføringsfjær (Meinema [1958]).



Figur 18: Skjema for fjærtank

Her følger en kort oppsummering av virkemåte: Et elektrisk signal anvendt på inngangsspolen vil resultere i et alternerende magnetisk felt. Det magnetiske feltet vil bevege magnetene i transduseren, som er mekanisk koblet til fjærene. Når signalet treffer fjærene vil det reflekteres frem og tilbake, samtidig som det blir plukket opp av utgangstransduseren. Her er prosessen omvendt, og de mekaniske vibrasjonene i magnetene vil indusere et elektrisk felt i utgangsspolen. Dette elektriske feltet kan man plukke opp med en forsterker. På grunn av at transduserene er induktive vil fjærklanger alltid også være et filter. Frekvensresponsen blir avhengig av induktansen til transduserene, springfjærene som brukes og utforming av preamp/pick-up forsterkere.

## 5 Fremgangsmåte

Oppgaven skal nå redegjøre for det praktiske arbeidet. Ulike idéer for realisering av kretsene skal presenteres sammen med refleksjoner rundt valgene som ble tatt. Avslutningsvis følger en forklaring av de komplette kretsene. Disse vil gjennomgåes i detalj hvor styrker og svakheter ved designet vil være vektlagt. Den tidligere beskrevne teorien om elektroteknikk og design danner bakteppet for arbeidet.

### 5.1 Tidlige iterasjoner

#### 5.1.1 Fjærklang

I delkapittel 4.3 ble det redegjort for transduserens virkemåte. Her fremkom at en transduser overfører elektrisk energi til mekanisk energi ved hjelp av spoler

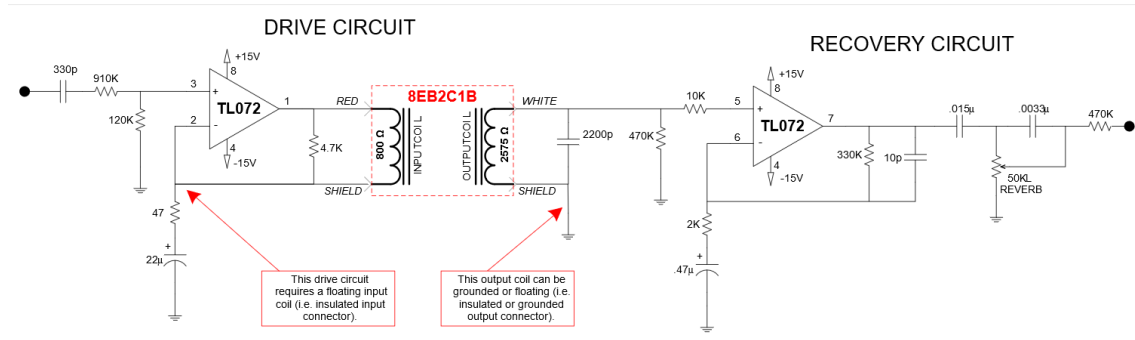
og magneter. For å drive en fjærtank må det elektriske signalet som treffer inngangstransduseren være kraftig nok til at det er mulig å plukke det opp igjen fra utgangstransduseren. I tillegg kan det være ønskelig å forme frekvensresponsen til signalet. Transduserer er induktive, og danner et filter når de er koblet mot en forsterkerkrets. I tillegg er overføringsfjærene lite responsive over 2kHz. Man ender derfor opp med et båndpassfilter med knekkfrekvens rundt 1kHz. Man kan kompensere for dette ved å øke amplituden på signalet i områdene over og under 1kHz.

Transduserene som er valgt i denne oppgaven har en impedans på  $700\Omega$  ved 1kHz. Dette betyr at strømmen i spolen vil ligge rundt  $\frac{6V}{700\Omega} = 8,6mA_{peak}$  med en 12V spenningsforsyning. Kretsen skal kunne drive to fjærtanker og man kan anta en strøm på ca  $20mA_{peak}$ , en relativt liten strøm. Hvis man antar at dette er den mest energikrevende delen av kretsen, kan man konkludere med at det ikke vil være behov for kjøling eller andre tiltak for å beskytte kretsen mot overoppheting.

Ut i fra det som nå er diskutert kan man si at kretsen har tre viktige oppgaver:

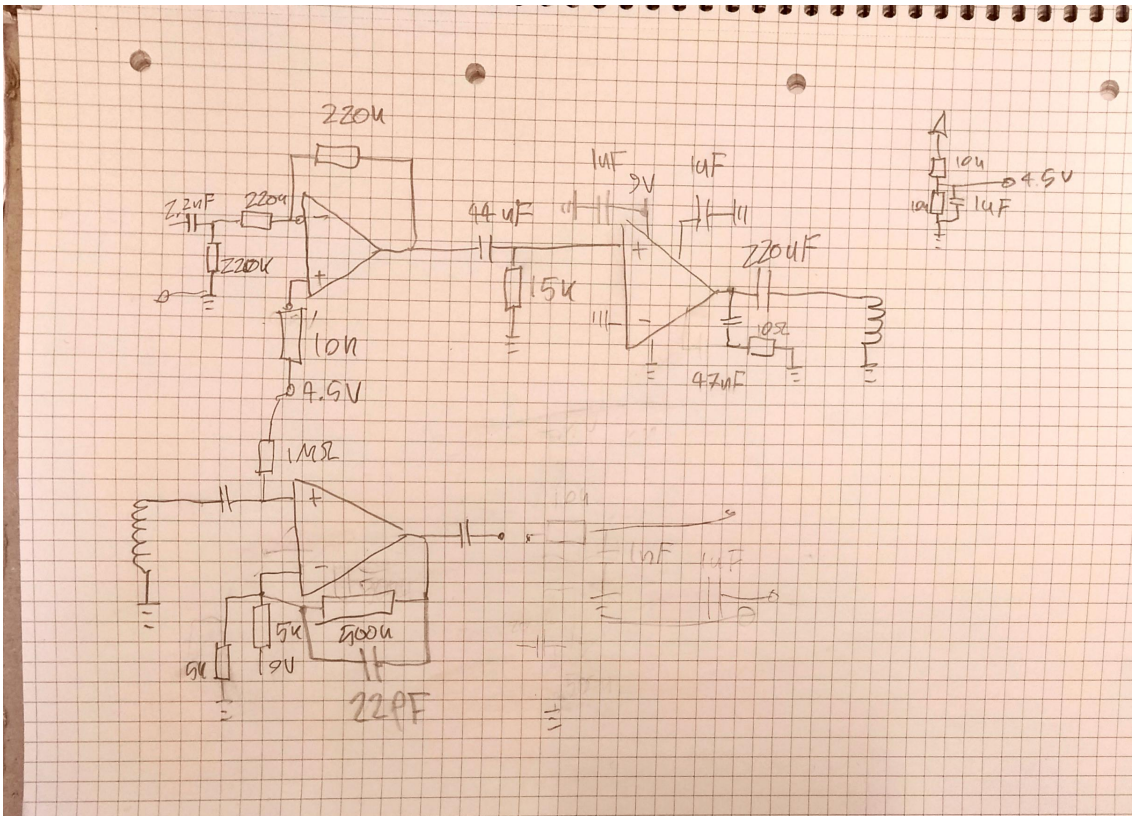
1. Den må kunne levere et kraftig nok signal til å drive inngangstransduseren.
2. Den må plukke signalet opp igjen.
3. Den må kompensere for frekvensresponsen til systemet.

I tillegg kommer andre viktige bidrag som spenningsforsyning og begrensninger som maksimalstrøm til valgt operasjonsforsterker. Oppgaven skal nå ta for seg fremgangsmåte for kretsdesign, og de ulike iterasjonene.



Figur 19: Fender reverb driver

Fender Blues Junior er en gitarforsterker som benytter kretsen i figur 19 til å drive fjærklang. Fjærtankene har en impedans på  $800\Omega$  (Parts [2015]). Denne kretsen ble brukt som referanse i utviklingsfasen. På dette tidspunktet i prosessen var jeg ikke klar over hvilken impedans som var i transduserene til fjærtankene mine. Jeg trodde impedansen var et sted mellom 8 –  $30\Omega$ . Dette viste seg å ikke stemme og den faktiske impedansen var på  $700\Omega$ . En annen misforståelse var tilknyttet jording. På grunn av feil ved testing trodde jeg at fjærtanken var jordet gjennom chassy og at begge transduserene hadde samme jord. Dette var også feil, men misforståelsen var ikke avgjørende for designet.



Figur 20: Første test reverb

Dette er den første fungerende kretsen for fjærklang. Kretsen består av fire trinn:

1. Inngangstrinn med høypassfilter.
2. Forsterkertrinn med gain på 20 og høypassfilter.
3. Fjærtanken.
4. Pick up forsterker med gain på 252.

Dette vil teoretisk sett tilfredstille alle kravene som tidligere er stilt til kretsen. Den leverer et kraftig signal, den plukker signalet opp igjen og den kompenserer for frekvensresponsen til systemet. Kretsen benyttet en integrert forsterkerchip på forsterkertrinnet før inngangstransduseren. Dette ble gjort for å sikre at kretsen skulle levere nok strøm til å drive fjærtankene. I senere iterasjoner ble denne byttet til en operasjonsforsterker. Da jeg ble klar over hva den faktiske impedansen til transduserene var, innså jeg at det ikke var nødvendig med en slik forsterkerchip. Kretsdesignet kunne forenkles betydelig og ressurser kunne frigjøres. Derfor ble en operasjonsforsterker brukt i senere iterasjoner.

Kretsen ble testet med et  $250mV_{peak}$  signal. Forsterkertrinnet ga en amplitude på  $4.5V_{peak}$  før signalet traff inngangstransduseren. Fra utganstransduseren ble signalet plukket opp av pick up forsterkeren. På grunn av fjærenes ulineære respons var det vanskelig å definere amplituden på utgangssignalet. Enkelte frekvensområder ga

---

en amplitude på  $2V_{peak}$ , mens andre resulterte i en amplitude på  $150mV_{peak}$ . En tydelig trend var at frekvenser mellom 400 og 1000Hz hadde mindre demping enn frekvenser over 2kHz. Ved enkelte frekvenser begynte signalet å klippe.

For å kompensere for frekvensresponsen vil senere iterasjoner inkludere et filter som øker frekvenser over 1kHz. Det er usikkert om det er nødvendig å kompensere for frekvenser under 400Hz. Videre testing må undersøke hvilke frekvenser som får transduseren og forsterkerkretsen til å gå i metning.

### 5.1.2 Tremolo

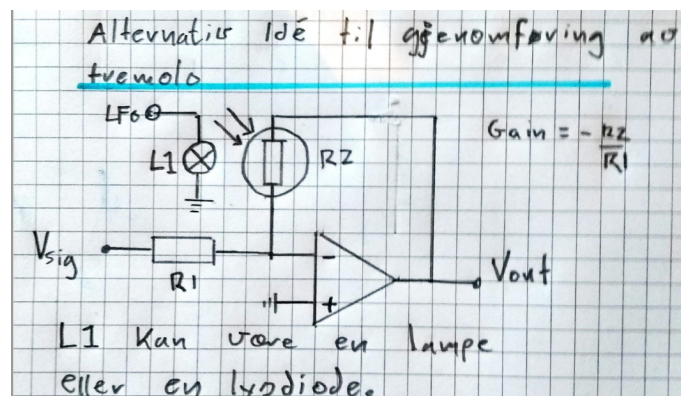
Spesifikasjonen til tremolokretsen er definert som følgende:

1. Den må lage periodiske variasjoner lydstyrken til et eksternt signal.
2. Brukeren skal ha kontroll over hastighet og intensitet.
3. Den burde ikke endre frekvensresponsen til lydsignalet.

Det vil nå presenteres fremgangsmåte og tidlige iterasjoner i forsøk på å tilfredstille spesifikasjonene.

#### Kontrollert forsterkning

Den første idéen jeg hadde til gjennomføring av tremolo tok utgangspunkt i en lampe og en fotoresistor. En fotoresistor er en elektrisk motsand, hvor impedansen er avhengig av innfallende lys. Impedansen i en fotoresistor minker ved økning i lysintensitet. Sammenkoblet med en strømstyrt lyskilde vil dette resultere i en form for strømstyrt impedans, hvor impedansen faller når strømmen i lampen og lysintensiteten øker. Typiske verdier for fotoresistorer varierer mellom flere megaohm når lysintensiteten nærmer seg 0, til noen hundre ohm når lysintensiteten er på sitt høyeste.



Figur 21: Utkast til tremolo med fotoresistor

Som tidligere forklart er forsterkningen i en inverterende forsterker lik  $-\frac{R2}{R1}$ . Hvis lysintensiteten fra L1 varierer vil dette resultere i en variasjon av R2, som igjen

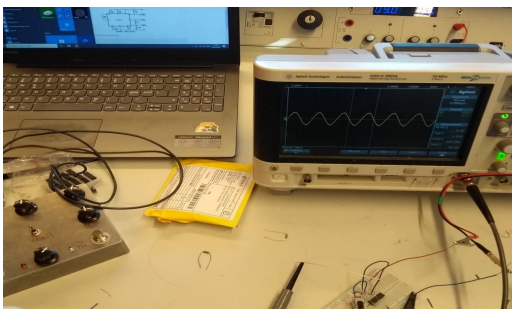
vil føre til en variasjon av forsterkningen. Vi vet også at  $V_{out} = V_{sig} \times \left(-\frac{R2}{R1}\right)$  og kan derfor se at en oscillerende strøm som styrer L1, også vil bestemme amplituden på utgangssignalet med et tilsvarende oscillerende forløp. Hvis i tillegg R1 har samme verdi som den største verdien til R2, vil dette realisere en tremolo, siden forsterkningen da vil variere mellom 0 og 1. For å oppsummere: de oscillerende lysmønstrene styrer signalnivået som går videre gjennom forsterkerkretsen. Dette resulterer i periodisk variasjon av volumet til lydsignalet.

Det viser seg dessverre at fotoresistorer inneholder stoffet kadmium. Kadmium er et tungmetall og kan i følge FHI føre til nyreskader, og er ikke bra for miljøet (FHI [2015]). Slike fotoresistorer er ikke RoHS-kompatible og med hensyn til helse og miljø valgte jeg derfor å forkaste denne idéen. Dette på tross av at kretsen ville vært enkel å gjennomføre, og interessant å bruke på grunn av mulige ulineariteter som oppstår i prosessen.

Den neste idéen bestod i å gjennomføre tremolo ved hjelp av en transkonduktansforsterker. En transkonduktansforsterker kan benyttes som en spenningsstyrt forsterker (VCA). Dette betyr at man enkelt kan endre amplituden på et signal ved direkte bruk av signalet fra en oscillator. Dette blir redegjort for i delkapittel 5.3, hvor det ferdige designet blir fremstilt.

## Styringssignal

Den potensielt viktigste delen av en tremolo er oscillatoren. Oscillatoren lager periodiske svingninger som skal brukes for å manipulere amplituden på et lydsignal. For å lage en oscillator trenger man en krets som genererer svingninger mellom to punkter. Dette kan gjøres ved hjelp av piezokrystaller, transistorer, operasjonsforsterkere eller integrerte kretser. Da jeg begynte prosjektet hadde jeg lite kjennskap til oscillatoren og ønsket derfor å finne en enkel løsning. Det ble derfor bestemt å bruke en integrert krets. I databladet til integrerte kretser finner man ofte eksempelkretser til hvordan chippene kan brukes. ICL8038 er en slik integrert krets (se Fig. 22 b), og jeg fant et enkelt koblingskjema som kunne brukes utgangspunkt for tremolokretsen.



(a) Testing av oscillator på lab

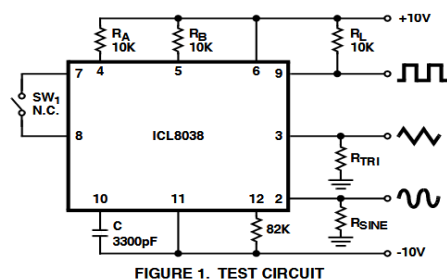


FIGURE 1. TEST CIRCUIT

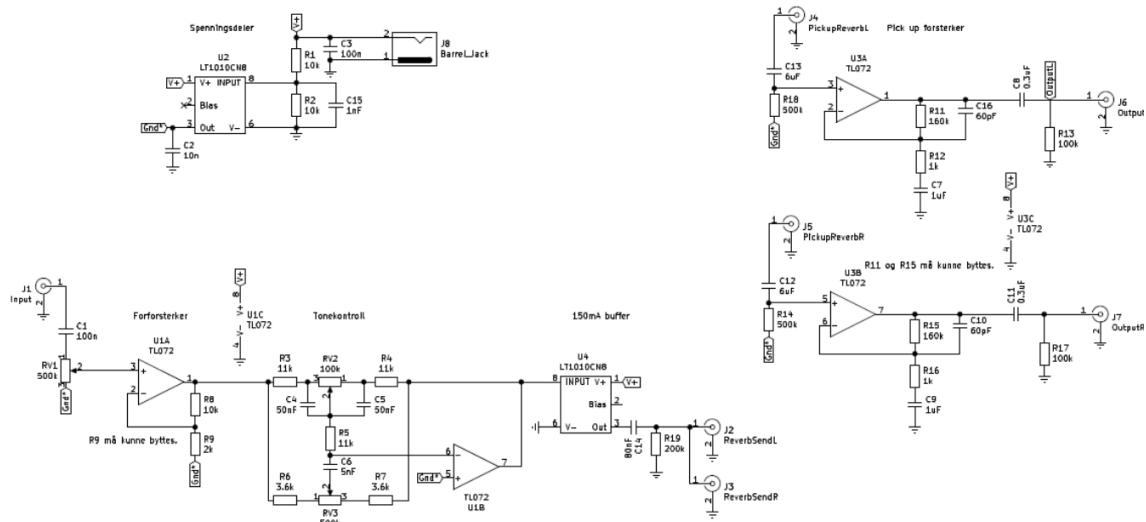
(b) Oscillatorkrets med ICL8038

Figur 22: Oscillator collage

Dette utgangspunktet fungerte fint i alle iterasjoner, og det var derfor ikke nødvendig å undersøke andre løsninger.

## 5.2 Kretsdesign fjærtank driver

Det vil nå presenteres det fullførte designet til kretsen som skal drive fjærtanker. Først følger et bilde av den fullstendige kretsen. Videre følger en forklaring av hver enkelt del. Det vektlegges hvordan de ulike delene sørger for at alle spesifikasjoner er tilfredstilt. I tillegg skal forslag til forbedring fremstilles. Avslutningsvis følger en helhetlig vurdering av kretsen.

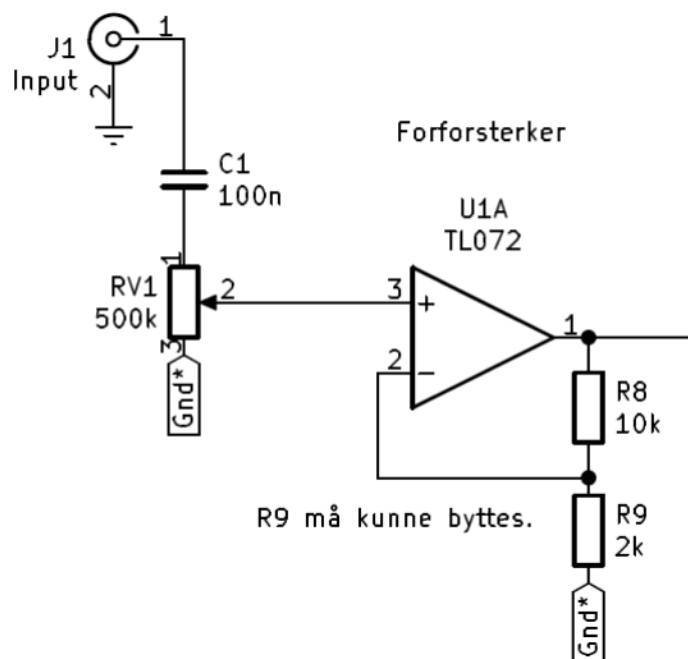


Figur 23: Fjærklangdriver, fullført krets

Den resulterende kretsen består av fem deler:

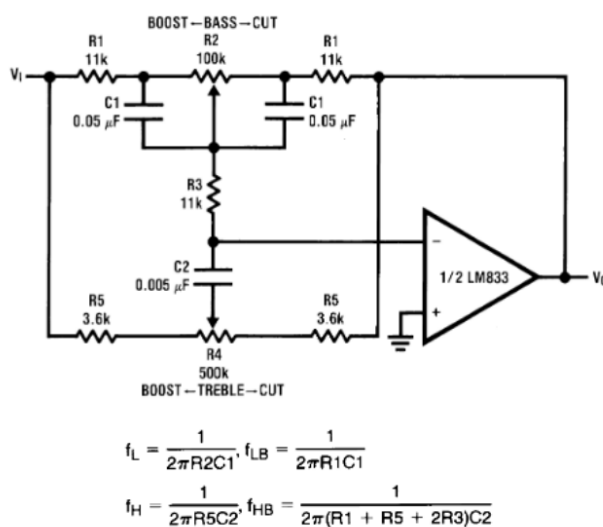
1. Forforsterker
2. Tonekontroll
3. Buffer
4. Pick up forsterker
5. Spenningsdeler

Her følger en gjennomgang av hver enkelt del.



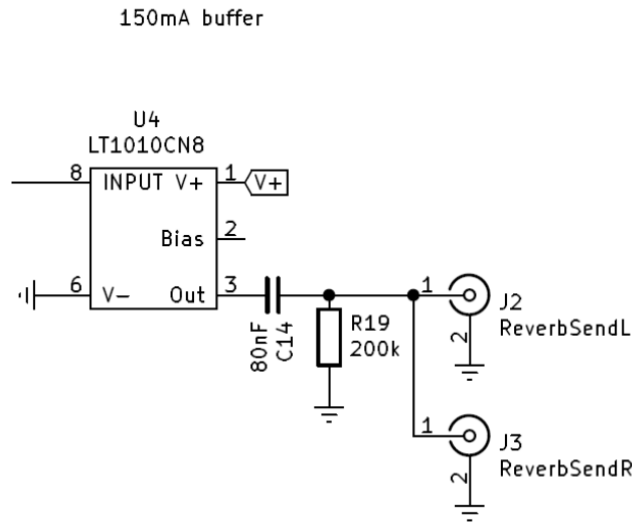
Figur 24: Forforsterker

J1 er tilkoblingspunktet, og representerer en 6,35 mm lydkontakt. C1 og RV1 danner et høypassfilter med knekkfrekvens 3.18Hz. Dette er langt under det hørbare området og vil ikke påvirke bassresponsen til signalet. C1 vil også blokkere all like-spennning i begge retninger. RV1 er et potensiometer som bestemmer amplituden på inngangssignalet og vil kunne forhindre forvrenging. Videre treffer signalet selve forsterkertrinnet som har en forsterkning på 6, altså 15,6 dB. Ved å bytte ut R9 kan man justere forsterkningen, noe som kan være nødvendig under designfasen. Inngangsimpedansen vil hovedsakelig være definert av RV1. 500kΩ gir en stor inngangsimpedans og vil sannsynligvis være tilstrekkelig.



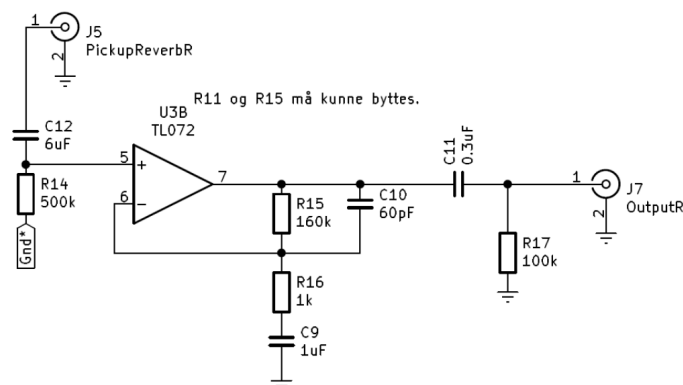
Figur 25: Tonekontroll

Fig. 25 viser tonekontrollen. To potensiometer gir kontroll over bass og diskantrespons, ved hjelp av to hyllefilter. Tonekontrollen gir en gain på 20dB for de to frekvensområdene som for driveren er satt til (320Hz og 1.1kHz). Dette skal gi god kompensasjon for frekvensresponsen til fjærtanken.



Figur 26: Buffer

En vanlig operasjonsforsterker kan ikke levere mer enn 20mA. For å forsikre normal drift og for å gjøre kretsen så enkel som mulig, er det derfor valgt å benytte en 150mA buffer. Bufferen påvirker ikke forsterkning, eller frekvensrespons, men sørger for å levere rikelige mengder strøm. Det er tidligere regnet ut at kretsen vil dra ca 18 mA i denne grenen, og det kan hende en enkelt operasjonsforsterker hadde klart dette helt fint. Men man kunne sett for seg at å drive en operasjonsforsterker i grenseområdet kunne resultert i redusert lyd kvalitet, eller levetid. Derfor er bufferen implementert. C14 og R19 danner et høypassfilter med knekkfrekvens ved 10 Hz. C14 blokkerer DC.



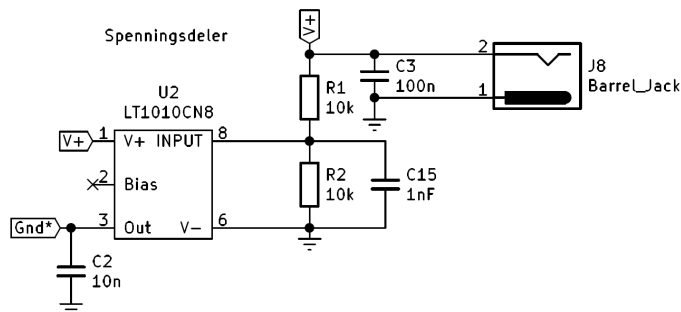
Figur 27: Pick up forsterker

Pick up forsterkeren har en gain på 154. Signalet fra utgangstransduseren er i mV-



---

området og man trenger stor forsterkning for å kunne bruke det videre. I tillegg danner forsterkeren et tredjeordens høypassfilter, og et førsteordens lavpassfilter. Dette sørger for å fjerne støy, og uønskede frekvenser. Utgangsimpedansen til operasjonsforsterkeren er neglisjerbar, og signalet burde være mer enn godt nok til studiobruk.



Figur 28: Spenningsdeler

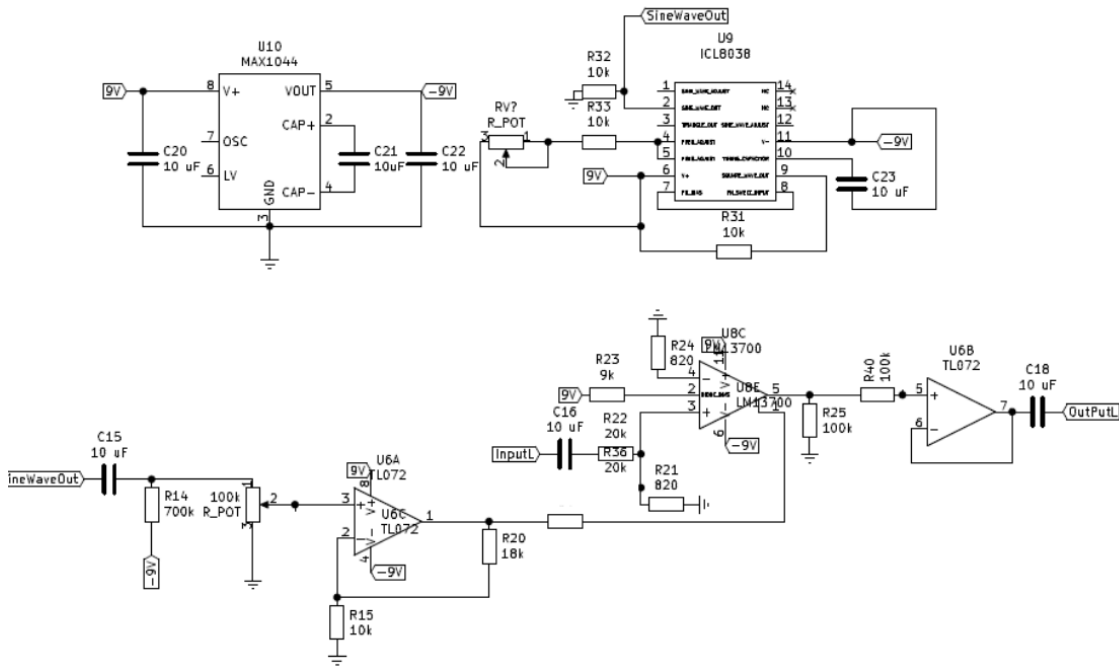
Spenningsdeleren skaper et arbeidspunkt for hele kretsen. Det er også tilkoblet en buffer som sørger for at arbeidspunktet er stabilt, og at det ikke oppstår noen problemer med uventede tilbakekoblinger eller støy. Det er også brukt avkoblingskondensatorer som bidrar til å begrense støy fra spenningskilden. J8 er tilkoblingspunktet for spenningskilden. Det er ikke klart om bufferen er nødvendig, og hvis kretsen skal utvikles videre, burde mulighetene for å fjerne bufferen undersøkes.

### Helhetlig vurdering av fjærklang

Etter at kretskortet var designet, bestilt og bygget ble det testet i ulike musikalske sammenhenger. Effekten ble brukt på gitar, trommer, synth og vokal. Det ble også laget et lite samplebibliotek, med lydene som oppsto av fysisk kontakt med springfjærene. Dette resulterer i lyder som minner om torden, sci-fi pistoler og treverk som knirker. Dette hadde ikke gått ved bruk av konvolusjon, siden det ikke er mulig å interagere fysisk med en digital effekt. Det ble konkludert med at lyd kvaliteten var god, men preget av støy. Tonekontrollen var svært nyttig, og lyd kvaliteten ble best når både bass og diskant var skrudd helt opp. I videre iterasjoner kan det vurderes å ikke gjøre tonekontrollen til en del av brukergrensesnittet, fordi både bass og diskant alltid sto på fullt. Dette hadde også frigjort muligheten til å kontrollere andre parametere, og fremdeles beholde et enkelt brukergrensesnitt. Det oppsto noe klipping, og det mistenkes at forholdene mellom inngangssignal og de ulike forsterkertrinnene burde optimaliseres. Slik at ikke en del av kretsen begynner å klippe når andre deler fremdeles har mye å gå på. Mulighet for stereo resulterte i en rikere og mindre resonant etterklangssignatur. Designet har fremdeles mangler og burde utforskes videre, men av hensyn til prosjektets tidsramme stopper arbeidet her.

## 5.3 Kretsdesign Tremolo

Oppgaven skal nå presentere den fullførte designet for tremolo. Først følger et bilde av den fullstendige kretsen. Videre følger en forklaring av hver enkelt del. Det skal vektlegges hvordan de ulike delene sørger for at alle spesifikasjoner er tilfredstilt. I tillegg skal forslag til forbedring fremstilles. Avslutningsvis følger en helhetlig vurdering av kretsen.

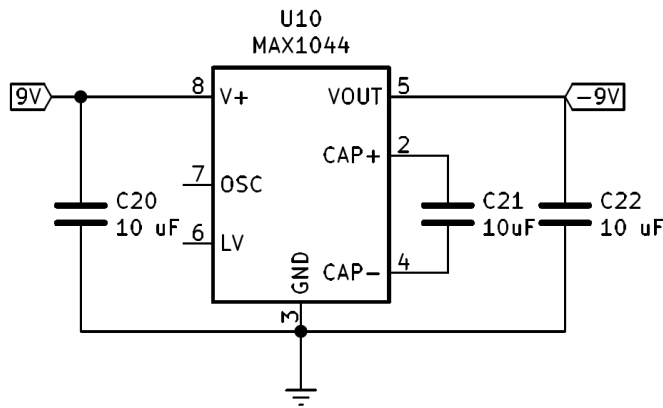


Figur 29: Tremolo, fullført design

Den resulterende kretsen består av fire deler.

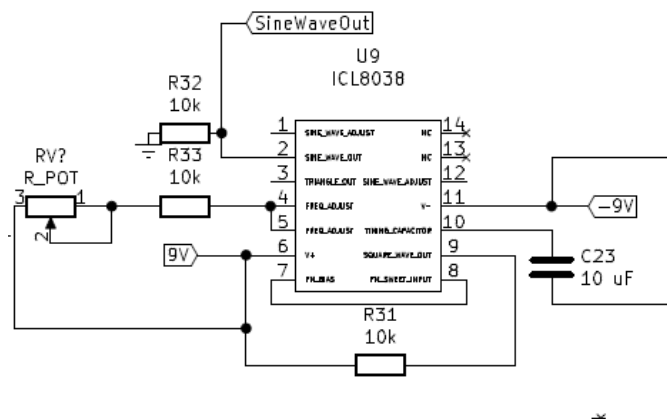
1. Spenningsforsyning
2. Oscillator
3. VCA
4. Utgangstrinn

Her følger en gjennomgang av hver enkelt del:



Figur 30: Spenningsforsyning MAX1044

For å unngå problematikk knyttet til arbeidspunkt er det benyttet en spenningsomformer (MAX1044), som omdanner +9V til -9V. Dette gir tilgang til positiv og negativ spenning. På denne måten blir biasspenning på signalet unødvendig og man slipper å forholde seg til potensiell problematikk knyttet til dette. En annen fordel er at oscillatorchippet må drives på minst 10V, mellom positiv og negativ terminal. MAX1044 gir i dette tilfellet 18V som er mer enn godt nok. 18V er også innenfor maksimalspenningen, som er 30V. Med en kondensator mellom pinnene med navn CAP+ og CAP- kan man velge svitsjefrekvens. I dette tilfelle er den satt til 30 kHz. Utenfor det hørbare området, noe som forhåpentligvis vil sørge for null hørbar svitsjestøy. Kondensatorene C20 og C22 er glattekondensatorer og bidrar til en jevn utgangsspenning.



Figur 31: Oscillatorkrets ICL8038

ICL8038 er en oscillator som kan produsere frekvenser fra 0.001Hz til over 300kHz. Den har sinus, trekant og firkant direkte tilgjengelig fra pinnene, men man kan også generere sagtannspenninger enten ved hjelp av pinnene duty cycle frequency adjust, eller ved en enkel integrator. Hvis den brukes i området 1-15 Hz vil man oppnå tradisjonelle tremoloeffekter. Hvis den kjøres over 20Hz vil man få lyder assosiert med ringmodulasjon, og den vil da begynne å legge til hørbare overtoner, såkalte sidebånd.

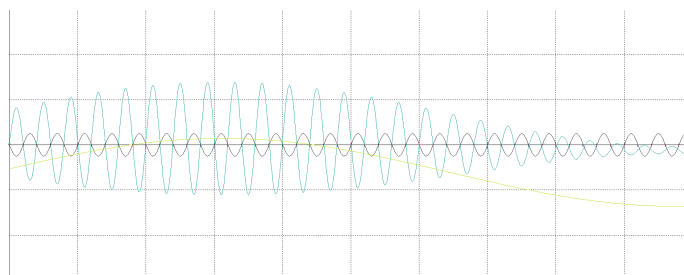
---

Utgangsimpedansen på sinuspinne er ca  $1k\Omega$  og det kan derfor være nødvendig å benytte en buffer/spenningsfølger for optimal drift.

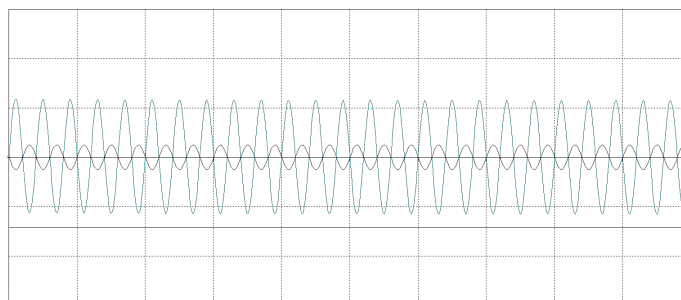
I datablad finnes informasjon om teknikker for å unngå forvrengning på signalet. Siden signalet skal benyttes som styresignal så vurderes det ikke som nødvendig å ha en perfekt sinusformet kurve. Potensielle ulineariteter i modulasjon er ansett som ønskelig, siden det kan skape en interessant lydsignatur.

Ved å legge inn en variabel motstand fra spenningsforsyningen inn på pinne 4 og 5 får man enkelt kontroll over frekvensen. Hvilken frekvens man ender opp med er avhengig av den totale resistansen fra spenningsforsyningen og inn på pinnene, i tillegg til kapasitansen på pinne 10 (timing capacitor). Det kunne også vært lagt inn en bryter som vekslet mellom de ulike bølgeformene fra oscillatoren. På denne måten kunne man fått sinus, trekant, sagtann og firkant. I vårt tilfelle er sinus og firkant mest interessant, men av tidsmessige hensyn ble kun sinus benyttet. Dette valget bidrar også til å opprettholde et enkelt brukergrensesnitt.

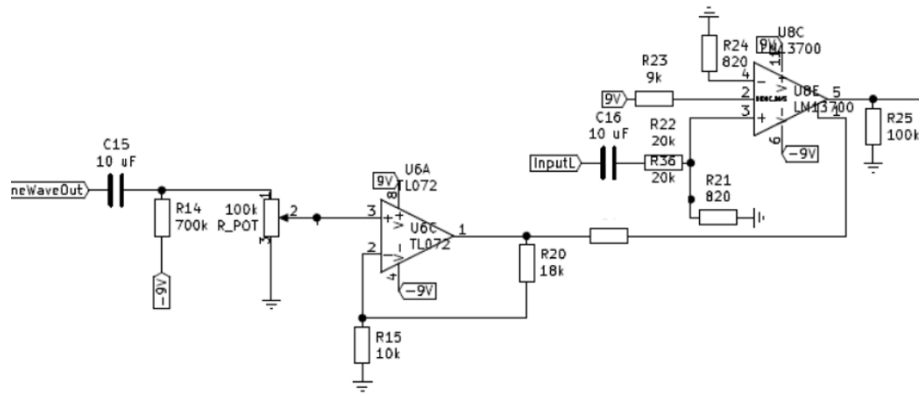
Med et 100k potensiometer har man full kontroll over intensiteten på effekten. Potensiometeret kobler den positive inngangen på operasjonsforsterkeren mellom signalet og jord. Når inngangen blir jordet vil dette resultere i en DC-spenning mellom utgangen på U1A og terminal 1 på U2A. Terminal 1 på U2A er forsterkningsbiasen og dette vil resultere i at signalet man sender inn i kretsen ikke vil bli på virket av signalgeneratoren. På denne måten oppnåes kontroll over effektintensitet.



Figur 32: Tremolo med full intensitet



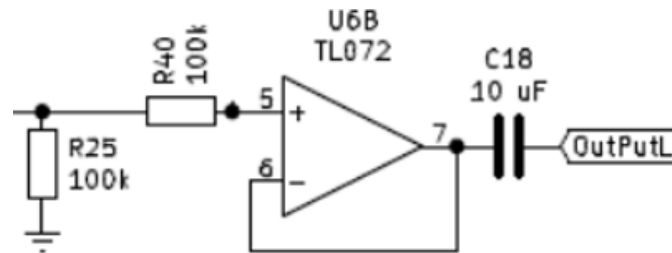
Figur 33: Tremolo med intensitet helt av



Figur 34: VCA

VCAen er selve hjertet av tremoloen. Alt som tidligere er gjort sørger for korrekte signaler, strømmer og spenninger inn på transkonduktansforsterkeren. Oscillatoren generer  $I_{ABC}$  som styrer utgangstrømmen, som igjen gir oss utgangsspenningen. Oscillatorsignalet blir forsterket før det blir brukt som kontrollsignal for VCAen.

Lydsignalet møter motstandene R21 og R22 som tilsammen danner en spenningsdeler. LM13700 tåler ikke mer enn 80mV før den begynner å klippe, og signalet må derfor reguleres. Det er antatt at inngangssignalet vil ligge opp mot 1V. Det er altså ønskelig å beholde 8% av den opprinnelige amplituden.



Figur 35: Output buffer

Utgangen på LM13700 er en 20mA strømkilde. For å omdanne dette til et spenningsignal benytter man en motstand ned til jord (R25). Impedansen på motstanden vil avgjøre utgangsspenningen. Dette signalet vil ha høy impedans og vil derfor være dårlig egnet til videre bruk. Derfor er det benyttet en enkel buffer som gir et sunt utgangssignal med lav impedans.

### Helhetlig vurdering av tremolo

Etter å ha designet og bygget kretskortet ble det montert i en gitarpedal og testet i ulike musikalske sammenhenger. Det ble tidlig oppdaget at effekten introduserte støy på signalet. Etter å ha sett over kretsskjema innså jeg at inngangsimpedansen er svært lav. Siden det ikke er noen buffer før spenningsdeleren ser det ut til at impedansen ligger på  $20k\Omega$ . Effekten hadde sannsynligvis virket bedre hvis impedansen hadde ligget nærmere  $500k\Omega$ . I tillegg ble det ikke designet noe kretskort,

---

og kretsen ble loddet på et protoboard. Det kan hende loddingene hadde vært bedre på et kretskort, og at dette ville resultert i mindre støy. Tremoloen låter veldig kult til bruk på perkussive instrumenter, da oppfattes støyen som en del av rytmikken i lyden. Støyen er ikke såpass fremtredene at den ikke kan benyttes til mer konvensjonelt bruk, men støynivået burde forbedres i fremtidige iterasjoner. Det ble heller ikke nok tid til å implementere stereo. Dette kunne vært løst på flere måter hvis tiden hadde strukket til. Enten ved bruk av to asynkrone oscillatorer, noe som ville resultert i spennende polyrytmiske forløp. Eller med én enkelt oscillator hvor styringssignalet ble snudd slik at når lydvolument økte på høyre kanal, ble det redusert for venstre. Dette konkluderer prosessen med design av tremolo.

---

## 6 Konklusjon

Denne oppgaven har undersøkt en fremgangsmåte i design av lydelektronikk. Tankegodset til Herbert Simon om at alle tilsynelatende kompliserte systemer kan sees på som et nettverk av enkelhet, har vært nyttig i alle trinn av prosessen. Å definere spesifikasjoner først, for så å finne løsninger har vært essensielt gjennom prosjektet. Her fremkommer også hvordan avsløringen av et problem kan være en del av løsningen: da jeg innså at fotoresistorer ikke var RoHS-godkjente måtte jeg finne en ny løsning, og transkonduktansforsterkeren viste seg her å være nyttig. Bernsen og Powell sin innsikt i at designprosessen ikke er lineær, men sirkulær viste seg å stemme i dette arbeidet. Å teste ulike design, notere styrker og svakheter for å så designe på nytt har gjort at jeg, med begrenset erfaring innen elektronikk, har fått resultater jeg er svært fornøyd med. Til tross for dette ble ikke prosjektet perfekt. Støyproblemer og ambisjoner som ikke ble oppnådd er imidlertid blitt en del av resultatet. Det er med tungt hjerte at jeg avslutter arbeidet med bacheloroppgaven. Dette er muligens en naturlig del av å avslutte en sirkulær prosess. Kanskje hadde det vært umulig å komme helt i mål med en ferdig utforming, for hvordan vet man når produktet er godt nok? For meg har sammenhengen mellom fysikk og musikk vært interessant å undersøke. Det skapte en ukonvensjonell arbeidsprosess hvor det ikke alltid var mulig å forutsi hvordan endringer i kretsdesign ville påvirke lyden. Resultatet av arbeidet består ikke bare av to analoge lydeffekter, men også av erfaringene som er opparbeidet gjennom prosessen. Mennesker har uttrykt seg gjennom lydteknologi i over 5000 år. Mitt forsøk på å designe lydeffekter representerer slik et moderne uttrykk i en lang tradisjon, i krysningspunktet mellom kunst og teknologi.

---

## Litteraturliste

- Lm13700 dual operational transconductance amplifiers with linearizing diodes and buffers. URL <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/549474/TI1/LM13700M.html>. Hentet 13.10.2020.
- Jens Bernsen and Earl Powell;. *Succes via Design*. Springer, 1990.
- Robert L Boylestad. *Introductory Circuit Analysis*. Pearson, 2016.
- Griffin Brown. A history of reverb in music production. 2020. URL <https://www.izotope.com/en/learn/a-history-of-reverb-in-music-production.html>. Hentet 01.05.2021.
- Prof.agg. Paolo Debertolis. Archaeoacoustic analysis of the hal saflieni hypogeum in malta. *Journal of Anthropology and Archaeology*, 2015.
- Erik Dyrhaug. Design. 2020. URL <https://sn1.no/design>. Hentet 01.05.2021.
- FHI. Fakta om kadmium i mat og miljø. 2015. URL <https://www.fhi.no/ml/miljo/miljogifter/fakta/kadmium-i-mat-og-miljo--faktaark/>. Hentet 13.03.2021.
- Alain Findeli. Moholy-nagy's design pedagogy in chicago (1937-46). *The MIT Press*, 1990.
- Dan Formosa. A brief history of tremolo. 2013. URL <https://www.premiERGuitar.com/gear/a-brief-history-of-tremolo>. Hentet 15.04.2021.
- Joyce Hwee Ling Koh, Ching Sing Chai Benjamin Wong, and Huang-Yao Hong. *Design Thinking for Education*. Springer, 2015.
- Herbert Meinema. Artificial reverberation unit. 1958. URL <https://patents.google.com/patent/US3106610?q=Meinema+1958>. Hentet 04.02.2021.
- Amplified Parts. Spring reverb tanks explained and compared. 2015. URL <https://www.amplifiedparts.com/tech-articles/spring-reverb-tanks-explained-and-compared>. Hentet 01.05.2021.
- Adel S. Sedra and Kenneth C. Smith. *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press, 2016.
- Herbert A. Simon. The sciences of the artificial. *The MIT Press*, 1969.



