

CODEN: LUTFD2/(TFRT-5353/1-121/(1986)

Modifierad växelriktarstyrning i HVDC-anläggning

Hans Wendel

Institutionen för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola
September 1986

| | | | |
|---|-------------------------------|--|-------------|
| Department of Automatic Control Lund Institute of Technology P.O. Box 118 S-221 00 Lund Sweden | | <i>Document name</i> Master Thesis | |
| | | <i>Date of issue</i> September 1986 | |
| | | <i>Document Number</i> CODEN: LUTFD2/(TFRT-5353)/1-121/(1986) | |
| <i>Author(s)</i> Hans Wendel | | <i>Supervisor</i> Björn Wittenmark | |
| | | <i>Sponsoring organisation</i> ASEA Transmission, NLSAR | |
| <i>Title and subtitle</i> Modifierad växelriktarstyrning i HVDC-anläggningar. (Modified inverter control in HVDC-equipment). | | | |
| <i>Abstract</i> <p>The purpose of this thesis was to compare two different control systems for generating control pulses to thyristors in the inverter in a HVDC-transmission. The present control system is based on the idea of keeping an area under the voltage curve constant. This principle can cause some drawbacks when weak networks are used. If the network voltage decreases, the decreasing area is compensated. This implies that more reactive will be drawn from the network and the voltage will decrease even more. The new system operates on the principle that a constant angle remains when commutation is finished. Since compensation is not performed no more reactive power will be drawn from the network and the voltage will be more stable. The investigation has been a simulation study where tests have been performed in the same way for both systems. The conclusions are deducted from the experiments. The most important results, where significant distinction could be observed are:</p> <p><i>Measurements in steady-state by weak networks</i> This experiment confirmed that in cases of voltage drop, the new modified system keeps the network stable until a lower level in the network is reached.</p> <p><i>Change of current order</i> Great differences appeared here between the two systems. The modified system gives higher increase of the current order without causing instabilities.</p> | | | |
| <i>Key words</i> HVDC, control, simulation | | | |
| <i>Classification system and/or index terms (if any)</i> | | | |
| <i>Supplementary bibliographical information</i> | | | |
| <i>ISSN and key title</i> | | | <i>ISBN</i> |
| <i>Language</i> Swedish | <i>Number of pages</i> 121 | <i>Recipient's notes</i> | |
| <i>Security classification</i> | | | |

Detta arbetes syfte är att undersöka en ny typ av växelriktarstyrning för HVDC-anläggningar. Den nya styrningen arbetar enligt principen konstant vinkel istället för konstant area efter avslutad kommutering. I undersökningen jämförs den nya med den befintliga styrningen genom att studera uppförandet statistiskt och dynamiskt hos de olika systemen.

Arbetet har utförts som ett examensarbete på ASEAs HVDC-division i Ludvika och utfördes under vintern 1985-86.

INNEHÅLL

1 HVDC-teori

- 1:1 Inledning
- 1:2 Grundläggande funktion
- 1:3 Ventilernas arbetssätt
 - 1:3:1 Ventilerna i likriktarbryggan
 - 1:3:1:1 Ostyrda ventiler med transformatorinduktansen $d \stackrel{x}{=} 0$
 - 1:3:1:2 Styrda ventiler med transformatorinduktansen $d \stackrel{x}{\neq} 0$
 - 1:3:1:3 Styrda ventiler med transformatorinduktansen $d \stackrel{x}{\neq} 0$
 - 1:3:2 Ventilerna i växelriktaren
- 1:4 Övriga funktioner
- 1:5 Styrsystemet. Principer och uppbyggnad
 - 1:5:1 Ström- spänningskaraktäristika för en HVDC-strömriktare
 - 1:5:2 Strömreglering
 - 1:5:3 Styrprinciper
 - 1:5:3:1 Konstant likströmsreglering
 - 1:5:3:2 Minimum tändvinkelstyrning
 - 1:5:3:3 Minimum kommuteringsmarginalstyrning

2 Undersökningens syfte

3 Prediktorns funktionssätt

- 3:1 Areaprediktor
- 3:2 Vinkelprediktor

4 Simulator

- 4:1 12-puls strömriktaren
- 4:2 DC-linje
- 4:3 AC-filter
- 4:4 AC-nät
- 4:5 Synkronmaskiner

5 Utförda tester på prediktorn

- 5:1 Inledande tester
- 5:2 Simulators uppkoppling
- 5:3 Definition av svaga nät
- 5:4 Uppmätning av γ som funktion av AC-spänningen
 - 5:4.1 Tester med oändligt starka nät
 - 5:4.2 Tester med svaga nät
- 5:5 Tester med trefasfel i växel- och likriktarens AC-nät
- 5:6 Enfasfel i växelriktaren
- 5:7 Ändring av strömorder

6 Presentation av resultat och jämförelser mellan systemen

- 6.1 Resultat av inledande tester
- 6.2 Uppmätning av kortslutningsförhållanden
- 6.3 Uppmätning av γ som funktion av AC-spänningen
 - 6.3.1 Tester med oändligt starka nät
 - 6.3.2 Tester med svaga nät
- 6.4 Trefasfel i växelriktare
- 6.5 Trefasfel i likriktaren
- 6.6 Enfasfel i växelriktaren
- 6.7 Ändring av strömorder

7. Sammanfattning

1 HVDC-TEORI

1.1

Inledning

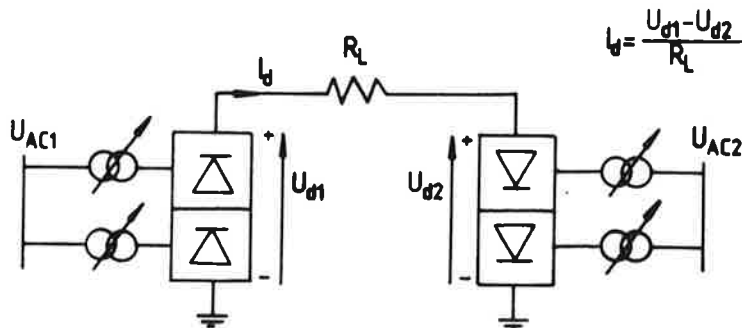
Varför skall man bygga högspända likströmsöverföringar? Borde det inte vara bättre med vanlig högspänd växelström? Anledningarna kan vara många. Den första är att ledningar är dyra. I en likströmsöverföring behövs endast en ledare för att överföra elektrisk ström jämfört med tre ledare för växelström. En likströmsöverföring överför heller ingen reaktiv effekt, utan allt som överförs är nyttig effekt. Likströmsöverföringar kan också användas för frekvensstabilisering i AC-nät. Vidare kan likström användas då man vill förbinda nät som ej är synkront kopplade till varandra; t ex om man vill förbinda nät med frekvenserna 50 och 60 Hz.

Varför används då inte likströmsöverföringar mer? Det är, som oftast, en ren kostnadsfråga. Omvandlingsstationerna mellan växel- och likström är väsentligt dyrare än en vanlig transformatorstation. Det är framförallt då elektrisk kraft skall överföras över stora avstånd eller då man vill hopkoppla icke synkrona nät, som HVDC blir en attraktiv lösning.

1.2

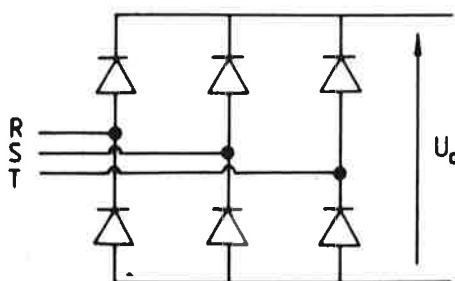
Grundläggande funktion

En likströmsöverföring är avsedd att överföra elektrisk energi mellan två AC-nät eller mellan två delar av samma AC-nät. Den består i princip av två omvandlingsstationer och en DC-linje mellan dem. Strömmen, som överförs, är proportionell mot spänningsskillnaden mellan de bägge stationerna. Genom att variera spänningen i den ena av dem kan man sålunda variera strömmen och därmed också effekten som överförs. Se figur 1.



Figur 1

Varje omvandlingsstation består normalt av två seriekopplade 6-pulsbryggor, där varje 6-pulsbrygga är uppbyggd av sex ventiler kopplade enligt figur 2. Ventilerna styrs med hjälp av tändpulser från ett styrsystem. Varje ventil är uppbyggd av seriekopplade tyristorer. Antalet seriekopplade tyristorer beror normalt på vilken likspänningsnivå som DC-linjen är avsedd för.



Figur 2

Den grundläggande principen vid styrning av en HVDC-överföring är att variera fasläget på ventilernas tändpulser i förhållande till AC-spänningarna. Därigenom ändras likspänningsnivån U_D över ventilbryggan. Ändringen av tändpulsernas fasläge kan ske nästan momentant, det enda som begränsar är bryggans tillgängliga maximispänning, dynamiken hos kretsarna som styr och den maximala ändringshastigheten på den effekt AC-näten tål.

1.3

Ventilernas arbetssätt

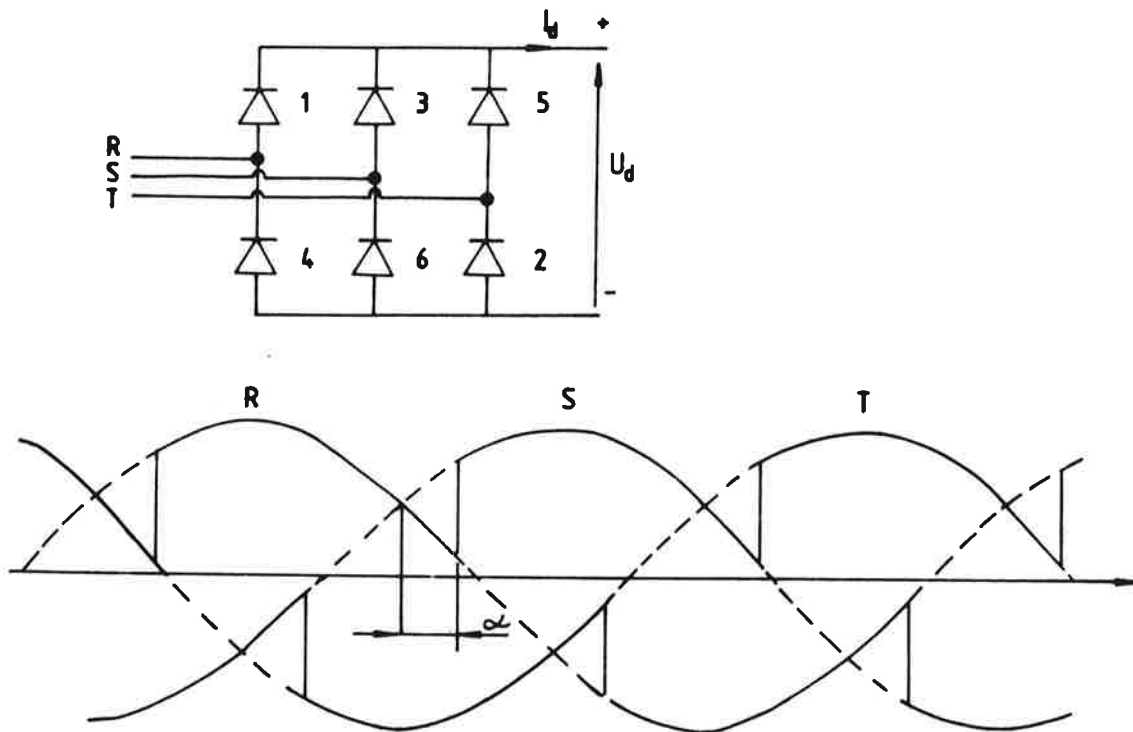
I HVDC-stationerna är huvudkomponenten en ventilbrygga normalt bestående av tolv ventiler. En tyristors arbetssätt är följande:

1. En tyristor kan endast leda ström i framriktningen, d v s från anoden till katoden. Om en spänning appliceras i den andra riktningen, kommer tyristorn att blockera strömmen.
2. Tyristorn börjar att leda ström i framriktningen, när två villkor är uppfyllda:
 - I. Spänningen över tyristorn i framriktningen är positiv.
 - II. En tändpuls ges till tyristorn.

Strömmen fortsätter genom tyristorn så länge som den är positiv. Spänningen, som ligger över tyristorn, är då approximativt 0V.

1.3.1

Ventilerna i likriktarbryggan



Figur 3

1.3.1.1

Ostyrda ventiler med transformatorinduktansen $d = 0$

Om ventilerna ledde så snart spänningen i framriktningen vore positiv, skulle den ventil som är ansluten till fasen med störst spänning alltid vara ansluten till den positiva DC-sidan och den ventil som är ansluten till fasen med lägst spänning till den negativa DC-sidan. Linjens likspänning U_d blir då skillnaden mellan den högsta positiva och negativa fasspänningen.

Om samtliga induktanser i AC-systemet försummas blir likspänningens medelvärde

$$U_d = U_{di0} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} U_{v0} \approx 1,35 U_{v0}$$

U_{v0} = fas-till-fas värdet av kommuteringsspänningen, rms värde

U_{di0} = ideal tomgångslikspänning.

1.3.1.2

Styrda ventiler med transformatorinduktansen $d_x = 0$

Om tändpulserna till ventilerna styrs med avseende på fasläge, kan kommuteringen mellan dem fördröjas med vinkeln α . Då tändningen fördröjs, förloras en spänningstidyta, varvid medellikspänningen kommer att minska. U_d kan då skrivas

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} U_{v0} \cos \alpha = U_{dio} \cos \alpha$$

1.3.1.3

Styrda ventiler med

transformatorinduktansen $d_x \neq 0$

I ett verkligt AC-system finns det alltid induktanser i transformatorlindningar. Dessa måste tas hänsyn till vid kommuteringen. Antag först att ventil 3 skall tändas vid tändvinkeln α då ventilerna 1 och 2 är ledande. Vid början av kommuteringen leder ventil 1 likströmmen, och strömmen genom ventil 3 är noll. Kommuteringskretsen består av en EMK i fas R, induktansen i fas R, ventil 1, ventil 3, induktansen i fas S och en EMK i fas S. Den resulterande EMK:n U_{SR} kommer nu att inducera en uppväxande kortslutningsström i backriktningen på ventil 1. Denna kortslutningsström växer till dess att den är lika med likströmmens amplitud. Nu är strömmen genom ventil 1 noll, och den kan inte bli negativ, varvid ventil 1 slutar att leda och kommuteringen är avslutad. Tiden det tar att kommutera bestäms av induktansen x , EMK:n U_{SR} och likströmmen. Under kommuteringen beror spänningen på DC-linjen av medelvärdet av fasspänningarna R och S. Därigenom kommer det inte att bli något steg i spänningen från U_{RT} till U_{ST} utan istället till medelvärdet

$$\frac{U_{RT} + U_{ST}}{2}$$

under kommuteringen och efter avslutad kommutering till U_{ST} . Under kommuteringen förloras ytterligare spänningstidyta, och spänningen blir lägre. Likspänningen kan uttryckas som:

$$\begin{aligned} U_d &= U_{dio} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} d_x I_d = \\ &= U_{dio} \cos \alpha - \frac{I_d}{I_{dN}} U_{dioN} d_x \end{aligned}$$

där

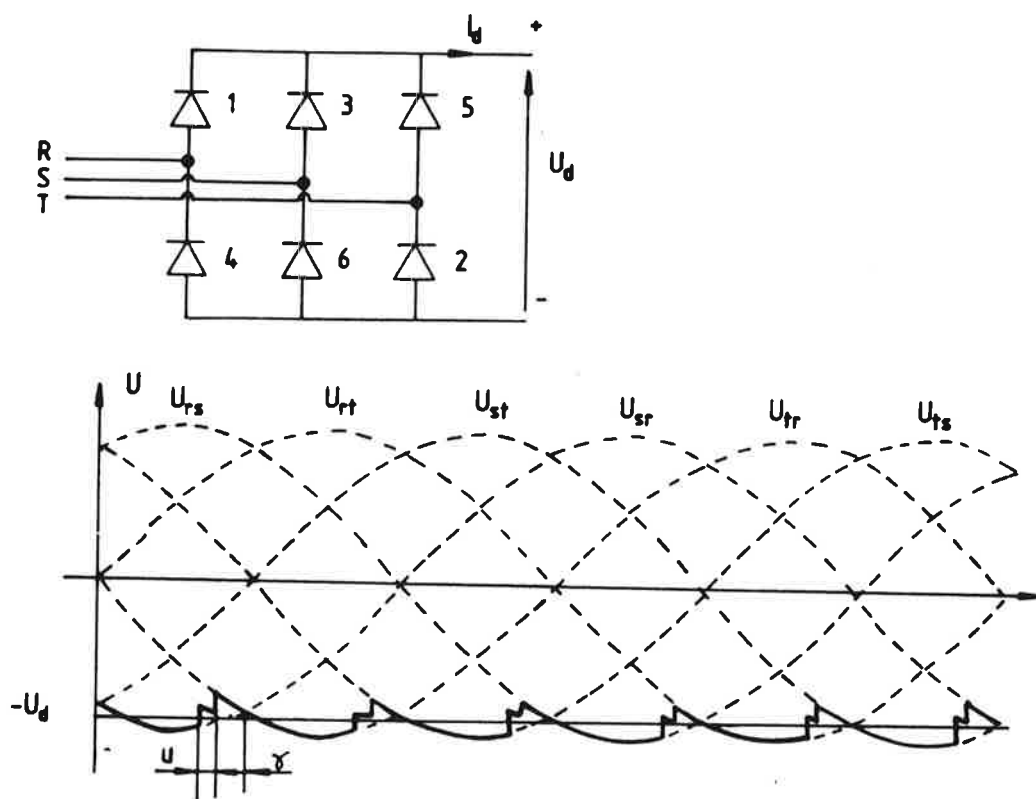
* U_{dioN} och I_{dN} är de nominella värdena på U_{dio} respektive I

$$* d_x = \frac{3 \cdot x \cdot I_{dN}}{\pi \cdot U_{dioN}}$$

1.3.2

Ventilerna i växelriktaren

Tändvinkeln α kan teoretiskt ökas till 180° . När α passerar 90° byter spänningen över strömriktaren tecken. Strömmen kan dock inte ändra riktning. Detta betyder att effektflödet har vänts. Nu arbetar ventilbryggan som en växelriktare och effekt avges till AC-nätet. Eftersom likspänningen är negativ med hänsyn till strömriktningen innebär detta att ventilerna tar upp spänning i blockriktningen under en stor del av cykeltiden. För att ventilerna skall kunna blockera då spänningen blir positiv, krävs dock att laddningsbärarna som finns i tyristorn har dragits bort innan en positiv spänning läggs över ventilen. Den tid med negativ tyristorspänning som behövs kallas kommuteringsmarginal och benämnes γ .



Figur 4

Betrakta nu kommuteringen från ventil 1 till 3, d v s spänningen U_d växlar från U_{RT} till U_{ST} . Kommuteringen måste ske före det att spänningen U_R blir större än spänningen U_S , så att ventil 1 hinner blockera medan spänningen över ventilen ännu är negativ. Tiden till ventilspänningens nollgenomgång predikteras därför hela tiden fram till dess att en tändpuls ges till ventil 3. Tändningen kan därmed ske lämplig tid i förväg med hänsyn till överlappet u , tiden då bägge ventilerna leder, för att släckvinkeln γ skall bli tillräckligt stor.

Om kommuteringen inte är avslutad då ventilspänningen blir positiv, $\tau \leq 0$, eller om τ inte blir tillräckligt stor för att ventilen skall kunna bygga upp en blockspänning, kommer det att bli en transient störning, som kallas kommuteringsfel.

Ett kommuteringsfel kan bero på att tändningen av ventilen inte är beordrad i tillräcklig tid för att klara kommuteringen, t ex kan AC-spänningen plötsligt sjunka, varvid spänningstidsytan som krävs för kommuteringen inte blir tillräcklig. Händelseförloppet blir följande:

Antag kommutering från ventil 1 till ventil 3. Då ventil 1 inte har blockerat, kommer den att fortsätta att leda ström efter nollgenomgången. Eftersom spänningen i fas R nu är högre än i fas S, kommer strömmen genom ventil 3 att gå ner till noll igen. Nästa kommutering är från ventil 2 till 4. Nu är alltså ventilerna 1 och 4 ledande, och ventilbryggan kan betraktas som kortsluten på DC-sidan.

1.4

Övriga funktioner

Eftersom man vill generera så litet övertoner som möjligt, seriekopplar man normalt två sexpuls ventilbryggor med inspänningarna fasvridna 30° i förhållande till varandra. Denna fasvridning åstadkommes genom att man har två transformatorer anslutna till AC-nätet, där den ena är Y-Y-kopplad och den andra Y- Δ -kopplad. Därigenom har en 12-pulsströmriktare erhållits. Strömriktartransformatorer är normalt utrustade med lindningskopplare, dvs man kan justera spänningen mellan AC-nätet och kommuteringsspänningen i steg. För att få en glättad likström på DC-linjen, brukar man dessutom ansluta en induktans i serie med strömriktaren.

Omriktarstationerna konsumerar reaktiv effekt, både då de arbetar som lik- och växelriktare. För att kompensera detta utnyttjar man de AC-filter som behövs för filtretningen av övertoner. De övertoner som genereras på AC-sidan är för en 12-pulsströmriktare normalt av ordningen $n=12k+1$; $k=1,2,3\dots$ (för en 12-puls strömriktare), varför filtren blir rent kapacitiva vid grundfrekvens och därmed genererar reaktiv effekt.

1.5

Styrsystemet - Principer och uppbyggnad

Som tidigare nämnts sker regleringen av strömmen på DC-sidan genom att man varierar spänningsdifferensen mellan växelriktaren och likriktaren. Detta åstadkommes genom att man lägger spänningen på en fix nivå i växelriktaren med ett konstant förhållande till spänningen på AC-nätet. Strömregleringen sker primärt i likriktaren genom justering av spänningen. Regleringen åstadkommes genom att lik-

strömmen mätes och jämförs med en strömorder. Om strömordern är större än strömsvaret, ökas spänningen i likriktaren genom att styrvinkeln α minskas. Därmed stiger spänningen och strömmen ökar. Om strömsvaret är större än strömordern ökas α .

Vinkeln α kan inte minskas mer än till en minsta vinkel $\alpha = \alpha_{\min}$. På motsvarande sätt kan α inte ökas mer än att en minsta kommuteringsmarginal erhålles.

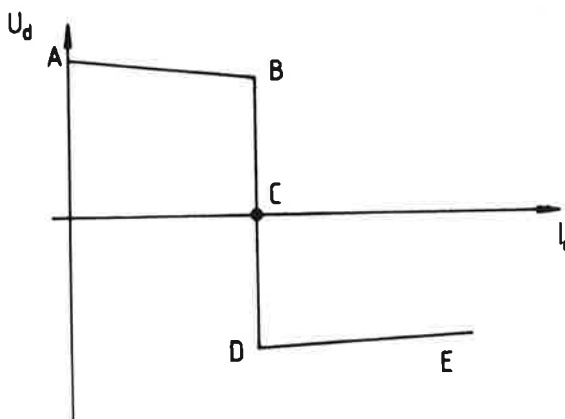
1.5.1

Ström- spänningskaraktistikan för en HVDC-strömriktare

Den fullständiga ström-spänningskaraktistikan för en strömriktare bestäms av ekvationen

$$U_d = U_{di0} \cos \alpha - \frac{I_d}{I_{dN}} U_{di0N} \cdot dx$$

Antag att vi kopplar strömriktaren till en fiktiv variabel likspänningskälla och att motspänningens amplitud är lika med strömriktarens maximala utspänning. Eftersom strömmen bara kan gå i en riktning genom ventilerna, kan det inte flyta



Figur 5

någon ström i kretsen, även om strömordern till strömriktaren är skild från noll. Ventilerna kommer sålunda att få tändpulser vid $\alpha = \alpha_{\min}$. Punkt A i Figur 5 motsvarar detta förhållande. Då den fiktiva motspänningen sjunker kan en ström börja flyta genom polen. Strömmen kommer dock att vara mindre än strömordern ända tills en spänning som motsvarar punkt B uppnås. Nu är strömordern för första gången lika med polströmmen. Om motspänningen sänks ytterligare, kommer strömriktaren att följa efter, så att strömmen förblir konstant. I punkten C är $\alpha = 90^\circ$, och spänningen över bryggan är noll. Då α ökas ytterligare, vänds polariteten på strömriktaren. Detta medför att effekt nu kommer att levereras till AC-nätet, och strömriktaren fungerar alltså som växelriktare. När punkten D är uppnådd, arbetar strömriktaren vid $\alpha = \alpha_{\max}$, där α_{\max} bestäms av storleken på överlappet och minsta tillåtna värde på kommuteringsmarginalen γ_{\min} . Om strömmen skulle öka ytterligare, måste α_{\max} minskas på så sätt att överlappet ökar då strömmen ökar, vilket sker utmed linjen D-E, där konvertern arbetar med konstant kommuteringsmarginal.

1.5.2

Strömreglering

Av det ovan sagda framgår det att en lik- och växelriktare fungerar på samma sätt. Då strömmen är mindre än strömordern minskas alltid α så länge $\alpha > \alpha_{\min}$ och då den är större än strömordern ökas α så länge $\alpha < \alpha_{\max}$. Styrsystemen för lik- och växelriktare är sålunda identiska. Hur får man dem då att arbeta som lik- och växelriktare? Lösningen ligger i att ge lik- och växelriktare olika strömorder. I växelriktaren subtraheras den sk strömmarginalen, som är ca 10% av normalströmmen från strömordern. Förutom strömmarginalen ges annars samma strömorder till både lik- och växelriktare.

Om överföringen startas, kommer stationen med störst strömorder att sätta upp en positiv likspänning, medan den med minst strömorder kommer att vara negativ. Med andra ord kommer den station som har den största strömordern att bli likriktare och den station som har den minsta strömordern kommer att bli växelriktare. Anledningen till detta är att båda stationerna har återkoppling från samma polström. Den av strömriktarna, som verkligen kommer att bestämma strömmen beror på max tillgänglig spänning vid $\alpha = \alpha_{\min}$ och $\gamma = \gamma_0$ i respektive station. Om max spänning är lägre i växelriktaren kommer strömmen att regleras av likriktaren. Växelriktaren kommer att bibehålla en max spänning, och likriktaren kan justera strömmen efter sin strömorder upp till dess att den når sin maximala spänning vid $\alpha = \alpha_{\min}$. Därefter kan den inte förhindra att strömmen sjunker. På motsvarande sätt, när maximal spänning är uppnådd i växelriktaren, kan den inte hindra strömmen från att öka. Om den maximala spänningen i växelriktaren är större än i likriktaren, sker strömregleringen i växelriktaren och likriktaren kommer att arbeta vid maximal spänning.

Normalt väljs den maximala spänningen i likriktaren högre än den maximala spänningen i växelriktaren. Det faktum att strömordern i växelriktaren är lägre än i likriktaren tvingar därmed växelriktaren att tända vid största möjliga tändvinkel. I denna reglermod hålls kommuteringsmarginalen konstant vid $\gamma = \gamma_0$ och växelriktaren bestämmer alltså DC-linjens spänning. Spänningen hålls på önskad referensnivå genom justering av lindningskopplarna i transformatorerna. I likriktaren uppmättes på motsvarande sätt α och hålles till ungefär 15° genom justering av lindningskopplarna.

Om strömordern i växelriktaren av misstag blir större än i likriktaren, reverseras spänningen och riktningen på effektflödet ändras. I verkligheten finns det dock en minsta gräns för α då stationen tjänstgör som växelriktare som är ungefär $95-100^\circ$. Effektflödet kommer alltså inte att vändas, men effektöverföringen kommer att upphöra.

Man kan fråga sig, varför man överhuvudtaget ger någon strömorder till växelriktaren. Varför låter man helt enkelt inte växelriktaren arbeta på sin maximala spänning och låter likriktaren ha strömkontrollen? Anledningen är att då störningar uppkommer som ger plötsliga spänningsfall i likriktarens AC-nät, kan likriktarens maximala

spänning vid $\alpha = \alpha_{\min}$ temporärt bli lägre än växelriktarens maximala spänning.

Om växelriktaren i ett sådant fall inte hade någon strömorder, skulle effektöverföringen upphöra. Om växelriktaren istället har en strömorder, kommer den att försöka bibehålla denna nivå genom att minska α . Växelriktaren kommer alltså att ta över strömregleringen och spänningen i den kommer att sjunka. Nu kommer likriktaren alltså temporärt att arbeta vid $\alpha = \alpha_{\min}$, tills dess att lindningskopplarna återställt förhållandena om den är i stånd att göra detta.

1.5.3 Styrprinciper

Det finns två fundamentalt olika styrprinciper för en HVDC-strömriktare. Dessa är dels fas-för-fasstyrning, vid vilken alla tändvinklar α bestäms individuellt för varje fas, dels ekvidistant styrning, vid vilken tändning av ventilerna sker med samma mellanrum i tiden. Fas-för-fasstyrning tillåter högre effektöverföring, då det råder stora osymmetrier i nätet. Det kan däremot vara svårt att få en stabil överföring då nätet är svagt, dvs då nätimpedansen är stor. Karakteristiskt för ekvidistant styrning är att det föreligger ingen direkt synkronisering mellan tändning och växelspänningen och risken för instabilitet är då mindre. En annan fördel med ekvidistant tändning är att den genererar mindre andel av övertoner (vid osymmetrisk mätspänning).

En strömriktare skall kunna arbeta i tre olika reglermoder

- * minimum tändvinkelstyrning, vid vilken tändning sker vid $\alpha = \alpha_{\min}$
- * konstant likströmsstyrning, vid vilken α regleras för att hålla I_d konstant
- * minimum kommuteringsmarginal, vid vilken $\gamma = \gamma_0$

Enligt vad som sagts förut låter man under normal drift likriktaren arbeta vid $\alpha = 15^\circ$, vilket motsvarar reglermoden konstant likströmsreglering. Växelriktaren å andra sidan skall arbeta vid minimum kommuteringsmarginal.

1.5.3.1 Konstant likströmsreglering

Vid denna reglermod låter man skillnaden mellan strömorder och strömsvar via en reglerförstärkare generera en spänning U_c . Denna spänning är normalt konstant ($U_c = U_{c0}$), då strömorden överensstämmer med strömsvaret. Spänningen U_c påverkar en spänningsstyrd oscillator med den nominella frekvensen tolv gånger systemfrekvensen (för en 12-puls strömriktare) då $U_c = U_{c0}$. Om spänningen ökar, stiger frekvensen, och högre frekvens medför att styrvinkeln α minskas. Oscillatorn genererar pulser till alla ventilerna. Dessa överförs till rätt ventil via en styripulsaltare.

Den spänningsstyrda oscillatoren fungerar på följande sätt:
Tre signaler finns tillgängliga.

- a. Styrspänningen U_c
- b. En linjär rampfunktion, som startar från noll vid varje tändning och har en fix lutning.
- c. En spänning som är proportionell mot en tolfedel av periodtiden.

I kretsen summeras de två första signalerna och den tredje subtraheras. Resultatet jämförs i en nivådetektor. Nivådetektorn skiftar nivå, då resultatet passerar nollnivån i positiv riktning. Detta inträffar exakt tolv gånger under en period, när $I_o = I_d$. Pulsen från nivådetektorn nollställes, när rampfunktionen nollställes.

1.5.3.2

Minimum tändvinkelstyrning

Innan tändning av en ventil sker, så vill man att en minsta blockspänning skall finnas över tyristorerna, detta för att säkerställa tändning av tyristorerna. Detta villkor implementeras genom att kommuteringsspänningen över ventilen mätes och jämförs med en referensnivå. Tändning kan ske när spänningen har ökat över referensnivån. Om strömregleringen skulle försöka att minska α under mingränsen, kommer dock tändningen att ske först då $\alpha = \alpha_{\min}$ och likriktaren arbetar i s k α_{\min} mod. Genom den ekvidistanta tändningen kommer de 11 påföljande tändningarna att ske med 30° avstånd, dock tidigast när $\alpha = \alpha_{\min}$.

1.5.3.3

Minimum kommuteringsmarginalstyrning

Detta är det normala arbetssättet för växelriktaren. I denna mod vill man säkerställa en minsta kommuteringsmarginal. Överlappet, U , tiden då båda ventilerna leder, kan härledas ur följande ekvation:

$$\cos \gamma - \cos(\gamma + u) = 2d_x \frac{I_D}{I_{DN}} \cdot \frac{U_{dioN}}{U_{dio}}$$

Om strömmen ökar och kommuteringsmarginalen skall hållas konstant, måste man kompensera för det ökande överlappet genom att minska α . Ökande ström medför ökning av den spänningstidyta som åtgår för kommuteringen. Ett värde proportionellt mot strömmen subtraheras från den totalt tillgängliga spänningstidytan. Då resultatet är lika med önskad kommuteringsmarginal, sker tändning. På samma sätt som vid α_{\min} -styrning har man infört symmetrering för att få ekvidistant tändning, så att den sker med 30° mellan tändpulserna för de påföljande 11 tändningarna, dock senast så att $\gamma = \gamma_{\min}$.

2

UNDERSÖKNINGENS SYFTE

Undersökningen har gått ut på att jämföra egenskaperna hos två olika principer för växelriktarstyrning. Då reglering sker enligt den befintliga principen, genereras tändpulser enligt en prediktiv metod så att det återstår en konstant spänningstidyta efter avslutad kommutering. I det nya systemet skall predikteringen istället arbeta så att det återstår en fix vinkel efter kommuteringen. Anledningen till att man vill testa den nya principen är att växelriktaren drar reaktiv effekt ur AC-nätet i proportion till släckvinkeln γ . Ju större vinkeln γ blir, desto mer reaktiv effekt dras ur nätet. Om en spänningssänkning inträffar på nätet, ökar vinkeln γ , för det styrsystemkoncept som arbetar med konstant area. Detta medför att mer reaktiv effekt dras ur nätet. Om nätet är svagt, kan spänningen sjunka ännu mer, varvid en positiv återkoppling erhålles. Ett sätt att förhindra en sådan positiv återkoppling är att, som i det nya konceptet, prediktera mot en konstant vinkel efter avslutad kommutering oberoende av tillgänglig kommuteringsspänning.

I undersökningarna har egenskaperna hos de två styrprinciperna jämförts genom att dels sänka amplituden hos växelspänningen, och dels genom att inducera kortvariga fel. Kortvariga fel ger möjlighet att studera dels hur systemen uppför sig under fel och dels hur återstarten påverkas.

3

PREDIKTORNS FUNKTIONSSÄTT

Växelriktaren arbetar i moden konstant kommuteringsmarginal under normala driftförhållanden och här är prediktorn av fundamental betydelse. Prediktorn skall bestämma när tändning skall ske, så att det, när kommuteringen är avslutad, återstår en tillräcklig kommuteringsmarginal. Principen för bestämning av kommuteringsmarginalen är, som nämnts tidigare, helt olika i de båda koncepten. I det nya systemet, i fortsättningen kallat modifierat system eller vinkelprediktor, försöker man hålla γ konstant till 17° oberoende vad som händer med spänningen. I det andra systemet, kallat areaprediktor, försöker man hålla spänningstidytan konstant efter avslutad kommutering.

I bägge prediktorerna har man tillgång till kommuterings-spänningarna , en beräknad tid till nästa nollgenomgång samt en signal proportionell mot uppmätt likström. Kommuteringsspänningarna fås från en multiplexer, som väljer den för tillfället aktuella spänningen. Tiden till nästa nollgenomgång läses in av en räknare som sedan räknas ner kontinuerligt fram till tändningen av ventilen, då ett nytt värde för nästa ventil läses in.

3.1

Areaprediktor

I areaprediktorn erhålls den predikterade arean enligt formeln:

$$APRED = K1 * U1 * PRED ZC - K2 * I_d,$$

där U_1 är kommuteringsspänningen, PRED ZC den predikterade tiden till kommuteringsspänningens nollgenomgång, och I_d är strömmen.

Värdet på APRED jämförs med ett referensvärde och när APRED är lika med referensvärdet, genereras en styrepuls. Referensvärdet justeras normalt för att $\gamma = 17^\circ$ vid normal drift. Formeln för den predikterade arean är en approximation av kvarvarande spänningstidstidtyta. Se Appendix 6 för härledning av felet hos areaprediktorn.

Beräkning av APRED utförs genom att den predikterade tiden till kommuteringsspänningens nollgenomgång, PRED ZC, multipliceras med kommuteringsspänningens momentanvärde, U_1 .

Från detta värde subtraheras sedan termen $K2 * I_d$. Intrimning av funktionen sker genom att man först ställer in normal spänning utan ström och trimmar GAMMA MIN REF till $\gamma = 17^\circ$. Man ställer sedan in 100% normalström och trimmar K2, tills $\gamma = 17^\circ$ ånyo erhålles.

3.2

Vinkelprediktor

I vinkelprediktorn försöker man att hålla γ konstant oberoende av spänningen. I vinkelprediktorn erhålls den predikterade vinkeln ur formeln:

$$T PRED = K * PRED ZC - K2 * ID / U1$$

Värdet TPRED jämförs på samma sätt som i areaprediktorn med en referens, och när det predikterade värdet är lika med referensen genereras en tändpuls. (Se ritning sidan 16.)

I vinkelprediktorn blir beräkningen av överlappsvinkeln en approximation, d v s termen $K2 * ID / U1$. En härledning följer nedan. Arean för överlappet blir när överlappsvinkeln är u :

$$A = \int_{180-(\gamma+u)}^{180-\gamma} \hat{U} \sin \Theta d\Theta = \hat{U}(\cos \gamma - \cos(\gamma+u))$$

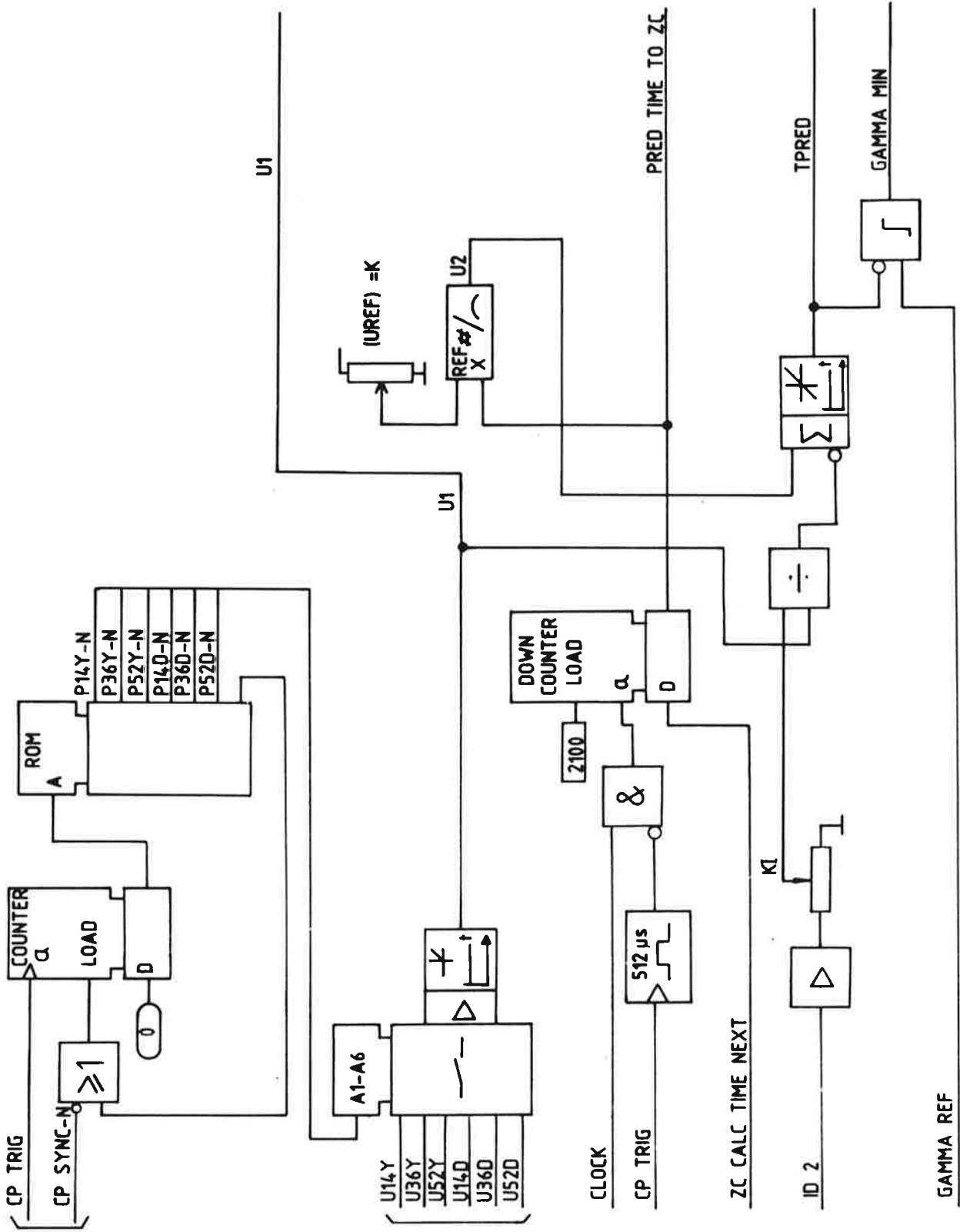
$$u = \arccos(\cos \gamma - \frac{A}{\hat{U}}) - \gamma = \arccos(\cos \gamma - \frac{A \sin Z}{U_1}) - \gamma$$

Värdet på u approximeras med $K2 \cdot ID / U_1 = \frac{A}{U_1}$

Det verkliga värdet är.

$$\frac{\pi}{2} - (\cos \gamma - \frac{A \sin Z}{U_1}) - \frac{(\cos \gamma - \frac{A \sin Z}{U_1})^3}{6} - \dots - \gamma$$

Intrimning av funktionen sker på samma sätt som för areaprediktorn.



4 SIMULATOR

HVDC-simulatore är utvecklade för att kunna utföra system och designstudier inom HVDC. Det finns många exempel på ingenjörstudier när HVDC-simulatore är speciellt användbar. Några exempel är:

- * studier av dynamisk prestanda hos styrsystem och skyddssystem
- * studier av dynamiskt uppförande hos integrerade AC/DC-system
- * studier då man vill studera maximal påkänning på huvudkretsutrustning och exakt simulering av kommuteringsprocessen är nödvändiga.

Simulatore kan indelas i två huvuddelar: lågeffektsimulatore och styrsystemet.

Lågeffektsimulatore innehåller elektriska modeller av alla huvudkretskomponenterna. Effektnivån är 8W per 12-puls strömriktare. Styrsystemet är ett fullskalesystem och innehåller alla väsentliga subsystem som finns i en verklig anläggning.

Simulatore består av:

- * skåp med modeller av huvudkretsarna för en komplett 12-pulsströmriktare, såsom transformatorer, ventiler mm
- * skåp med pi-länkar för representation i DC-linje
- * skåp med AC-filter
- * skåp för modellering av AC-nätets komponenter (linjer, brytare m m)
- * skåp med synkronmaskinmodeller
- * skåp för strömriktarstyrsystem
- * skåp för polkontrollsystem
- * utrustning för registrering

4.1 12-pulsströmriktaren

Varje 12-pulsströmriktare består av två 6-puls ventilbryggor med speciella ventilmodeller. I ventilerna används lågeffekttyristorer i kombination med en krets, så att spänningsfallet över ventilen reduceras. Kompensation sker för att spänningsfallet skall procentuellt sett motsvara det i en riktig överföring.

Konvertern innehåller också två transformatorer, en Y/Y- och en Y/ Δ -kopplad transformator. Transformatorerna är försedda med lindningskopplare med 24 steg. I simulatore är inte styrsystemet för dessa inkluderat, utan

ändring av lindningskopplarläge sker manuellt eller via en terminal. Transformatorerna är också försedda med justerbara reaktorer för representation av varierande kommuteringsreaktans (kortslutningsimpedans). Reaktorerna är anslutna i serie med ventillindningarna och är justerbara mellan 5 och 15% i dx vid 50Hz. I transformatormodellerna går det också att representera mätningen i krafttransformator kärnan. Strömriktarskåpet innehåller också en del annan utrustning för mätning och förlustkompensering.

4.2

DC-linje

I detta skåp finns möjlighet att koppla upp LC-länkar för att representera en DC-linje. Skåpet innehåller också utrustning för att mäta DC-spänningen på linjen.

4.3

AC-filter

AC-filtren i simulatören är avstämda för tredje, femte, sjunde, elfte och trettande övertonen. Det finns dessutom ett högpasfilter och en shuntkondensatorbank. Den reaktiva effekten som genereras av varje filter är inställbar utan att förändra filtrens avstämningens frekvens. Filtren kan avstämmas för både 50 och 60 Hz-nät.

4.4

AC-nät

I detta skåp finns möjlighet att koppla upp LC-länkar för representation av AC-linjer och nätimpedanser. Skåpet innehåller dessutom modeller av AC-brytare.

4.5

Synkronmaskiner

I varje AC-nät kan man koppla in synkronmaskiner som generatorer och synkronkompensatorer. På det sättet kan man få ett dynamiskt väl representerat AC-nät.

5

UTFÖRDA TESTER PÅ PREDIKTORN

5.1

Inledande tester

Under de första veckorna utfördes test av den nya prediktorn med styrsystemet i testmod. Detta kan betraktas som en ren funktionskontroll av kortet innan simuleringarna påbörjades. Dessa funktionstester ledde till vissa smärre modifikationer på kretskortet. Vid funktionstesterna gjordes också en första intrimning av kortet.

I samband med funktionsproven upptäcktes att utsignalen från A/D-omvandlaren (se figur på sidan 16) hade en överlagrad störning. Vid närmare undersökning visade det sig att störningen var synkron med datorsystemets klocka, som har frekvensen 1MHz. Då det visade sig vara svårreducerbart att reducera störningen, höjdes helt enkelt nivån på utsignalen genom att öka A/D-omvandlarens referensspänning. Eftersom störningen låg på konstant nivå, minskades den på så sätt relativt utsignalen.

De andra signalerna, K*ID och GAMMA MIN REF, fick justeras på samma sätt. Signalnivån på GAMMA REF höjdes från 0,337V till ca 1V, d v s en höjning på ungefär tre gånger. Spänningsreferensen till A/D-omvandlaren ligger då på ca 4,92V.

Som avslutning på de inledande testerna upptogs värden av γ när spänning och ström varierades för test av linjäriteten. För resultat se avsnitt 6.

5.2

Simulatorns uppkoppling

Förutom de inledande funktionsproven har alla prov utförts i simulatorn på en modellerad HVDC-överföring för att testa prediktorns uppförande. I dessa prov har nästan genomgående samma uppkoppling använts. Se figur 7. När annan uppkoppling använts finns detta speciellt noterat.

Överförd effekt i verkliga HVDC-anläggningar är oftast normalt i storleksordningen några hundra upp till tusen MW. Effektnivåer upp till flera tusentals MW förekommer dock. Spänningarna varierar normalt från 100 upp till 600 kV. Skalfaktorn mellan anläggning och simulator är därför ungefär 10^6 för effekt och 10^4 för spänning.

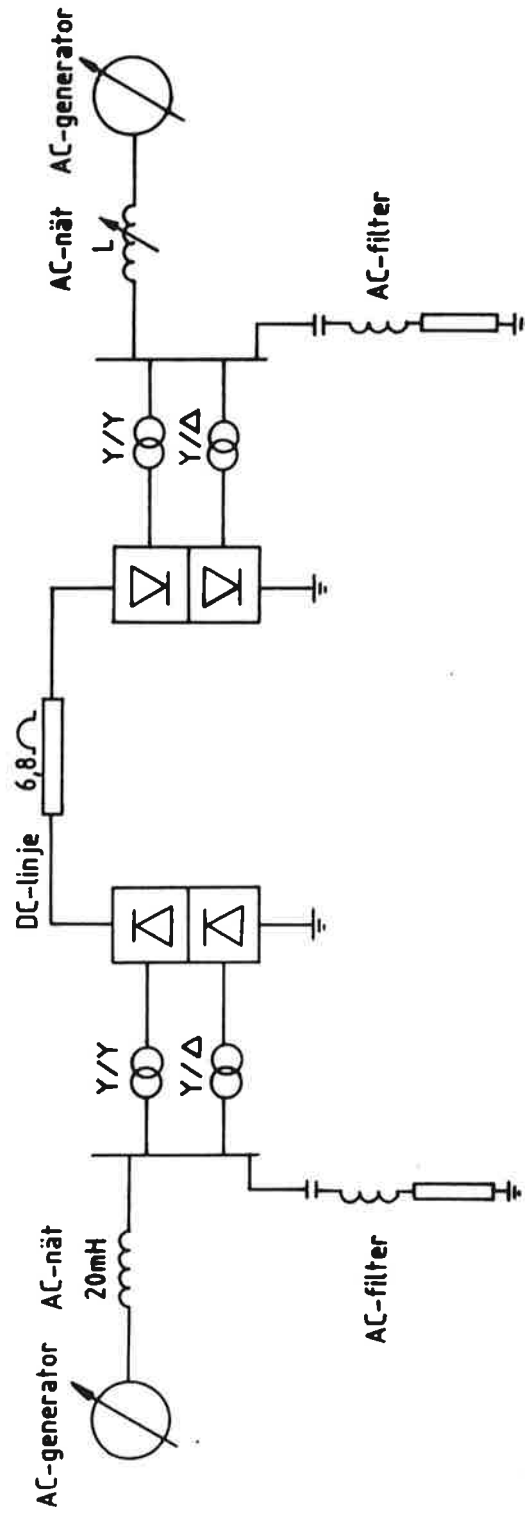
AC-filtren i simulatorn valdes så att den reaktiva effekten som filtren levererar uppgår till 60% av överförd effekt. Normalt konsumerar en strömriktare reaktiv effekt motsvarande 50-60% av den överförda likströmseffekten. I simulatorn är överförd effekt 8W per pol (40V och 0,2 A). Filtren skall sålunda leverera 0,6 x 8VAr. Vid simuleringarna valdes sålunda följande AC-filer:

| Filter | 11 | 13 | HP | Shunt |
|----------------------|------|------|------|-------|
| Levererad effekt VAr | 1,14 | 0,81 | 1,50 | 1,22 |

d v s totalt 4,67 VAr reaktiv effekt.

På likriktarsidan valdes AC-nätets kortslutningseffekt till 40 VA (20 mH). Denna kortslutningseffekt har använts genomgående utom i de fall då proven utförts med oändligt starka nät. AC-nätets impedans på växelriktarsidan har varierats för att simulera olika kortslutningseffekter på nätet. AC-nätets EMK:er modulerades med hjälp av 3-fas spänningar med konstant frekvens och amplitud bakom nätets kortslutningsimpedanser. Spänningarna på strömriktarskenorna inställes till 1,0 p.u. (10V fas-jord) där annat ej anges. Samtliga prov har utförts med frekvensen 60Hz hos bägge AC-näten. Transformatorernas kommuteringsreaktans, d_x , varierades och valt d_x finns angivet för specifik test.

DC-linjen representerades med en enkel resistans för att efterlikna det spänningsfall som alltid förekommer på en DC-linje.



Figur 7

5.3

Definition av svaga nät

Med ett svagt nät i HVDC-sammanhang menar man ett nät dit det överförs stor effekt genom en likströmsöverföring jämfört med nätets kortslutningseffekt. Ett mått på ett näts styrka är kortslutningsförhållandet för nätet, SCR. Kortslutningsförhållandet definieras:

$$\text{SCR} = \frac{S_{sc}}{P_{dN}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_{sc}}{P_{dN}}$$

Ett alternativt mått på nätets styrka ges av det effektiva kortslutningsförhållandet. Det effektiva kortslutningsförhållandet definieras enligt:

$$\text{ESCR} = \frac{S_{sc} - Q_F}{P_{dN}}$$

där Q_F är den installerade reaktiva effekten i AC-filtren.

5.4

Uppmätning av som funktion av AC-spänningen

5.4.1

Tester med oändligt starka nät

I dessa tester kortslöts nätinduktanserna både på likriktar- och växelriktarsidan och fasspänningarna anslöts direkt till respektive strömriktarskena. Kommuteringsreaktansen, d_x , valdes till 8,4%. Under testerna sänktes växelriktarsidans AC-spänning gradvis och intressanta växelriktarstorheter registrerades.

5.4.2

Tester med svaga nät

Testerna utfördes på samma sätt som i föregående fall. Skillnaden var att man i detta fall modellerade impedanser i AC-näten. På växelriktarsidan användes två olika kortslutningseffekter, 16 VA (50 mH) och 13VA (60,5mH). Vid försöken varierades även strömriktartransformatorns d_x och registreringar gjordes för $d_x = 6\%$, 8,4% och 10,8%.

5.5

Tester med trefasfel i växel- och likriktarens AC-nät

Trefasfel simulerades genom att alla tre faserna samtidigt kopplades till jord antingen direkt eller via en impedans. Man studerade sedan uppförandet hos systemet, speciellt när felet inkopplades och urkopplades. Eftersom det här rör sig om fel med kort varaktighet, typiskt några hundra millisekunder, måste förloppen registreras på ett oscilloskop och sedan matas ut på en plotter. I dessa tester har det endast gått att registrera fyra signaler samtidigt. I samtliga fall har signalerna I_d , U_{dio} eller U_d , α och γ valts.

Vid simulering av trefasfel i växelriktarens nät kopplades alla tre faserna till jord via en induktans. Felet inkopplades med ett styrt relä, låg inkopplat under 300 eller 400ms och bortkopplades sedan. Storleken på impedansen och transformatorns d_x varierades från fall till fall och finns angivna på respektive oscillogram.

Då fel i likriktarens nät simulerades, kopplades alla faserna till jord via en impedans på 56,9mH under 200ms. På så sätt uppnåddes en spänningssänkning i likriktaren som ledde till strömreglering i växelriktaren. När felet bortkopplas, erhålles en övergång från strömreglering till predikterad konstant kommuteringsmarginalreglering i växelriktaren och prestanda hos de två prediktorerna registrerades och jämfördes. Samtliga tester med trefasfel i likriktaren är utförda med $d_x = 6\%$.

5.6

Enfasfel i växelriktaren

Enfasfel simulerades på motsvarande sätt som trefasfel. I detta fall kortslöts en av faserna på växelriktarens nät till jord under 75 ms. Speciellt intressant i detta fall är uppstarten av systemet, när felet släpper. Dessa tester är utförda med $d_x = 6\%$.

5.7

Ändring av strömorder

Strömordern till styrsystemet ges som en analog spänning. En strömorder på 4,0V motsvarar 100% av nominell ström. Under dessa test stimulerades positiva och negativa strömordersteg genom att ett momentant tillskott gavs till strömordern under 500ms för att därefter tas bort.

Testerna har utförts med $d_x = 6\%$ och 10,8% och induktansen i växelriktarens nät = 50mH.

6

PRESENTATION AV RESULTAT OCH JÄMFÖRELSE MELLAN SYSTEMEN

6.1

Resultat av inledande tester

Resultatet av de inledande testerna är inritade i diagram 1. Diagrammet återfinnes i Appendix 1.

Man kan i det övre diagrammet se att γ i området kring $I_d=100\%$ minskar linjärt med ökande ström, då $U_{dio}=100\%$. I det nedre diagrammet kan man se att γ kan betraktas som oberoende av spänningen U_{dio} .

De tillfälliga felen i γ antages vara $\pm 0,1^\circ$ vid avläsning. Det absoluta felet i γ uppges vara $\pm 0,5^\circ$. I detta fall saknar det betydelse, eftersom man endast är intresserad av tendensen, och offsetfelet är lika för alla observationspunkter.

6.2

Uppmätning av kortslutningsförhållanden

Uppmätning av kortslutningsförhållanden har skett för de två nät som har använts i växelriktaren, dels ett med induktansen 50mH och dels ett med induktansen 60,5mH. Vid uppmätningen har fyra värden vardera mätts för kortslutningsström respektive nätspänning och de aritmetiska medelvärdena bildas av dem. Den överförda effekten var i båda fallen 8,4W. Polspänningen var 42V och strömmen 200mA. $Q=4,66VA_r$. De uppmätta värdena då $L_{ACnät} = 50mH$ blev:

| $I_{SC,rms}$ | U_{rms} | $I_{SC,rms}$ | U_{rms} |
|--------------|-----------|--------------|-----------|
| mA | V | mA | V |
| 561,1 | 10,09 | 558,4 | 10,07 |
| 556,4 | 10,08 | | |
| 558,0 | 10,10 | | |
| 558,0 | 10,00 | | |

$$ESCR = \frac{3 \cdot 0,5584 \cdot 10,07 - 4,66}{8,4} = 1,45$$

De uppmätta värdena då $L_{ACnät} = 60,5mH$ blev:

| $I_{SC,rms}$ | U_{rms} | $I_{SC,rms}$ | U_{rms} |
|--------------|-----------|--------------|-----------|
| mA | V | mA | V |
| 526,7 | 10,02 | 517,8 | 10,07 |
| 517,4 | 10,09 | | |
| 515,8 | 10,11 | | |
| 511,1 | 10,06 | | |

$$ESCR = \frac{3 \cdot 0,5178 \cdot 10,07 - 4,66}{8,4} = 1,31$$

När olika nät testades, uppnåddes ej stabilitet för nät med högre impedanser än ovan. Tester har därför ej kunnat utföras för svagare nät än med $ESCR=1,31$. Det bör dock noteras att detta kortslutningsförhållande är extremt lågt.

6.3

Uppmätning av γ som funktion av AC-spänningen

6.3.1

Tester med oändligt starka nät

Resultat sist i Appendix 2.

Värdena ovan angivna som lästa från terminal är bildade genom aritmetiska medelvärden av tio värden avrundat till tre gällande siffror för UD och ID. Överlappet är bildat genom medelvärdet av överlappet för de tolv ventilerna. Värdena, som visas på displayen, är de direkt avlästa värdena. Felen i de avlästa vinklarna α och γ är desamma som under inledande tester. Enligt teorin skall summan av α , överlappet och γ vara 180° . I resultatet ovan varierar summan mellan $178,3$ och $179,1^\circ$.

Vid jämförelse mellan systemen konstaterar man direkt att på det modifierade kortet bibehålls γ konstant ner tills man sänkt γ till 60% av U_{dio} , medan det ej modifierade kortet ökar γ betydligt snabbare. Man kan också se att då överföringen ej förmår att upprätthålla strömordern, då spänningen sjunkit under 50% men polströmmen som överförs är större när det modifierade kortet används.

6.3.2

Tester med svaga nät

Resultat återfinns i Appendix 3.

Anledningen till att spänningen på AC-nätet, U_{dio} och I_d , är angiven med en decimal mindre här jämfört med de oändligt starka näten är, att värdena på voltmetern resp displayen inte var helt stabila, och det var omöjligt att uppskatta fler decimaler. De övriga värdena är bildade på samma sätt som för oändligt starka nät.

I samtliga fall ovan är γ intrimmat till 17° vid 100% ström och spänning med testenhet före utförda tester.

Man kan konstatera att i samtliga fall, oberoende av d_x , kan man alltid sänka spänningen på det matade nätet mest när det modifierade kortet används.

Resultatet som har framkommit ovan är helt i överensstämmelse med vad som har sagts i kapitel 2. För den nuvarande areaprediktorn ökas tändvinkeln när spänningen sjunker, så att mer reaktiv effekt drages ur nätet, som medför att nätet blir instabilt tidigare, vilket resultaten ovan bekräftar till fullo.

Även om man på prediktorn styr för att få γ konstant skall här nämnas att egentligen är det α som är intressant. Det är värdet på α som bestämmer hur mycket reaktiv effekt som konvertern konsumerar. Eftersom överlappsvinkeln U måste ökas mer när tändningen sker senare, innebär det att vinsten i α inte blir lika stor som i γ . Skillnaden mellan systemen är dock signifikant bättre för det modifierade systemet jämfört med det andra systemet.

I samband med de svaga näten kan man också notera att överföringen blir instabil för ungefär samma värde på för de olika systemen på 1-2° när. I fallet med dx=6% är α ca 136°, när dx=8,4% är α ca 133° och när dx=10,8% är α ca 130°.

Man kan också lägga märke till att spänningen går att sänka mest då transformatorer med lågt dx används, beroende på att α är störst när lågt dx används. I moderna HVDC-anläggningar används ofta dx=6%. Ett lågt värde på dx betyder att strömmen genom ventilerna blir hög under kommuteringen.

I dessa fall med mätning på tillstånd i stationärt tillstånd med oändligt starka nät och på de svaga näten ger det modifierade kortet klart bäst resultat i samtliga fall med avseende på alla parametrar där skillnad föreligger.

6.4

Trefasfel i växelriktaren

Försök har utförts enligt tabell, som finns i Appendix 4. Motsvarande plotter sitter som nummer 1-8.

Vid jämförelse kan man se att uppförandet kan variera mer från gång till gång än för olika styrsystem. Jämför t ex plot nr 3 och 4 eller plot nr 1 och 6. Man kan till exempel genom att enbart titta på 1 förledas att tro, att det modifierade kortet är bättre. På plot 6 råder det omvända förhållanden. Här ser det modifierade kortet ut att vara sämre än det ej modifierade kortet. På plot nr 3 respektive 4 syns inga större skillnader mellan systemen, men i det förra fallet lyckas överföringen ej stabilisera sig under tiden felet ligger på, men stabilisering hinner ske i det senare fallet.

En anledning till att så stora skillnader kan uppkomma är i vilken fasposition som fel påbörjas resp släppes och den momentana mätningen av transformator kärnan.

På plot nr 2 använder man det svagare nätet med kortslutningsförhållandet 1.31. Man kan konstatera att det synes vara svårare för överföringen att stabilisera sig under felet jämfört med när $L_{\text{nät}}=50\text{mH}$.

6.5

Trefasfel i likriktaren

Då impedansen i likriktaren inkopplas sker en spännings-sänkning i likriktaren från 10,0 Vrms till 7,4 Vrms, sedan jämvikt har uppnåtts. Spänningen i växelriktaren sjunker då till 9,1 Vrms. Då felet utfördes, kunde två olika beteenden observeras oberoende av vilken prediktor som använts. Se plot nr 9 och plot nr 10. Det första beteendet, där kommuteringsfel inte inträffar, är betydligt ovanligare.

Nettoresultatet blir en sänkning med ca 10% av strömmen sedan jämvikt inträtt.

På plot för detta förlopp kan man se, att inregleringen av strömmen sedan felet har släppt är något snabbare, ca 10ms, hos det modifierade systemet. Man måste dock hålla i minnet att det kan vara en tillfällig skillnad i detta fallet. Motsvarande skillnad till det modifierade kortets fördel går även att upptäcka i U_D , α och γ , dvs att det stationära värdet på parametrarna uppnås något snabbare hos det modifierade systemet när felet släpper.

6.6

Enfasfel i växelriktaren

När en av faserna i nätet på växelriktarsidan kortsluts, stiger samtidigt spänningen i de bägge andra faserna till $2 \cdot 20,2 V_{tt}$, men spänningarna är distroerade och inte rena sinusspänningar.

Kortslutning av faserna utfördes med två olika nät, dels med induktansen 50mH, dels med induktansen 60,5mH. Då plotterna för dem studeras, se plot nr 11 och plot nr 12, kan man se att det inte är några större skillnader. En skillnad är dock i uppstarten, då felet släpper. I fallet med induktansen 50mH är återgången ca 30ms snabbare, och med induktansen 60,5mH ca 20 ms snabbare för det modifierade kortet jämfört med det ej modifierade.

Under tiden som enfasfelet ligger på i växelriktaren, ligger U_D och svänger kring 0V, dvs effektöverföringen upphör i princip då en av faserna faller ifrån. Samtidigt kan man se att variationerna i α är mindre, och att γ lägger på ett konstant värde i det modifierade systemet, medan felet ligger på.

På samma sätt som för strömmen sker återgången snabbare för de övriga parametrarna till stationärt värde när felet släpper.

6.7

Ändring av strömorder

Försök har utförts enligt tabell som finns i Appendix 5. Motsvarande plotter sitter som nummer 13-21.

Strömorderändringen $90 \rightarrow 0\%$ och $0 \rightarrow 90\%$ har utförts vid förhöjd AC-nätspänning till ca 10,5V, då $dx=6\%$. Anledningen är ett förbiseende, ty när strömöverföringen minskar, stiger nätspänningen, och korrektion för detta har inte skett när förhöjd spänning råder i plot nr 15 och plot nr 20.

Man ser att för det ej modifierade systemet blir det en topp i strömmen, men under kort tid. Då strömordern återgår till 100%, kan ingen egentlig skillnad upptäckas mellan de två korten. I plot nr 18 ser man att sedan jämvikt för systemet råder, ligger γ på en något högre nivå i det ej modifierade systemet.

Vid jämförelse mellan systemen uppstår ingen signifikant skillnad mellan systemen, då strömordern ändras från 100 till 90% och tillbaka igen, dvs i plot 13 och plot 17. I plot 14 ser man att α minskar mer hos det modifierade kortet jämfört med det ej modifierade, men det sker under så kort tid att det inte ger utslag i de övriga parametrarna.

På plot 15, där strömordern minskas till 0%, ser man att det modifierade klarar förändringen bättre med mindre ringning i α och γ och två istället för tre toppar på strömmen. Noterbart i detta sammanhang är också, att då strömorder 0 ges, överför systemet 10% av normalströmmen, helt enligt vad som är avsett. I motsvarande fall på plot 19 är förhållandena de omvända. Här dröjer det längre tid, och det förekommer mer oscillationer i polströmmen i det modifierade systemet. På samma gång blir det långsammare inreglering och mer oscillationer i α och γ . Samma beteende kan observeras på plot nr 20. Vid jämförelse mellan plot 19 och plot 20 ser man, att i plot 20 sker inregleringen av parametrarna snabbare, eftersom spänningen är högre i nätet och nätet blir inte lika svagt.

På plottorna i fall 16 och 21 ser man, att då strömordern ökar till 120 respektive 130% klarar det modifierade kortet att stabilisera vid denna strömorder, medan de andra ej modifierade korten ej klarar detta.

Det syns dock att det tar lång tid för det modifierade systemet att stabilisera. Speciellt märkbart är detta för γ . γ ligger länge och svänger kring sitt värde innan det blir stabilt.

Resultaten ovan skall framförallt framhävas. Dessa visar ganska tydligt att betydande skillnader uppnås till det modifierade kortets fördel när man höjer strömordern från 100%. Det är mest uppenbart vid höjning av strömordern till 120 resp 130%, men även i plot 14 och 18 ser man att det modifierade kortet ger bättre resultat och i 18 utan kommuteringsfel.

SAMMANFATTNING

De prov som har gjorts ger inte ett helt entydigt besked huruvida den nya modifierade vinkelprediktorn eller den gamla ej modifierade areaprediktorn är att föredra. Man kan i princip indela proven i statiska och dynamiska prov. De statiska proven har bestått i uppmätning av γ som funktion av AC-spänningen. Man jämför sedan skillnaden mellan system efter det stationäritet har inställt sig.

Systemens dynamiska egenskaper i samband med fel i växelströmsnäten och vid stegändringar i strömordern har jämförts. De dynamiska proven har utförts för att studera systemets uppförande i det ögonblick som ett fel introduceras eller släpper o dyl. Dessa förlopp är snabba och måste därför plottas för att detaljstuderas i efterhand.

De statiska proven pekar entydigt mot att vissa förbättringar kan uppnås med konstant γ -reglering i samband med svaga nät. Proven har visat att man kan sänka spänningen mer på näten eftersom γ inte ökar lika mycket som vid konstant areareglering. Detta betyder att reaktiv effekt konsumeras.

De dynamiska proven ger ej några helt entydiga resultat. I den mån skillnader existerar mellan systemen, är de oftast små och indikerar ibland att det omodifierade, ibland det modifierade systemet är bättre. Vissa indikationer tyder dock på att det modifierade systemet är något bättre i samband med återstarter efter fel. Återgång till stationär drift sker något snabbare med det modifierade systemet. Jämför avsnitten 6.5 och 6.6.

De enda prov som visar betydande skillnader mellan systemen är när steg ges i strömordern. Dessa prov visar att förbättringar uppnås med den modifierade principen för kommutering. Systemet kan ges större ökning av ström utan att överföringen blir instabil. I de fall när bägge systemen klarar att uppnå stationaritet sker det snabbare i det modifierade systemet. Även kommuteringsfelsfrekvensen blir lägre med det modifierade systemet.

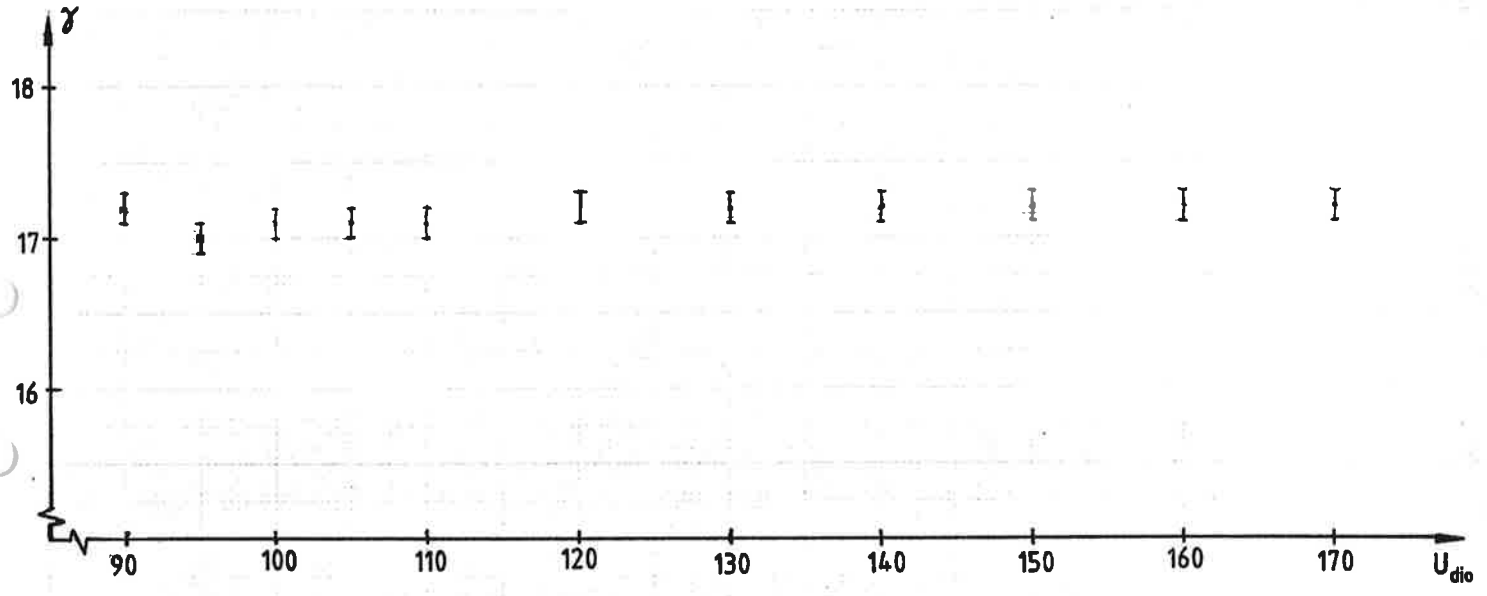
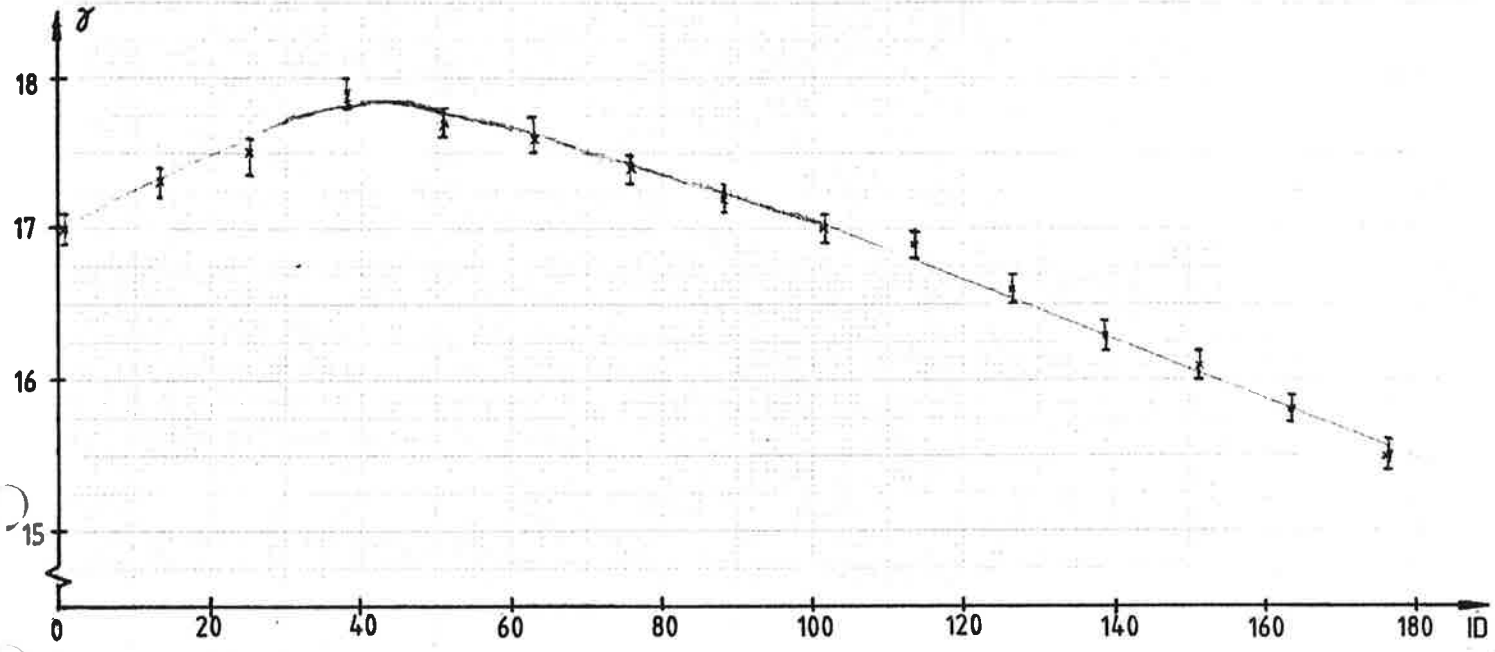
Innan definitivt ställning tas till vilket system som bör användas i fortsättningen, bör nog ytterligare undersökningar utföras. Proven ger vissa indikationer på att det modifierade systemet har något bättre prestanda vid svaga nät.

1.5.1.1

$$\gamma = f(ID); U_{dio} = 100\%$$

Diagram 1

$$\gamma = f(U_{dio}); I_d = 100\%$$



TESTER MED OÄNDLIGT STARKA NÄT

Resultat modifierat kort

| U_d terminal | Spänning AC-nät | U_{dio} V display | I_d display | I_d terminal | α display | Överlapp terminal | γ display |
|-------------------|--------------------|------------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| -1070 | 9,98 | -100,0 | 100,0 | 1000 | 141,3 | 20,4 | 17,1 |
| - 960 | 8,98 | - 90,0 | 100,0 | 990 | 139,5 | 22,1 | 17,1 |
| - 850 | 7,97 | - 80,0 | 100,0 | 990 | 137,6 | 24,0 | 17,1 |
| - 740 | 6,97 | - 70,0 | 100,0 | 1000 | 135,3 | 26,6 | 16,9 |
| - 630 | 5,97 | - 60,0 | 100,0 | 1000 | 132,2 | 29,5 | 16,9 |
| - 520 | 4,97 | - 50,0 | 100,0 | 990 | 127,9 | 33,1 | 17,6 |
| - 420 | 3,98 | - 40,0 | 83,0 | 820 | 126,5 | 33,4 | 18,7 |
| - 310 | 2,98 | - 30,0 | 62,0 | 610 | 126,3 | 32,3 | 20,1 |
| - 210 | 1,98 | - 20,0 | 41,0 | 400 | 125,6 | 30,1 | 23,3 |

Resultat ej modifierat kort

| U_d terminal | Spänning AC-nät | U_{dio} V display | I_d display | I_d terminal | α display | Överlapp terminal | γ display |
|-------------------|--------------------|------------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| -1070 | 9,98 | -100,0 | 100,0 | 1000 | 141,3 | 20,4 | 17,0 |
| - 960 | 8,98 | - 90,0 | 100,0 | 990 | 139,5 | 22,3 | 17,1 |
| - 850 | 7,98 | - 80,0 | 100,0 | 990 | 137,2 | 23,4 | 17,9 |
| - 740 | 6,97 | - 70,0 | 100,0 | 1000 | 134,2 | 25,4 | 19,1 |
| - 620 | 5,97 | - 60,0 | 100,0 | 1000 | 130,6 | 27,2 | 20,7 |
| - 510 | 4,97 | - 50,0 | 100,0 | 990 | 125,6 | 30,1 | 22,7 |
| - 400 | 3,97 | - 40,0 | 79,7 | 790 | 125,0 | 29,3 | 24,3 |
| - 300 | 2,98 | - 30,0 | 59,3 | 590 | 124,5 | 27,9 | 25,9 |
| - 190 | 1,99 | - 20,0 | 39,0 | 370 | 122,8 | 25,3 | 30,2 |

TESTER MED SVAGA NÄT

Resultat modifierat kort och dx = 6%.

| U_d | Spänning | U_{dio} | I_d | α | Överlapp | γ |
|----------|----------|-----------|---------|----------|----------|------------------|
| terminal | AC-nät | V display | display | terminal | display | terminal display |
| -1100 | 10,0 | -100 | 102 | 1010 | 144,5 | 17,9 16,3 |
| - 980 | 9,0 | - 90 | 102 | 1000 | 143,2 | 19,5 16,2 |
| - 870 | 8,0 | - 80 | 102 | 1010 | 141,6 | 21,3 15,8 |
| - 770 | 7,0 | - 70 | 102 | 1010 | 139,6 | 23,6 15,7 |
| - 720 | 6,5 | - 65 | 102 | 1010 | 138,2 | 25,0 15,5 |
| - 660 | 6,0 | - 60 | 102 | 1010 | 136,9 | 26,4 15,4 |

När spänningen på AC-nätet i växelriktaren sänkes under ca 5,5V, blir överföringen instabil.

Resultat ej modifierat kort och dx=6%

| U_d | Spänning | U_{dio} | I_d | α | Överlapp | γ |
|----------|----------|-----------|---------|----------|----------|------------------|
| terminal | AC-nät | V display | display | terminal | display | terminal display |
| -1090 | 10,0 | -100 | 102 | 1010 | 144,6 | 18,0 16,3 |
| - 990 | 9,0 | - 90 | 102 | 1020 | 143,0 | 19,5 16,6 |
| - 870 | 8,0 | - 80 | 102 | 1000 | 141,1 | 20,9 16,9 |
| - 760 | 7,0 | - 70 | 102 | 1010 | 138,3 | 22,5 17,9 |
| - 700 | 6,5 | - 65 | 102 | 1010 | 136,2 | 24,2 18,9 |

När spänningen på AC-nätet i växelriktaren sänkes under ca 6,4V, blir överföringen instabil.

Resultat modifierat kort och $dx=8,4\%$

| U_d terminal | Spänning AC-nät | U_{dio} V display | I_d display | I_d terminal | α display | Överlapp terminal | γ display |
|-------------------|--------------------|------------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| -1070 | 10,0 | -100 | 102 | 1010 | 140,8 | 21,2 | 16,6 |
| - 970 | 9,0 | - 90 | 102 | 1010 | 139,1 | 23,1 | 16,5 |
| - 860 | 8,0 | - 80 | 102 | 1000 | 137,1 | 25,2 | 16,4 |
| - 750 | 7,0 | - 70 | 102 | 1010 | 134,8 | 27,6 | 16,3 |
| - 690 | 6,5 | - 65 | 102 | 1010 | 133,3 | 28,8 | 16,3 |

När spänningen på AC-nätet i växelriktaren sänkes under ca 6,4V, blir överföringen instabil.

Resultat ej modifierat kort och $dx=8,4\%$

| U_d terminal | Spänning AC-nät | U_{dio} V display | I_d display | I_d terminal | α display | Överlapp terminal | γ display |
|-------------------|--------------------|------------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| -1080 | 10,0 | -100 | 102 | 1010 | 140,8 | 21,5 | 16,6 |
| - 960 | 9,0 | - 90 | 102 | 1010 | 138,9 | 23,1 | 16,8 |
| - 860 | 8,0 | - 80 | 102 | 1010 | 136,6 | 24,4 | 17,6 |
| - 730 | 7,0 | - 70 | 102 | 1010 | 133,5 | 26,2 | 19,0 |
| - 700 | 6,6 | - 66 | 102 | 1000 | 132,0 | 26,8 | 19,9 |

Överföringen blir instabil när spänningen sänkes under ca 6,6V.

APPENDIX 3
Blad 3

Resultat modifierat kort och $dx = 10,8\%$.

| U_d terminal | Spänning AC-nät | U_{dio} V display | I_d display | I_d terminal | α display | Överlapp terminal | γ display |
|-------------------|--------------------|------------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| -1050 | 10,0 | -100 | 100 | 990 | 136,1 | 25,6 | 16,9 |
| - 940 | 9,0 | - 90 | 100 | 990 | 134,3 | 27,2 | 17,0 |
| - 830 | 8,0 | - 80 | 100 | 990 | 131,8 | 29,7 | 17,1 |
| - 720 | 7,0 | - 70 | 100 | 990 | 128,4 | 32,4 | 17,3 |

Överföringen blir instabil när spänningen sänkes under ca 6,9V.

Resultat ej modifierat kort och $dx = 10,8\%$.

| U_d terminal | Spänning AC-nät | U_{dio} V display | I_d display | I_d terminal | α display | Överlapp terminal | γ display |
|-------------------|--------------------|------------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| -1040 | 10,0 | -100 | 100 | 990 | 136,2 | 25,6 | 17,0 |
| - 930 | 9,0 | - 90 | 100 | 990 | 133,9 | 27,2 | 17,6 |
| - 820 | 8,0 | - 80 | 100 | 980 | 131,2 | 28,8 | 18,6 |
| - 750 | 7,5 | - 75 | 100 | 980 | 129,4 | 30,1 | 19,4 |

Överföringen blir instabil när spänningen sänkes under ca 7,3V.

TREFASFEL I VÄXELRIKTAREN

$L_{SC} = 150 \text{ mH}$ $dx=6\%$ $L_{\text{nät}}=50 \text{ mH}$ Kortslutning till jord
 $dx=8,4\%$; $L_{\text{nät}}=60,5 \text{ mH}$

| | | | | |
|-----------------|---------|---------|-----------------|---------|
| Modifierat kort | Plot 3a | Plot 4a | Modifierat kort | Plot 8a |
|-----------------|---------|---------|-----------------|---------|

| | | | | |
|--------------------|---------|---------|--------------------|---------|
| Ej modifierat kort | Plot 3b | Plot 4b | Ej modifierat kort | Plot 8b |
|--------------------|---------|---------|--------------------|---------|

$L_{SC}=150 \text{ mH}$ $dx=8,4\%$

$L_{\text{nät}}=50 \text{ mH}$ $L_{\text{nät}} = 60,5 \text{ mH}$

| | | |
|-----------------|---------|---------|
| Modifierat kort | Plot 1a | Plot 2a |
|-----------------|---------|---------|

| | | |
|--------------------|---------|---------|
| Ej modifierat kort | Plot 1b | Plot 2b |
|--------------------|---------|---------|

$dx=8,4\%$ $L_{\text{nät}}=50 \text{ mH}$

$L_{SC}=50\text{mH}$ $L_{SC}=150\text{mH}$ $L_{SC}=200\text{mH}$

| | | | |
|-----------------|---------|---------|---------|
| Modifierat kort | Plot 5a | Plot 6a | Plot 7a |
|-----------------|---------|---------|---------|

| | | | |
|--------------------|---------|---------|---------|
| Ej modifierat kort | Plot 5b | Plot 6b | Plot 7b |
|--------------------|---------|---------|---------|

ÄNDRING AV STRÖMORDER
 $dx=10,8\%; \quad L_{\text{nät}}=50 \text{ mH}$

| | | | | |
|--------------------|----------|----------|---------------------|----------|
| | 100→90% | 100→110% | 90→0% | 100-120% |
| I ₀ | 90→100% | 110→100% | 0→90% | 120-100% |
| | | | förhöjd spänning | |
| Modifierat kort | Plot 13a | Plot 14a | Plot 15a | Plot 16a |
| Ej modifierat kort | Plot 13b | Plot 14b | Plot 15b | Plot 16b |

 $dx=6\%; \quad L_{\text{nät}}=50 \text{ mH}$

| | | | | | |
|--------------------|----------|----------|----------|---------------------|----------|
| | 100→90% | 100→110% | 90→0% | 90→0% | 100→130% |
| I ₀ | 90→100% | 110→100% | 0→90% | 0→90% | 130→100% |
| | | | | förhöjd spänning | |
| Modifierat kort | Plot 17a | Plot 18a | Plot 19a | Plot 20A | Plot 21a |
| Ej Modifierat kort | Plot 17b | Plot 18b | Plot 19b | Plot 20b | Plot 21b |

HÄRLEDNING AV FELET I AREAPREDIKTORN

Den totala verkliga arean är:

$$A_{\text{tot}} = \int_0^{T_1} \hat{U} \sin \omega t \, dt = \hat{U} \frac{1}{\omega} \left[-\cos \omega t \right]_0^{T_1} = \frac{\hat{U} T_1}{2\pi} (\cos \omega T_1) = \frac{\hat{U} T_1}{2\pi} \left(1 - \left(1 - \frac{(\omega T_1)^2}{2} + \frac{(T_1)^4}{24} - \dots \right) \right) =$$

$$= \frac{\hat{U} T_1}{2\pi} \left(\frac{(\omega T_1)^2}{2} - \frac{(\omega T_1)^4}{24} + \dots \right) = \frac{\hat{U} T_1}{2\pi} \left(\left(\frac{2\pi T_1}{T} \right)^2 - \frac{\left(\frac{2\pi T_1}{T} \right)^4}{24} + \dots \right)$$

Den predikterade totala arean:

$$A_{\text{tot pred}} = K_1 \cdot U_1 \cdot T_1 = K_1 \cdot \hat{U} \cdot \sin \omega T_1 = K_1 T_1 \hat{U} \left(\omega T_1 - \frac{(\omega T_1)^3}{6} + \dots \right)$$

$$K_1 T_1 \hat{U} \frac{\omega T_1}{2\pi} \left(\omega T_1 - \frac{(\omega T_1)^3}{6} + \dots \right) = \frac{K_1 U T_1}{2\pi} \left((\omega T_1)^2 - \frac{(\omega T_1)^4}{6} + \dots \right) \text{ och då } K_1 = 0,5$$

$$A_{\text{tot pred}} = \frac{\hat{U} T_1}{2\pi} \left(\frac{(\omega T_1)^2}{2} - \frac{(\omega T_1)^4}{12} + \dots \right) = \frac{\hat{U} T_1}{2} \left(\left(\frac{2\pi T_1}{T} \right)^2 - \frac{\left(\frac{2\pi T_1}{T} \right)^4}{12} + \dots \right)$$

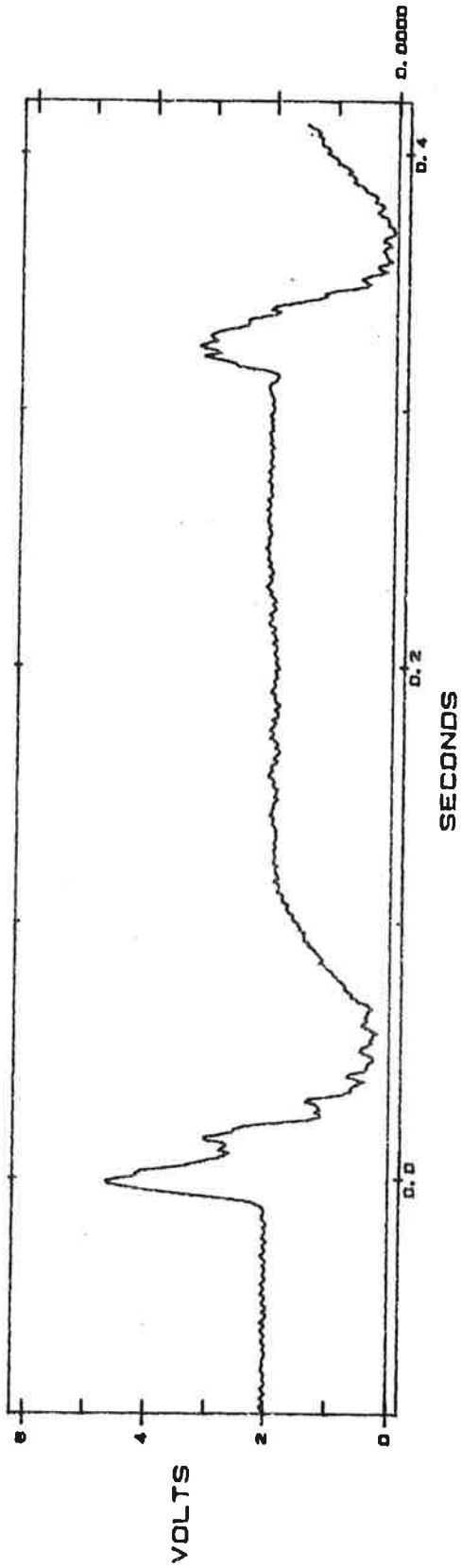
T_1 = återstående tid till nollgenomgången, T = periodtiden,
 ω = vinkelfrekvensen = $\frac{2\pi}{T}$.

När arean börjar prediktera är det approximativt 70° till nollgenomgången (överlappet + δ + 30°) och $\frac{T_1}{T_4} = \frac{70}{360}$.

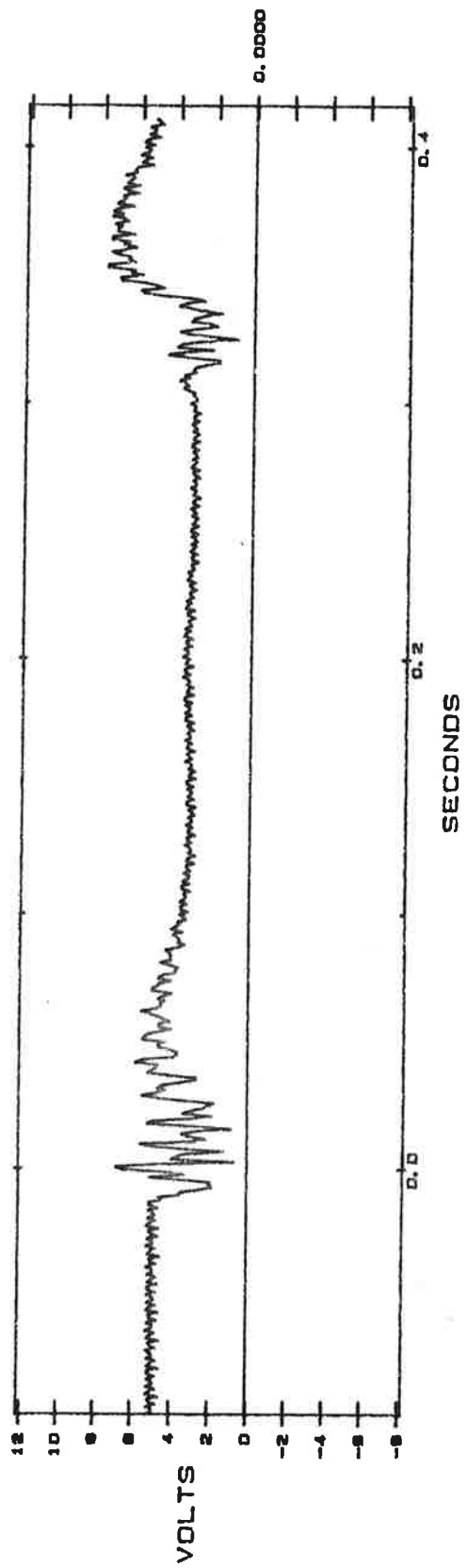
I detta ögonblick är det relativa felet ungefär 0,1 och det minskar sedan successivt.

Modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
Kortslutning till jord via 150 mH.
AC fel = 300 ms
 $dx = 8.4 \%$

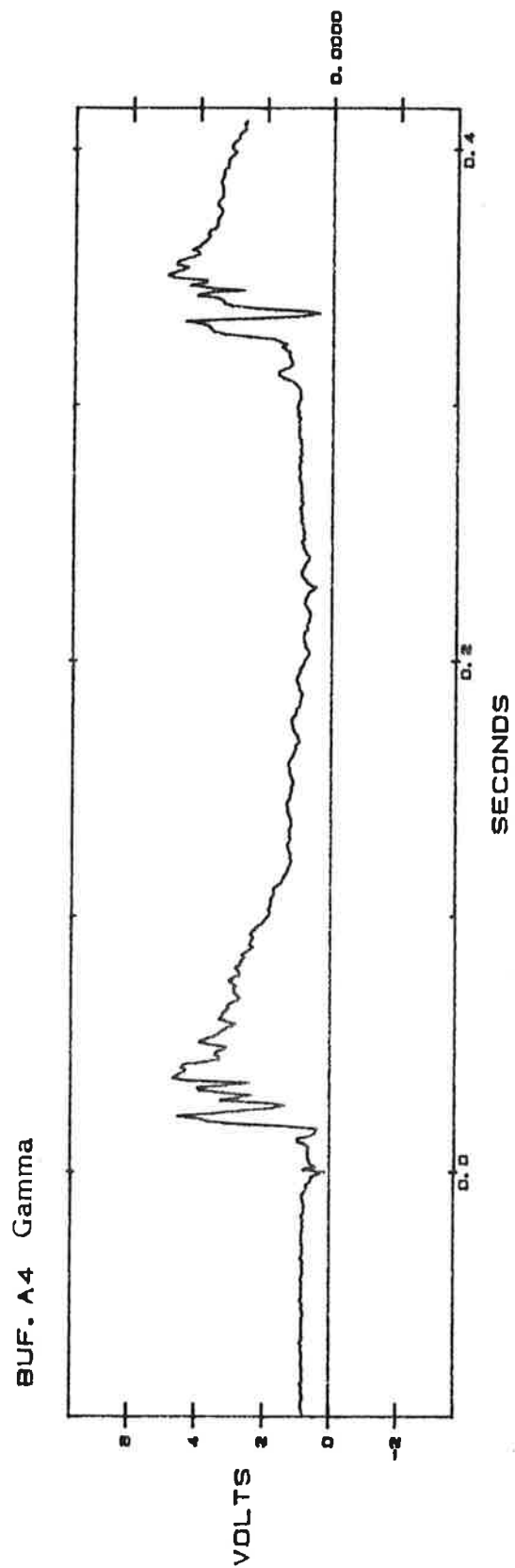
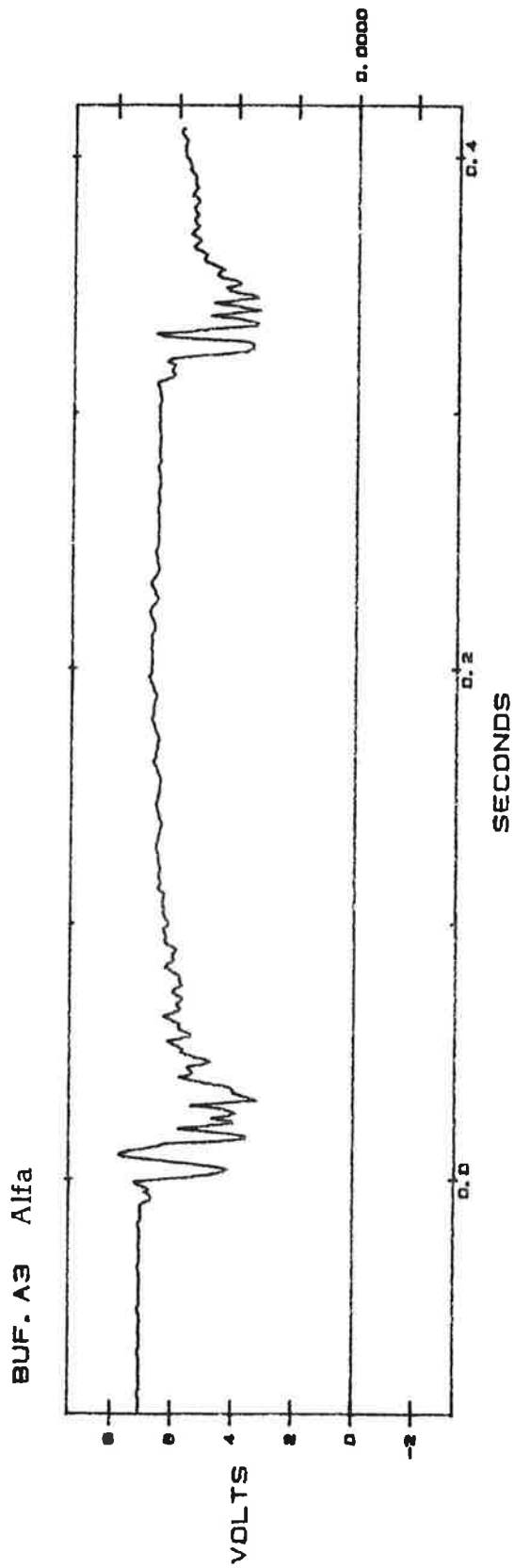
BUF. A1 Id pole



BUF. A2 UDIO

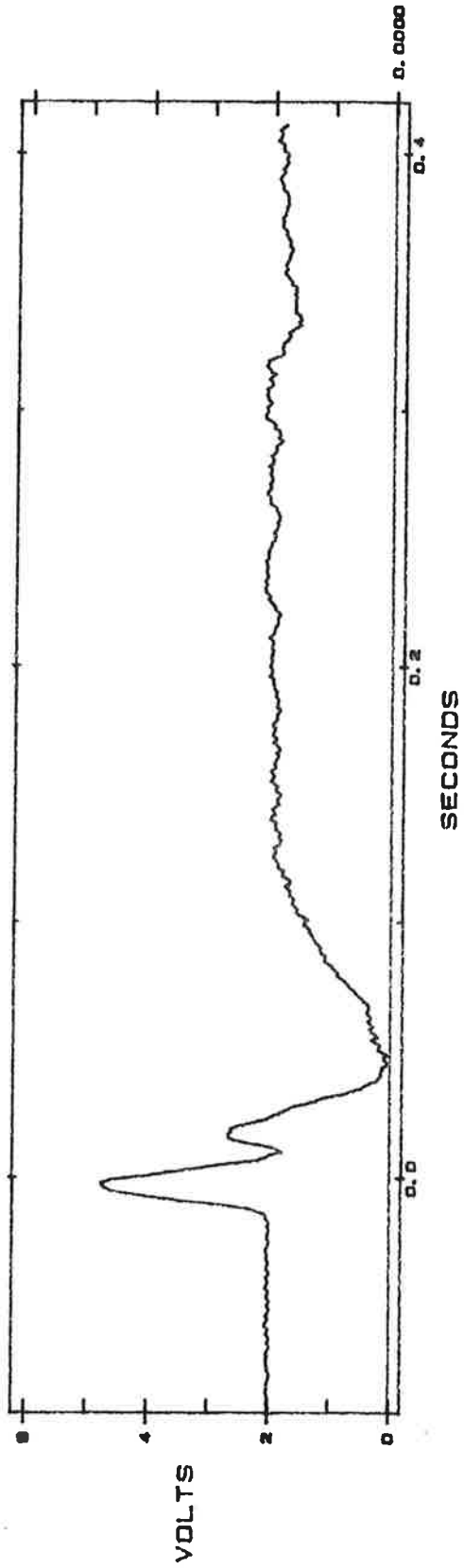


Modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
Kortslutning till jord via 150 mH
AC fel = 300 ms
 $dx = 8.4 \%$

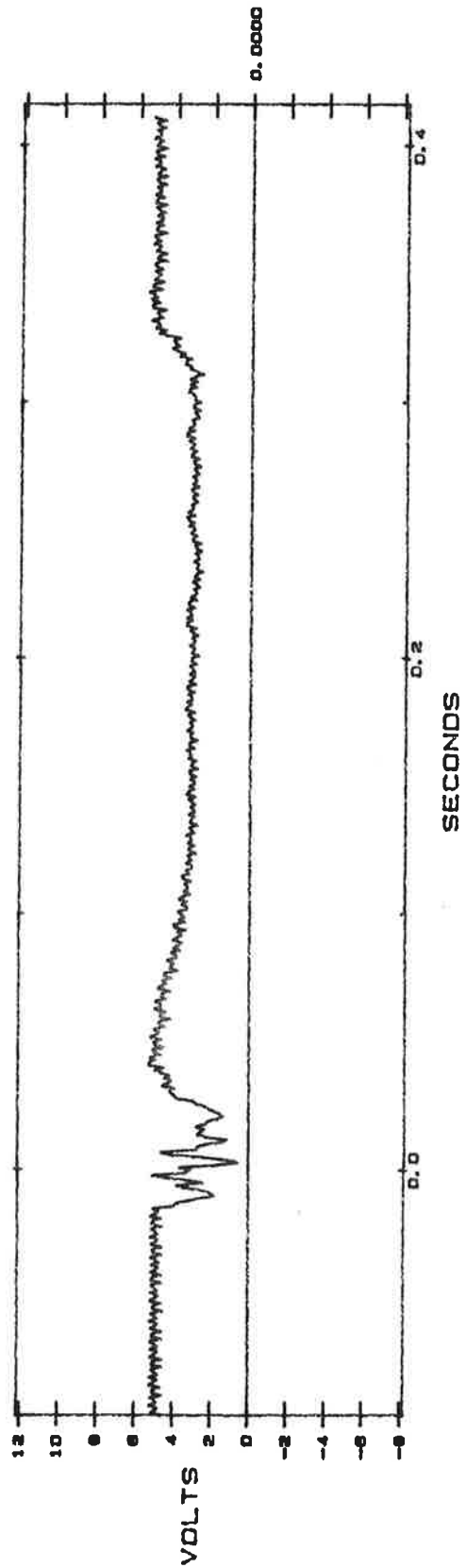


Ej modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 Kortslutning till jord via 150 mH
 AC fel = 300 ms
 dx = 8.4 %

BUF. A1 Id pole

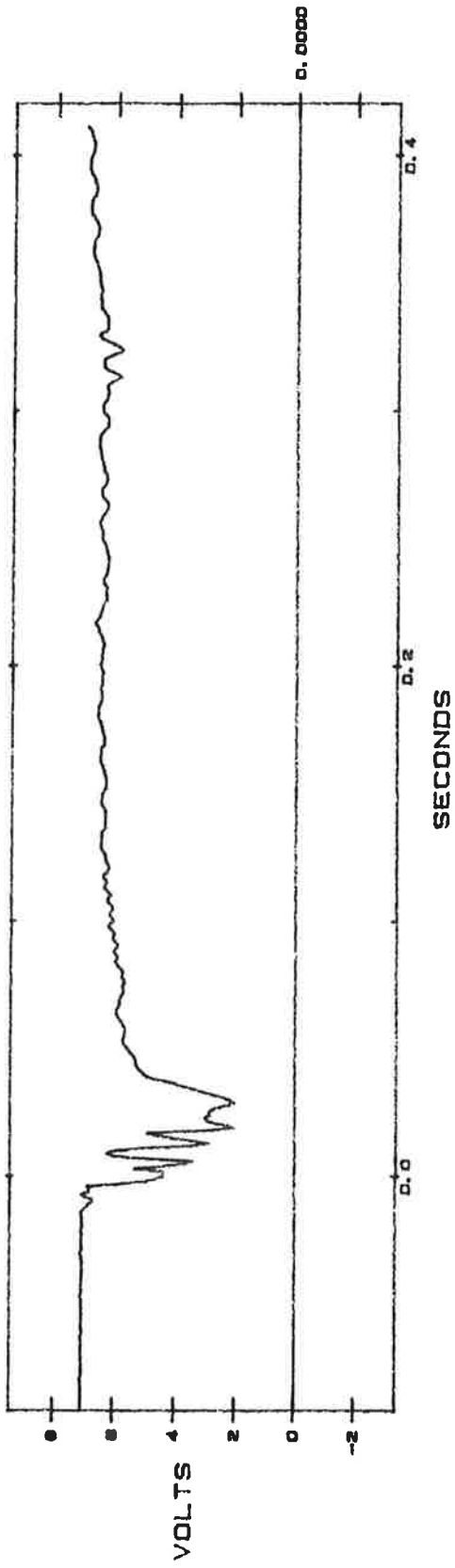


BUF. A2 UDIO

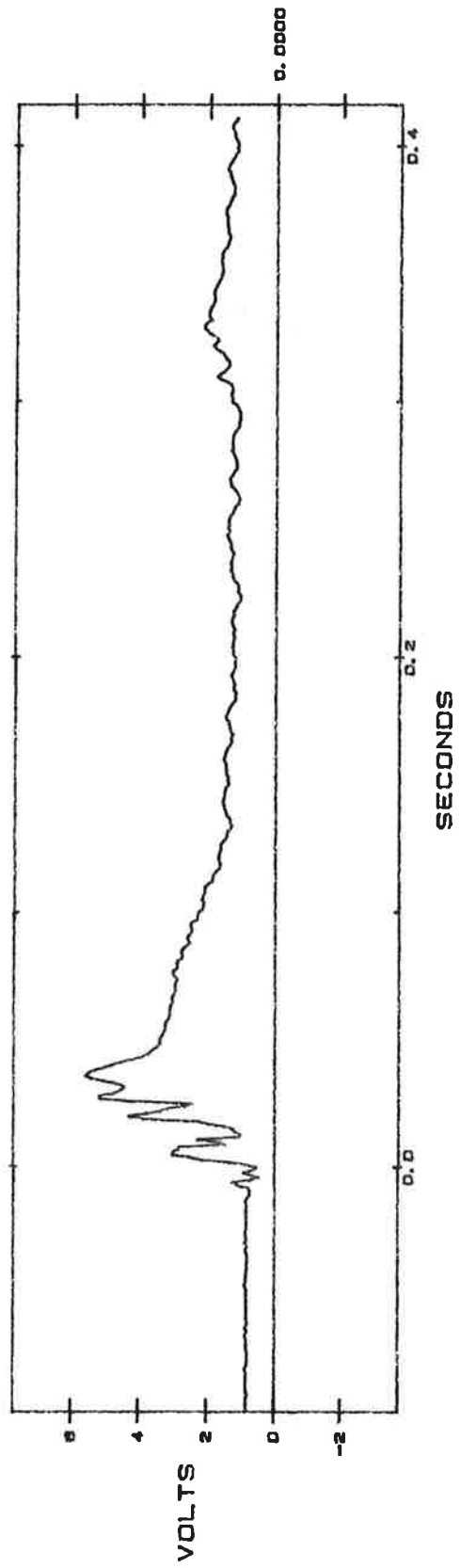


Ej modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
Kortslutning till jord via 150 mH
AC fel = 300 ms
 $dx = 8.4 \%$

BUF. A3 Alfa



BUF. A4 Gamma



Modifierat kort

Plot 2a

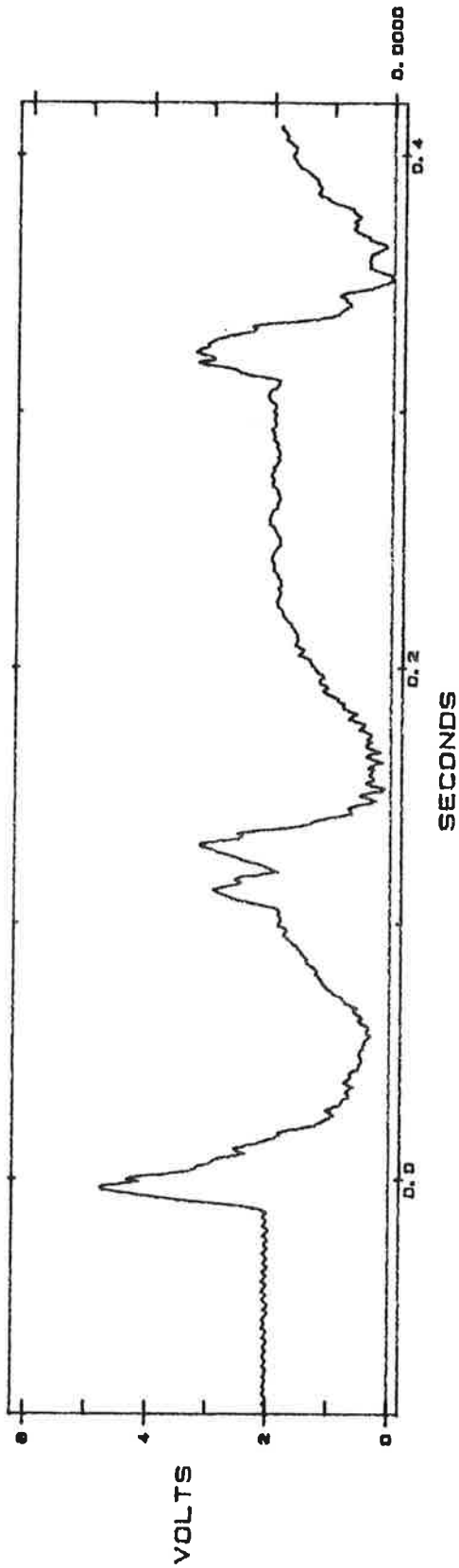
$L_{\text{nät}} = 60,5 \text{ mH}$

Kortslutning till jord via 150 mH

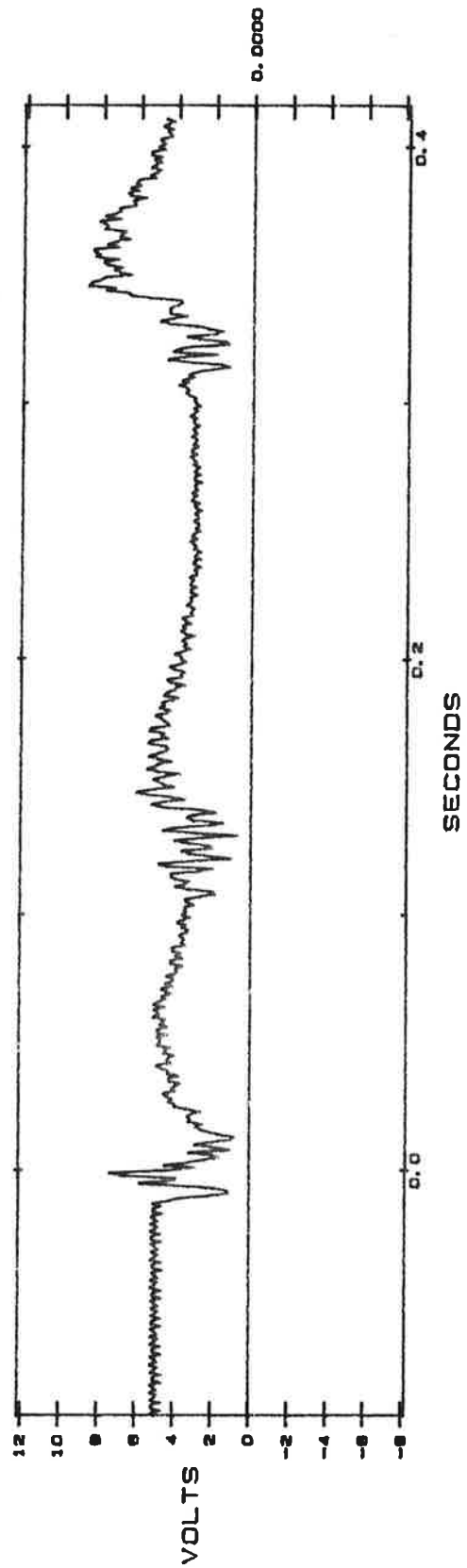
AC fel = 300 ms

$dx = 8.4 \%$

BUF. A1 Id pole



BUF. A2 UDIO



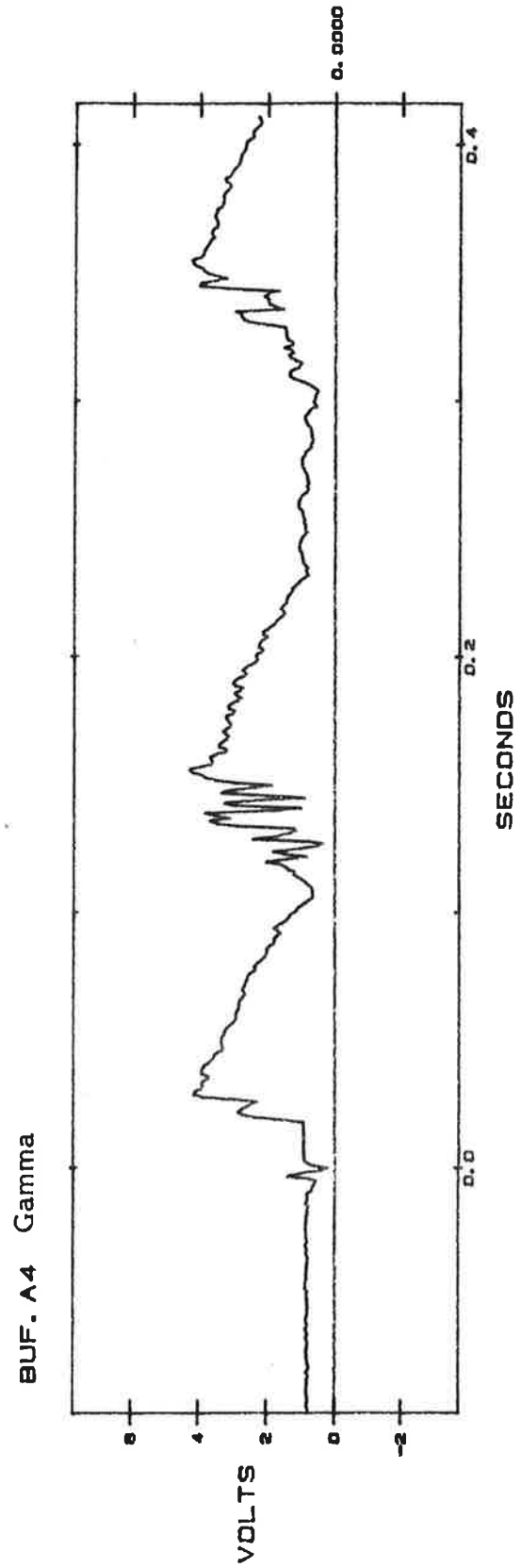
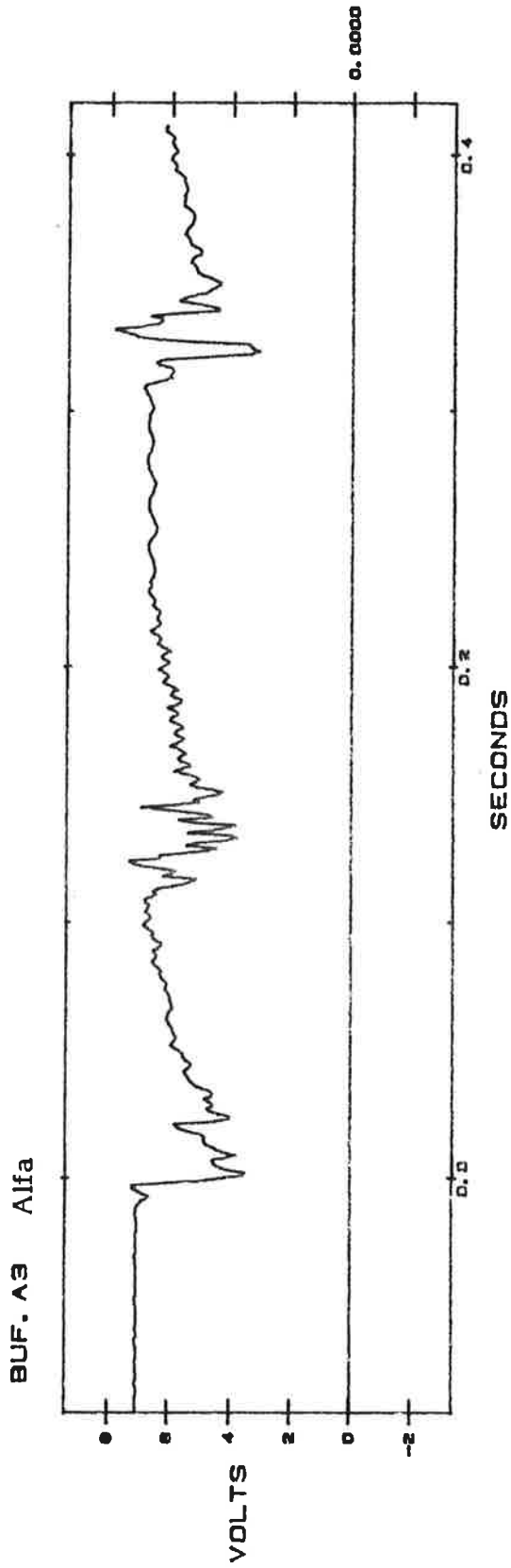
Modifierat kort

$L_{\text{nät}} = 60,5 \text{ mH}$

Kortslutning till jord via 150 mH

AC fel = 300 ms

$dx = 8.4 \%$



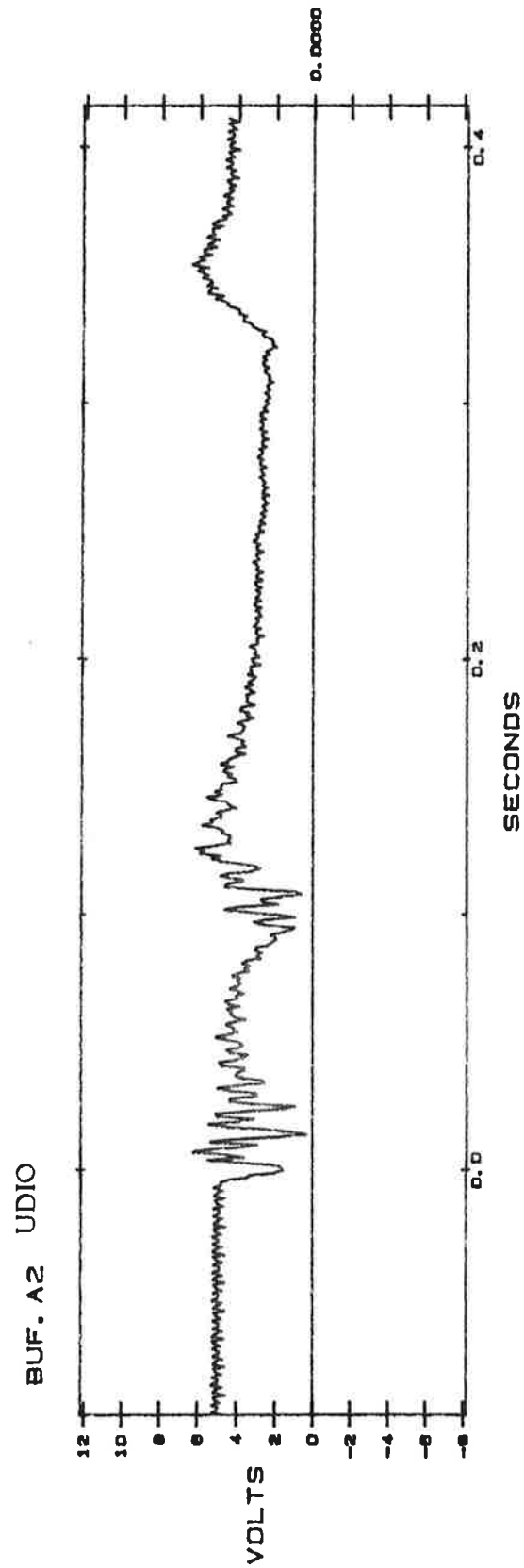
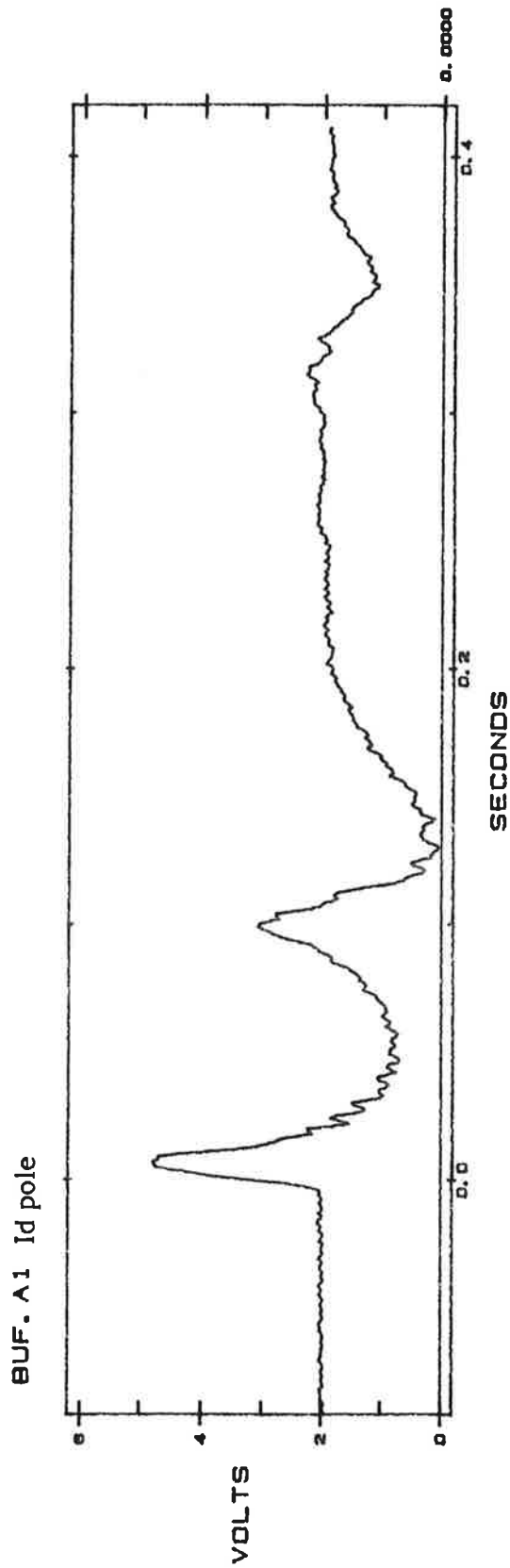
Ej modifierat kort

$L_{\text{nät}} = 60,5 \text{ mH}$

Kortslutning till jord via 150 mH

AC fel = 300 ms

$dx = 8.4 \%$



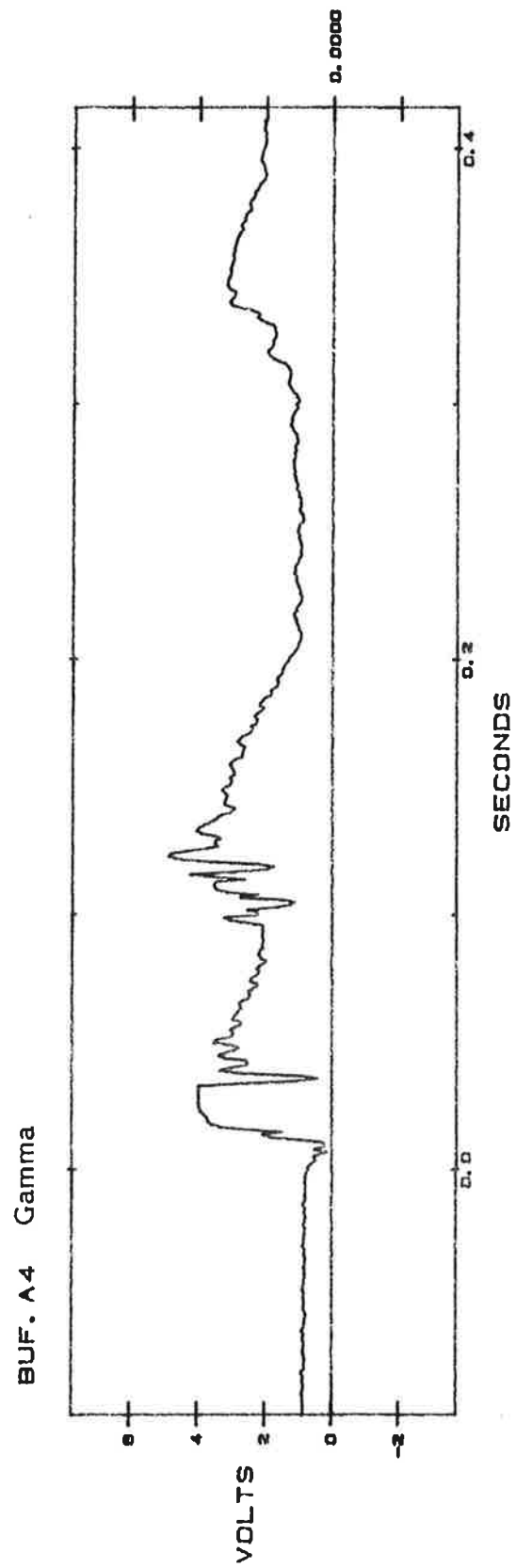
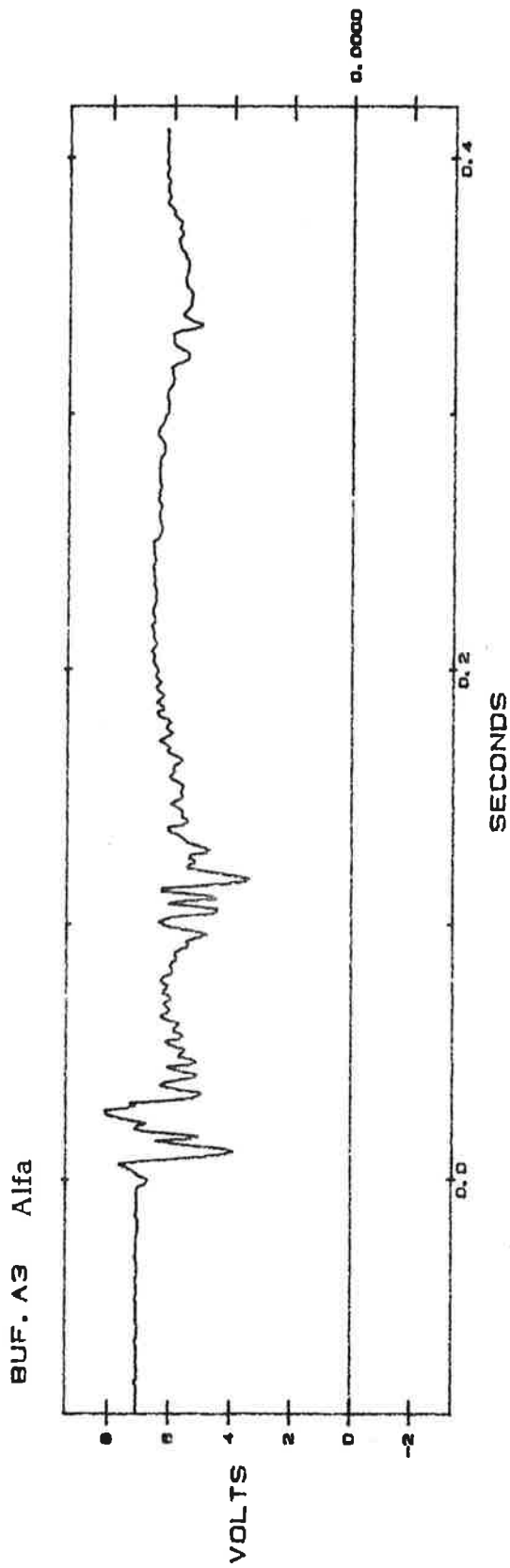
Ej modifierat kort

 $L_{\text{nät}} = 60,5 \text{ mH}$

Kortslutning till jord via 150 mH

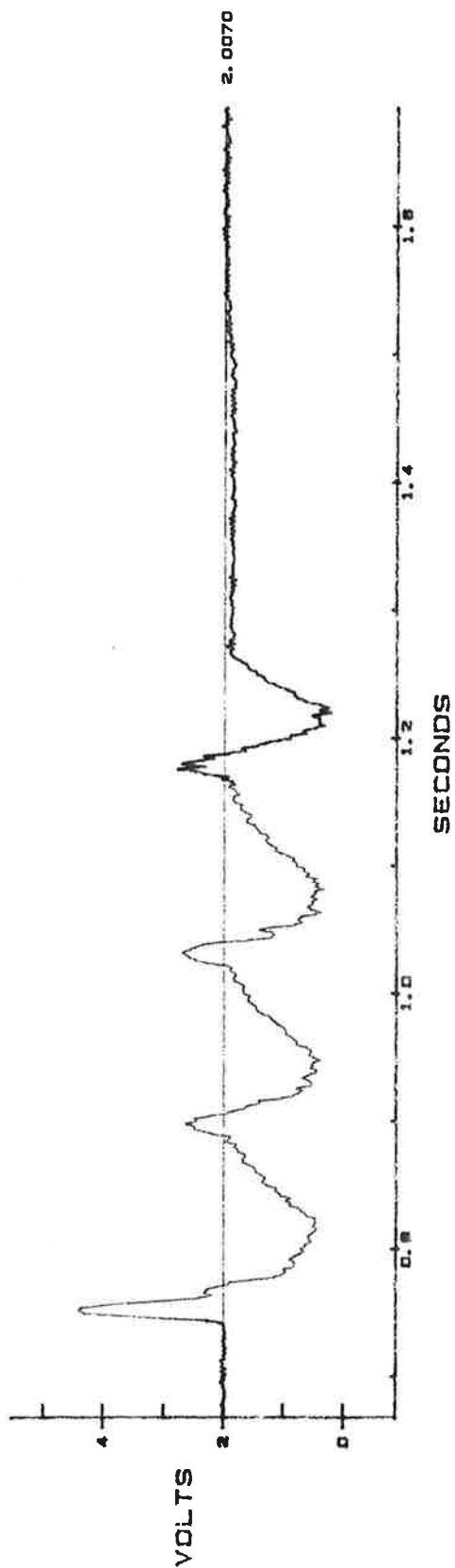
AC fel = 300 ms

dx = 8.4 %

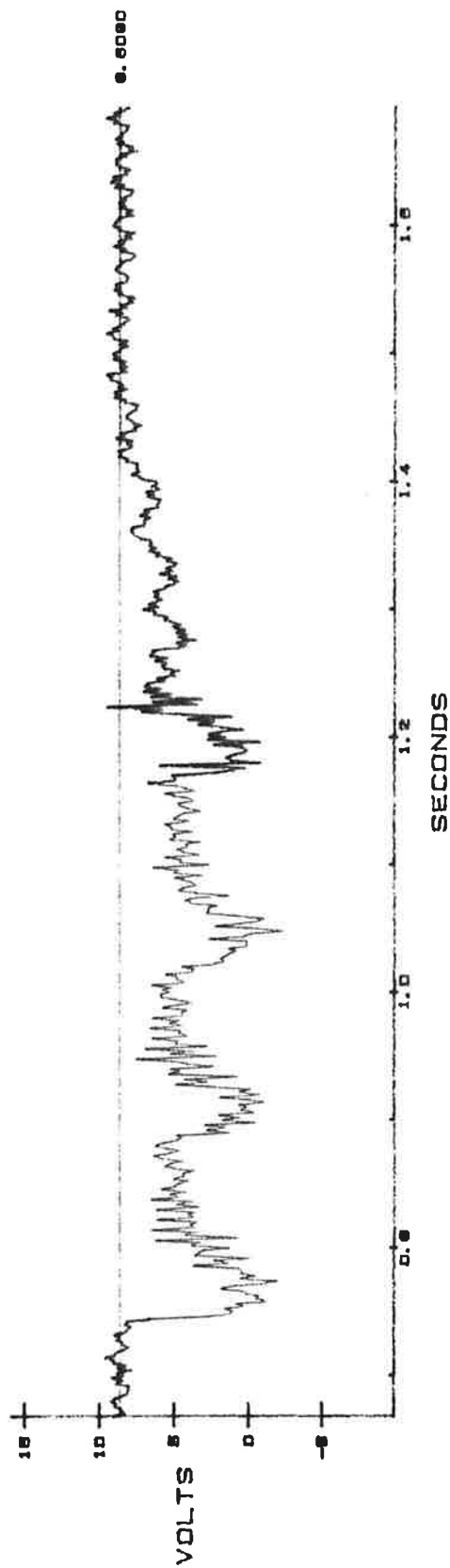


Modifierat kort
Kortslutning till jord via 150 mH
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Plot 1
Feltid = 400 ms

BUF. A1 Id pole



BUF. A2 UD



Modifierat kort

Kortslutning till jord via 150 mH

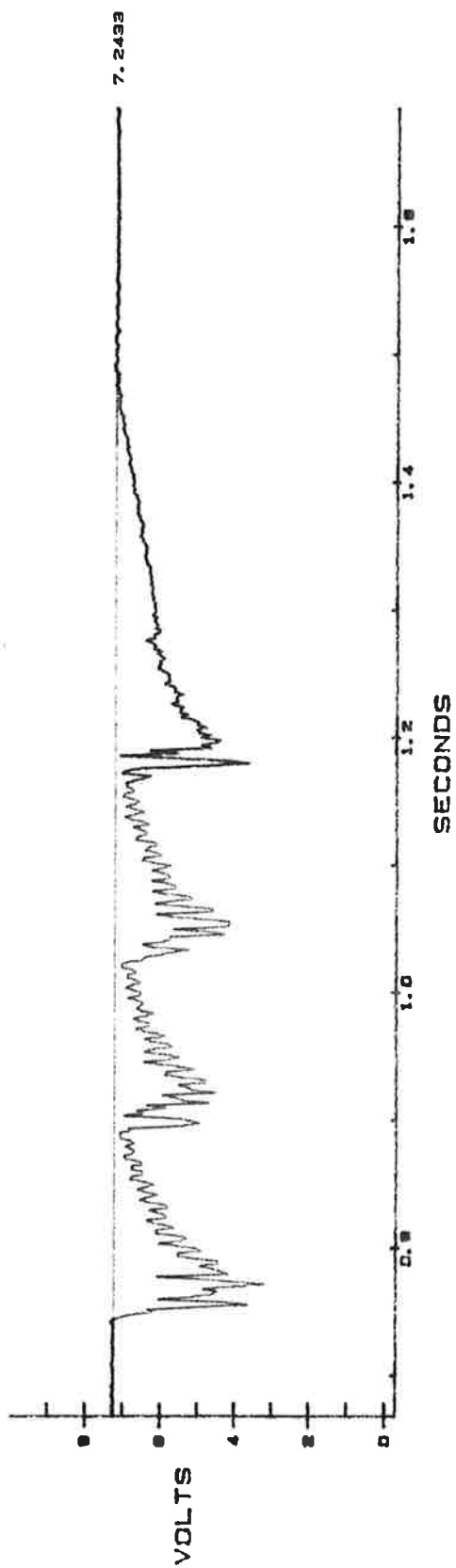
$L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$

$dx = 6 \%$

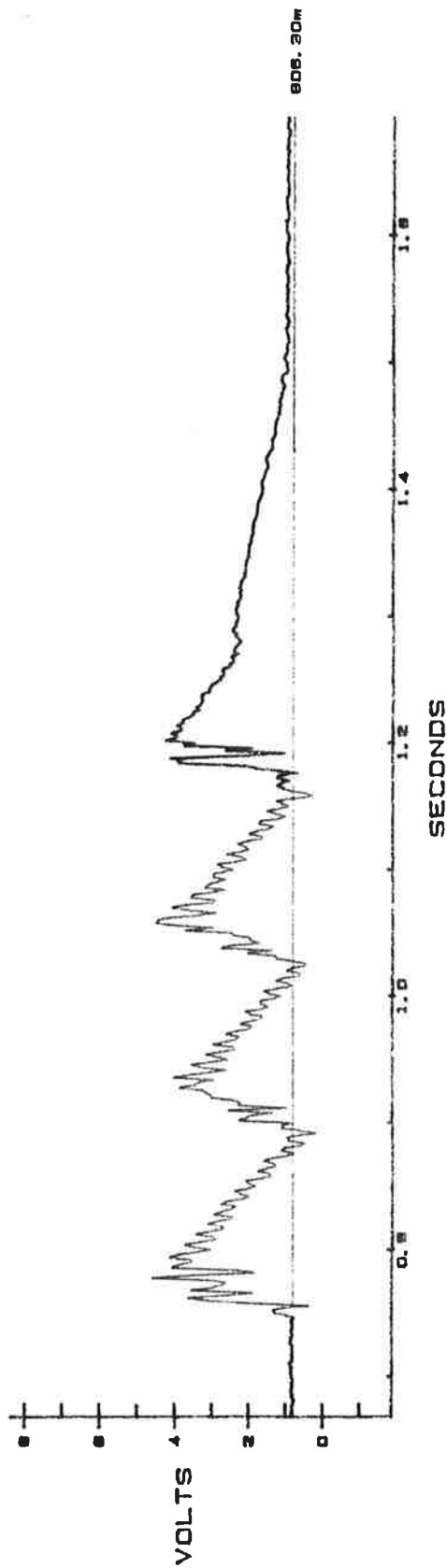
Plot 1

Feltid = 400 ms

BUF. A3 Alfa



BUF. A4 Gamma



Ej modifierat kort

Kortslutning till jord via 150 mH

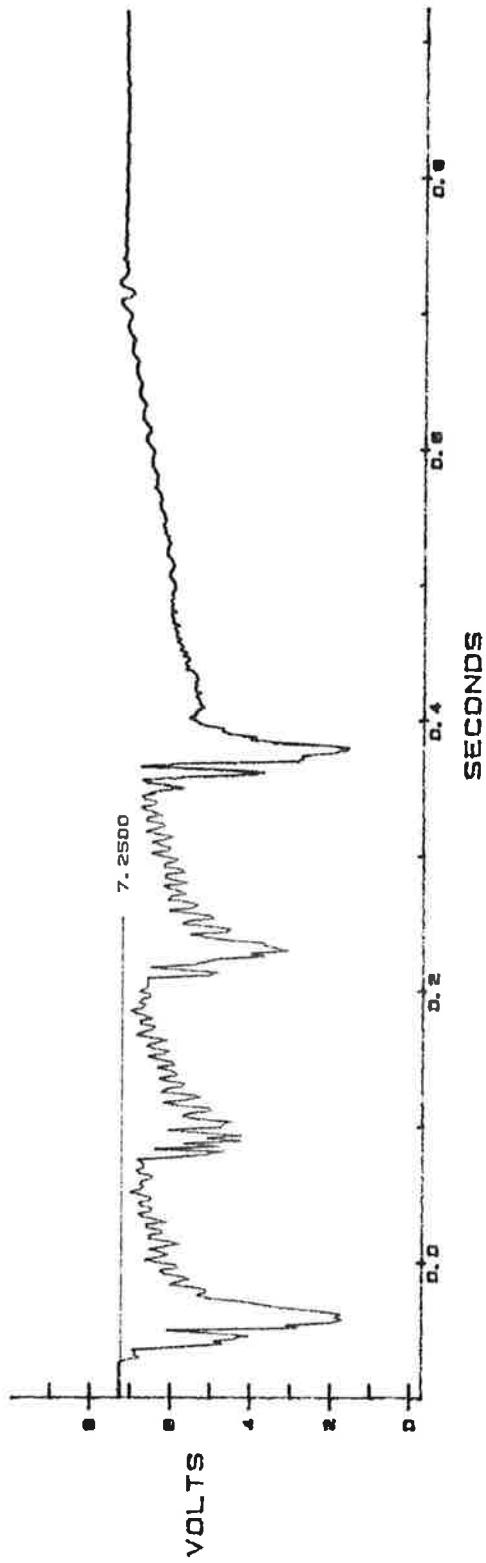
$L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$

$dx = 6 \%$

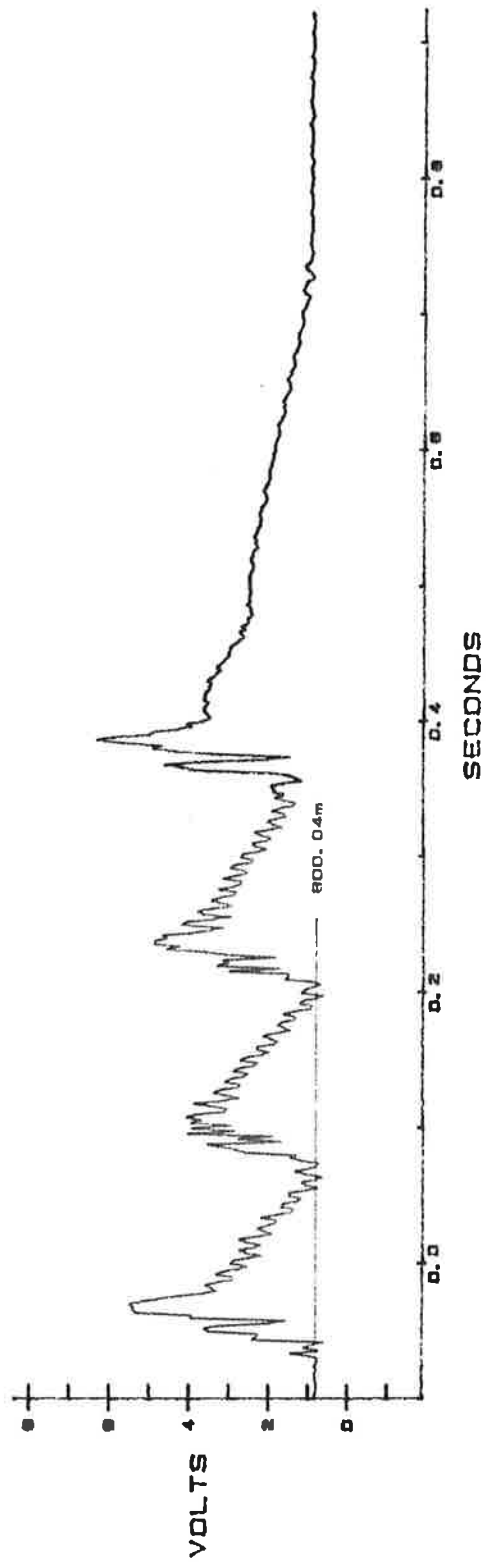
Plot 1

Feltid = 400 ms

BUF. A3 Alfa



BUF. A4 Gamma



Ej modifierat kort

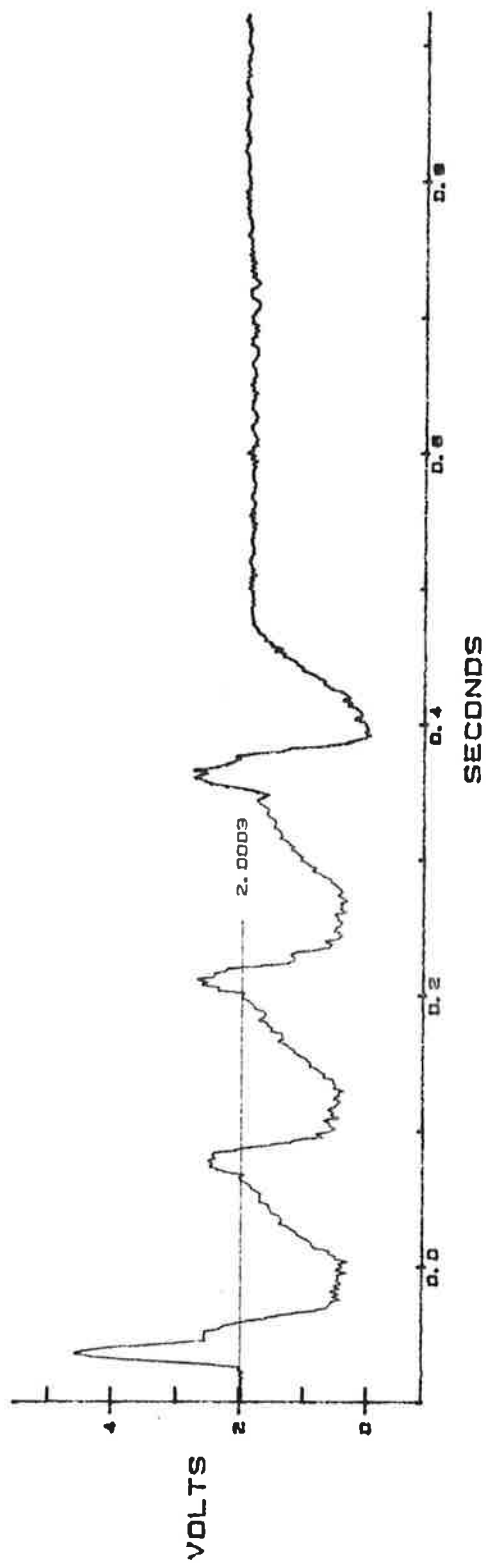
Kortslutning till jord via 150 mH

$L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$

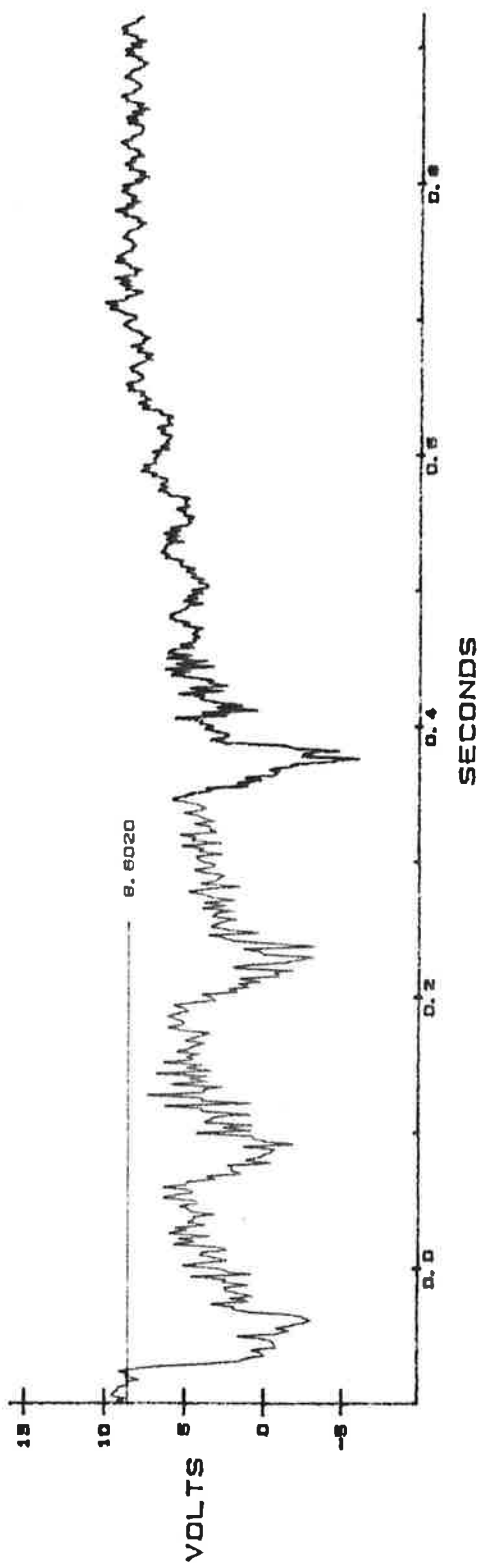
$dx = 6 \%$

Feltid = 400 ms

BUF. A1 Id



BUF. A2 Ud



Modifierat kort

Kortslutning till jord via 150 mH

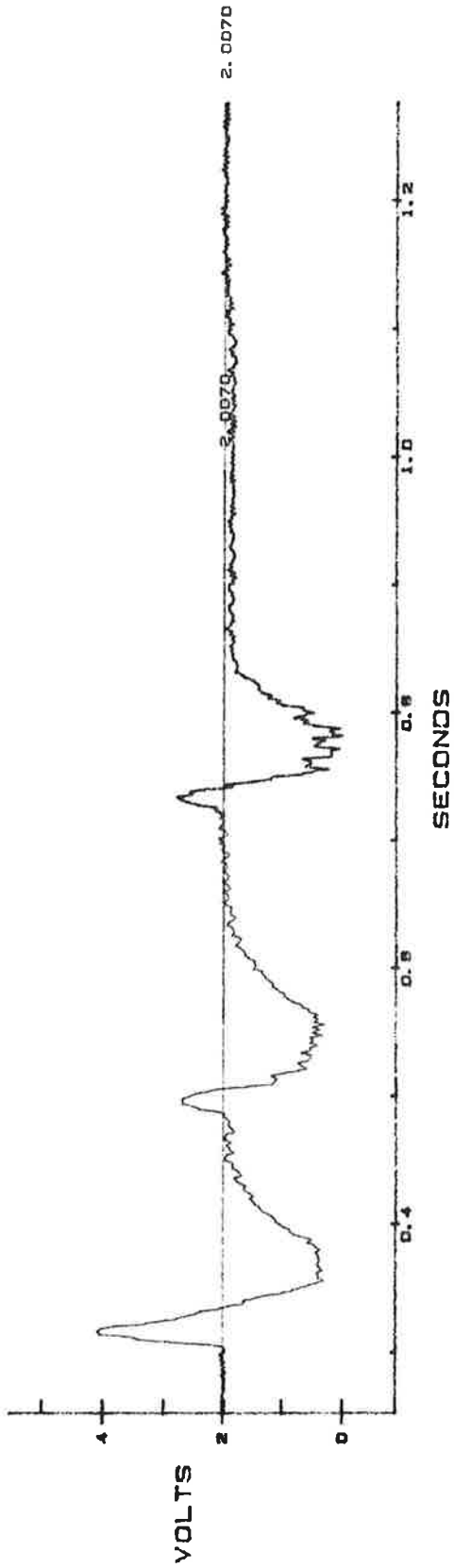
$L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$

$dx = 6 \%$

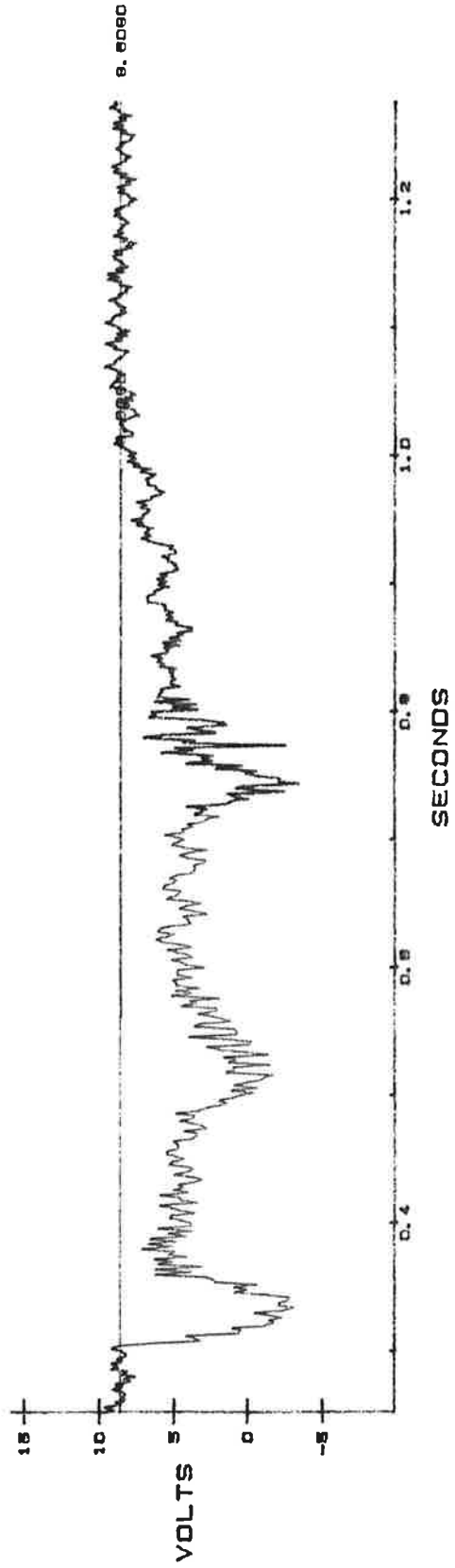
Plot 2

Feltid = 400 ms

BUF. A1 Id pole

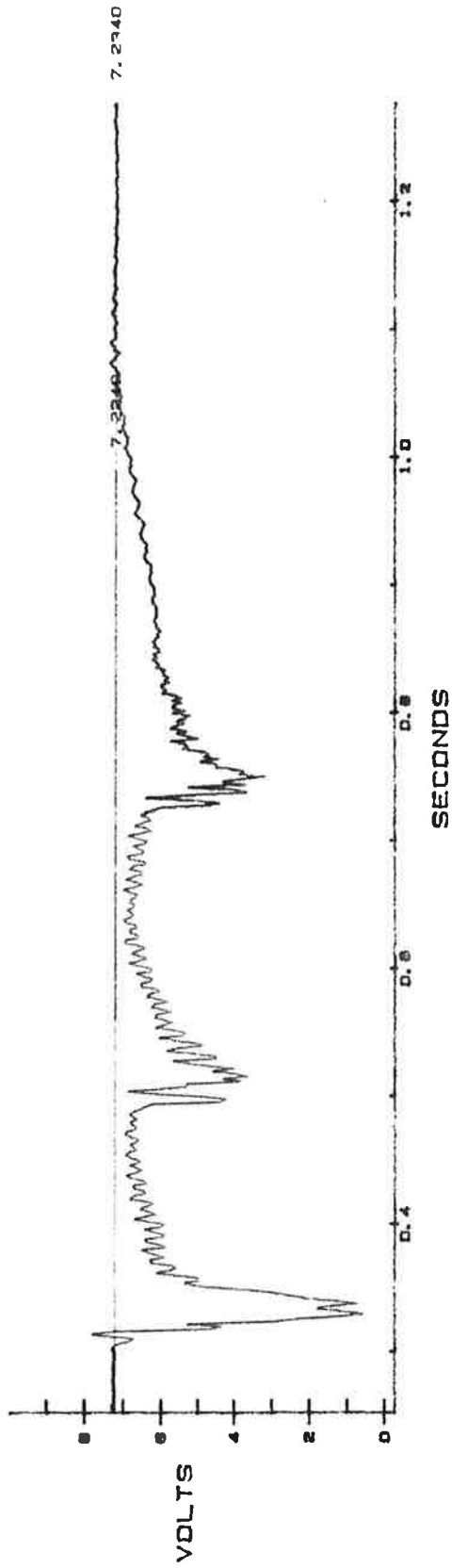


BUF. A2 Ud

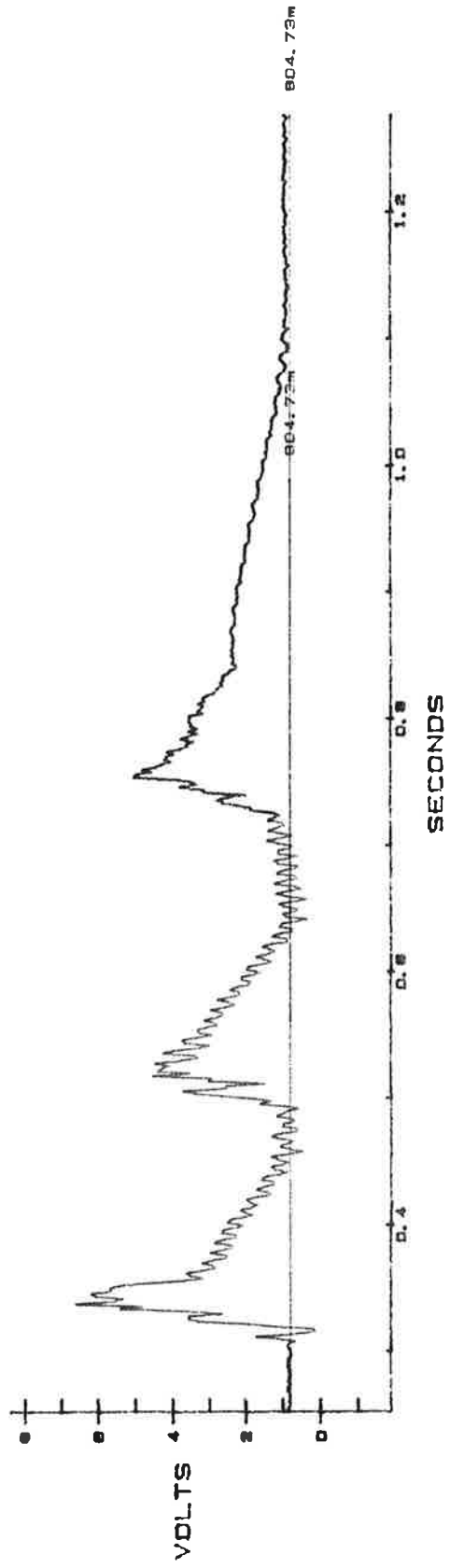


Modifierat kort
Kortslutning till jord via 150 mH
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Plot 2
Feltid = 400 ms

BUF. A3 Alfa

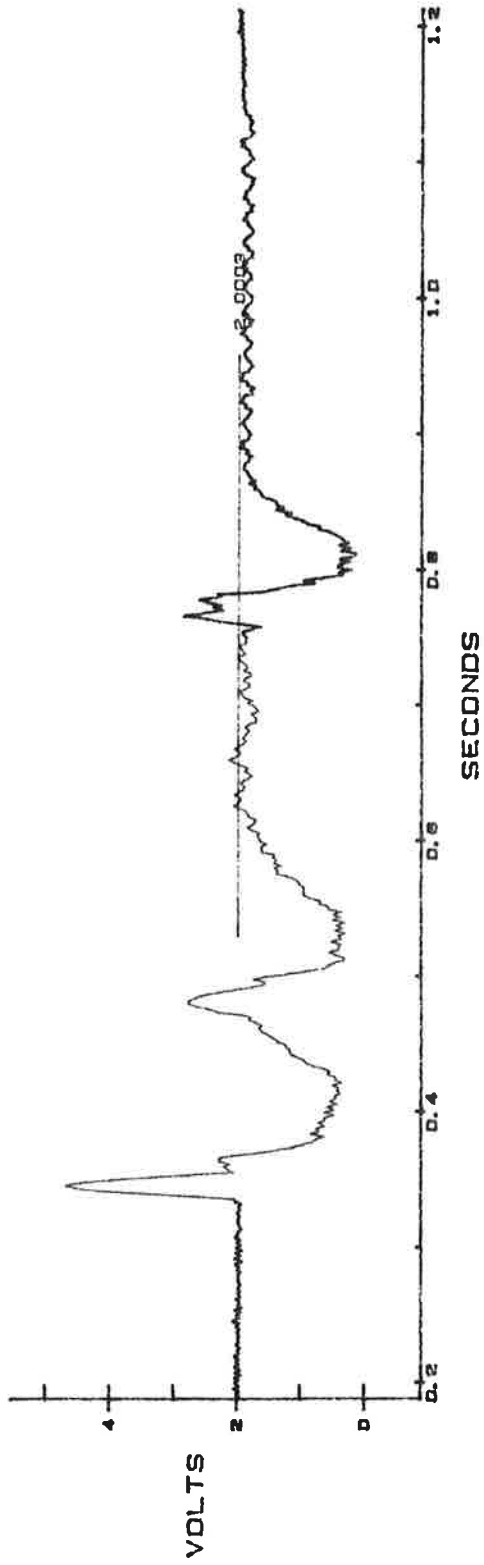


BUF. A4 Gamma

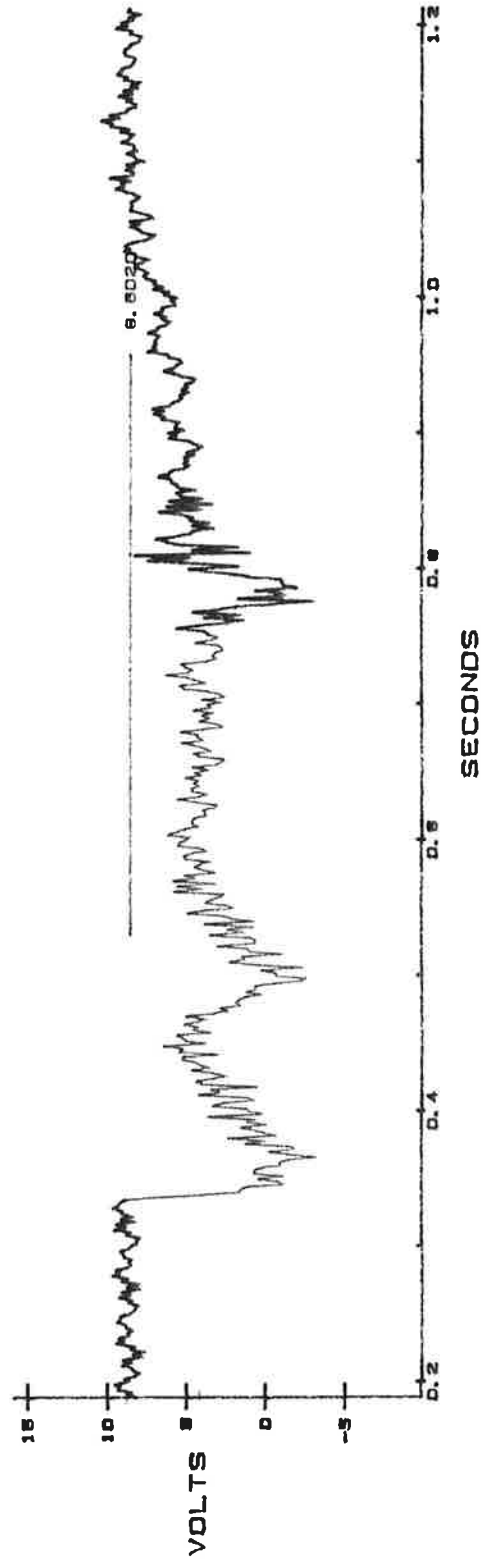


Ej modifierat kort
Kortslutning till jord via 150 mH
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Plot 2
Feltid = 400 ms

BUF. A1 Id pole

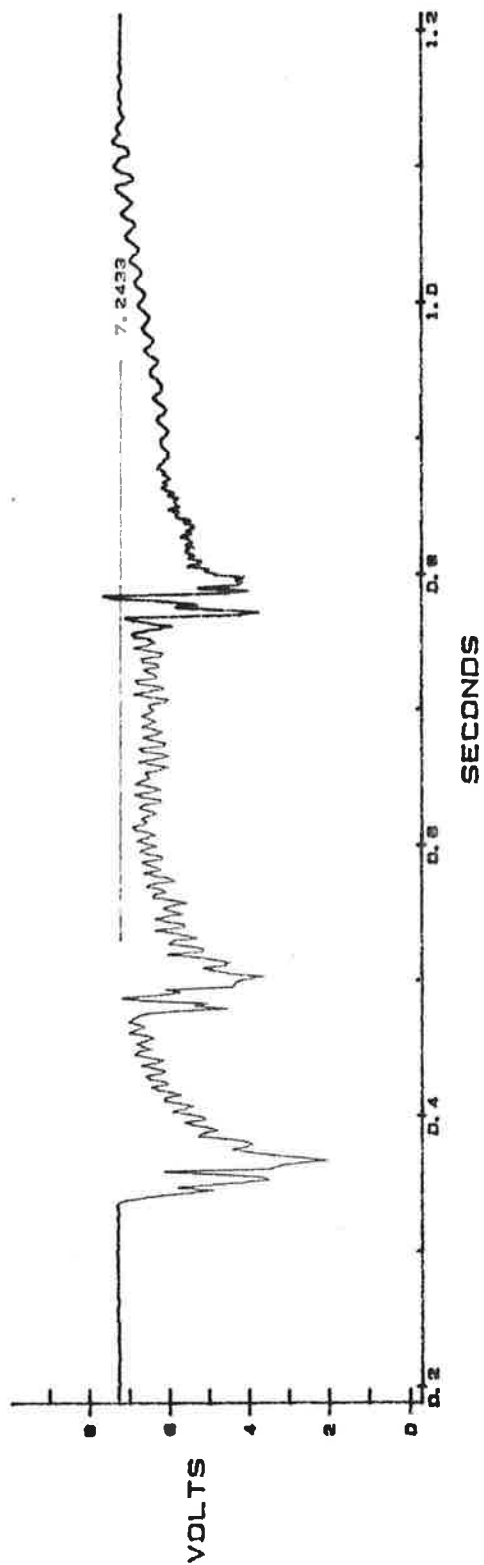


BUF. A2 Ud

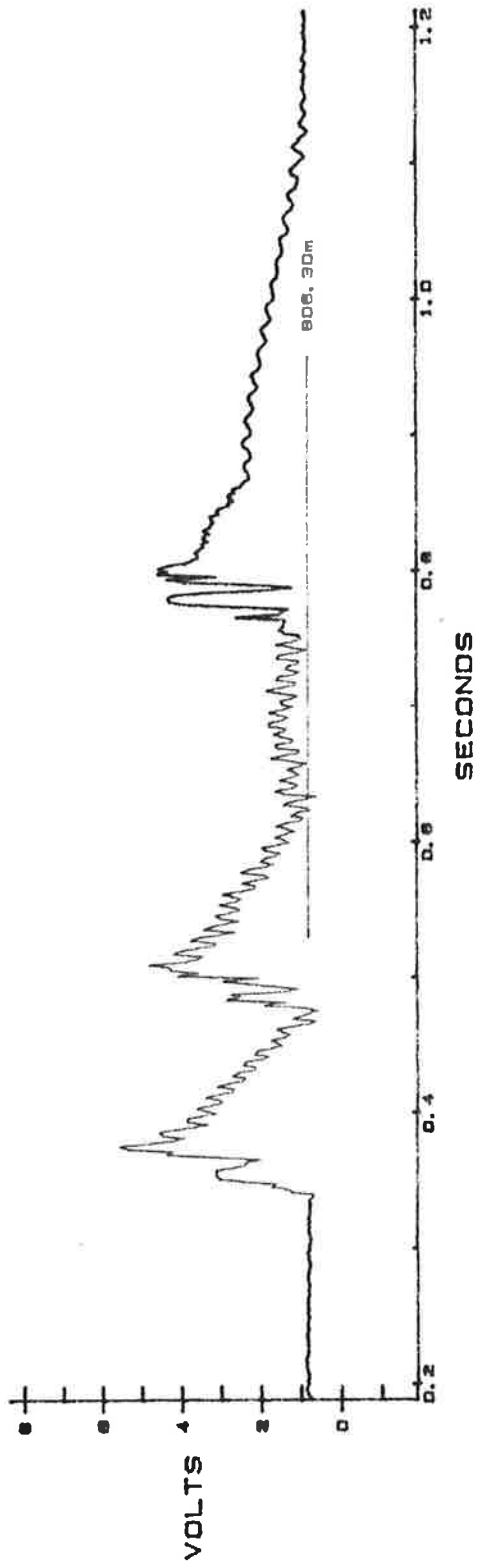


Ej modifierat kort
Kortslutning till jord via 150 mH
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Plot 2
Feltid = 400 ms

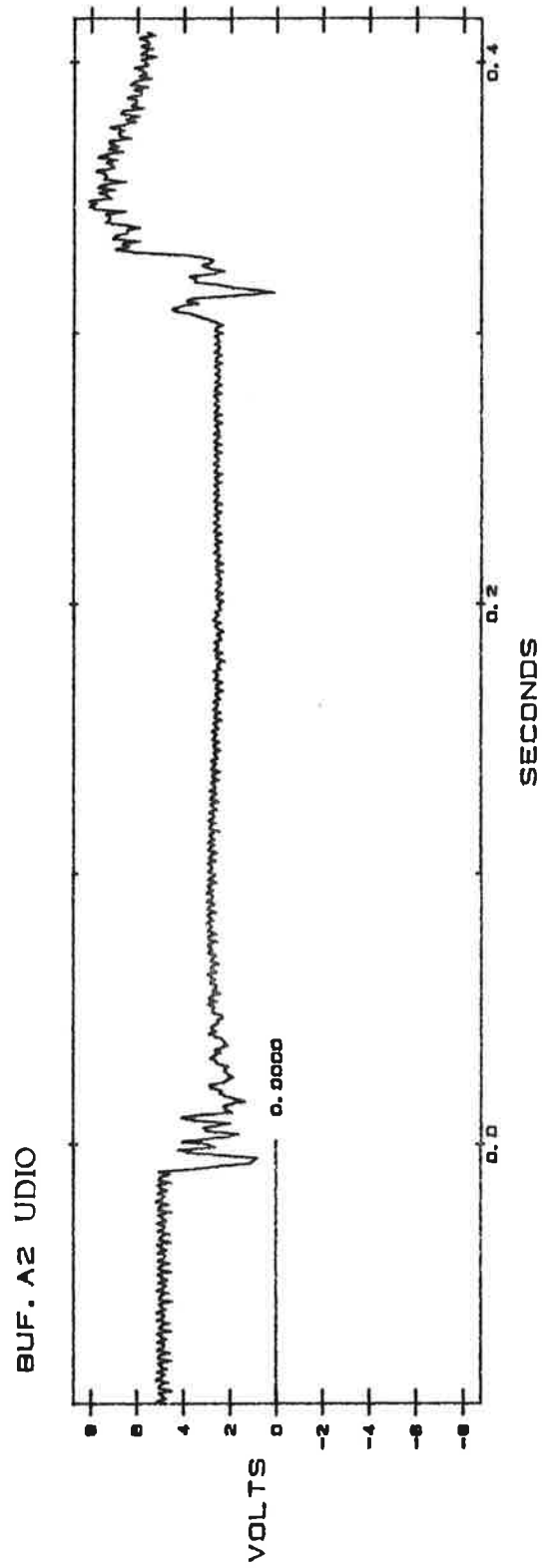
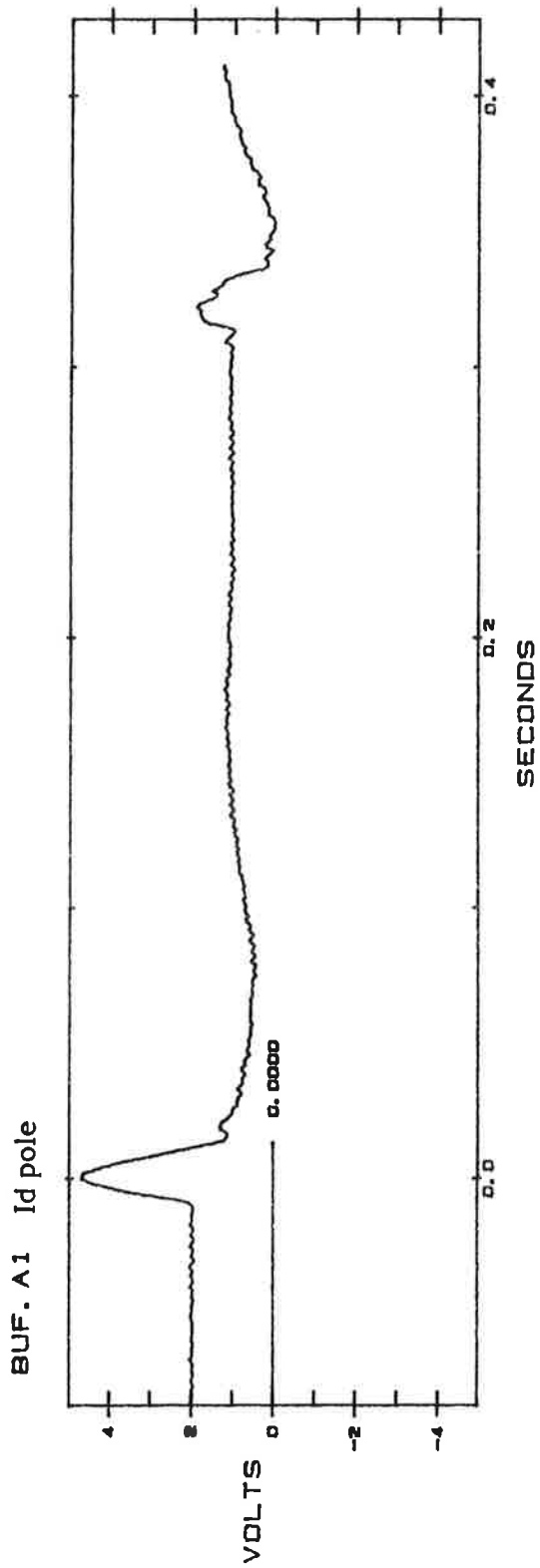
BUF. A3 Alfa



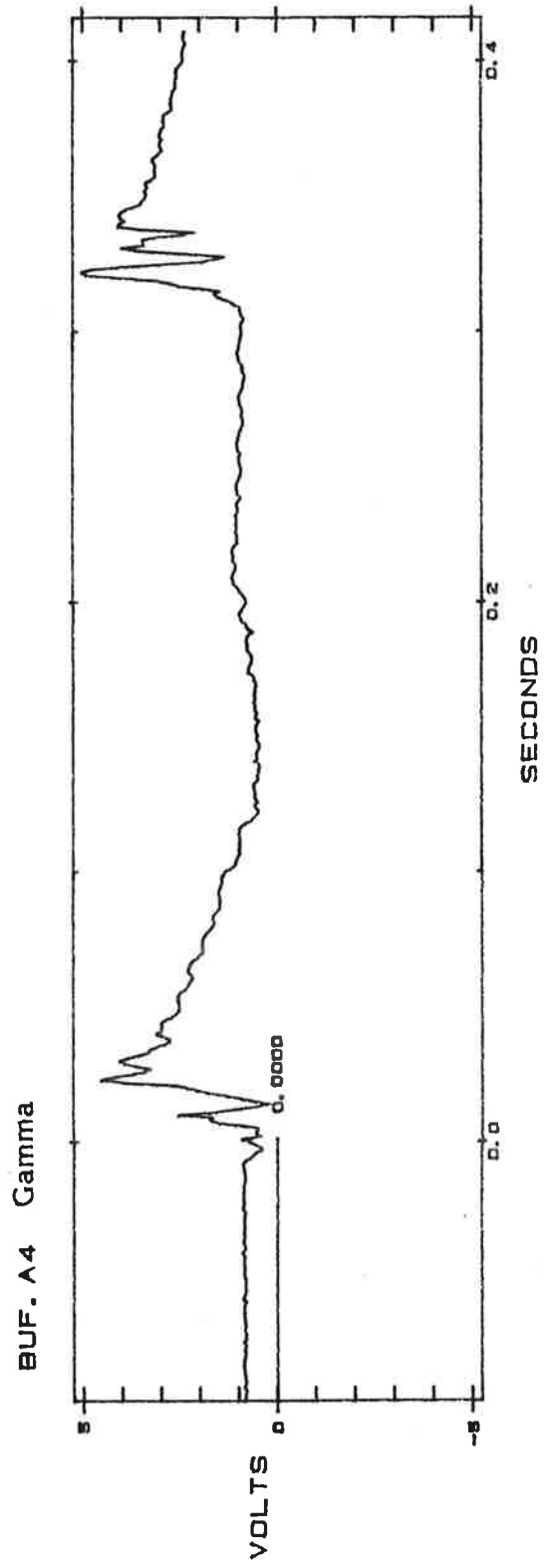
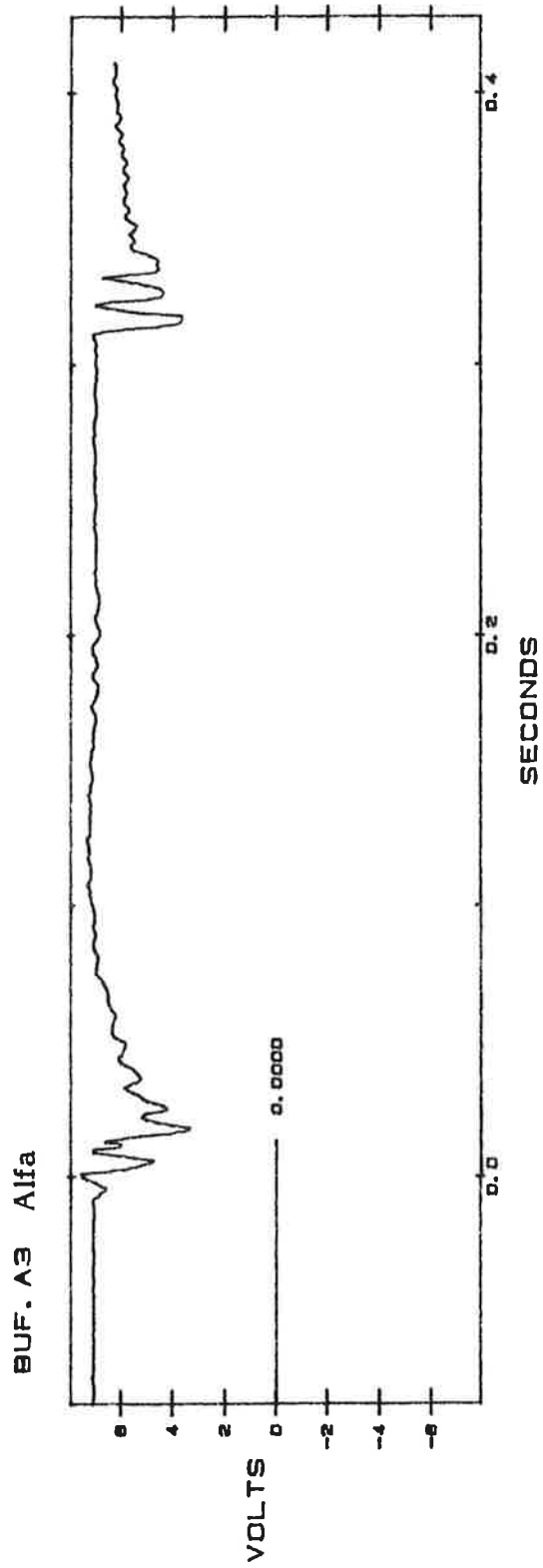
BUF. A4 Gamma



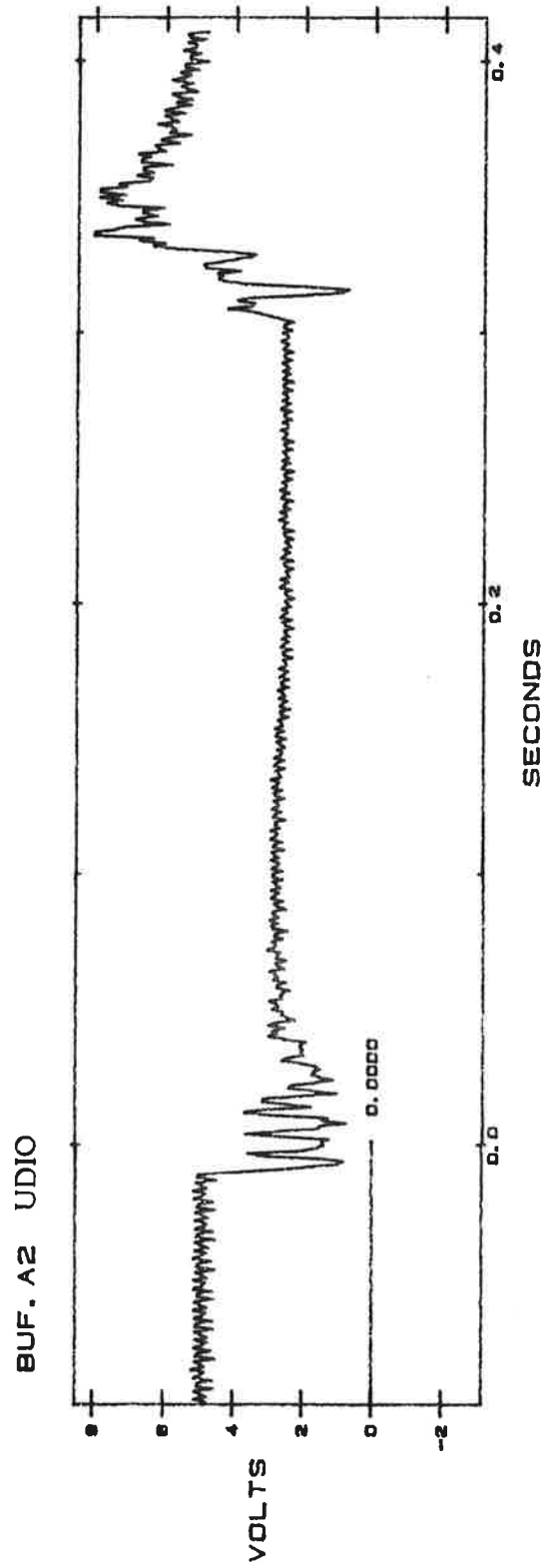
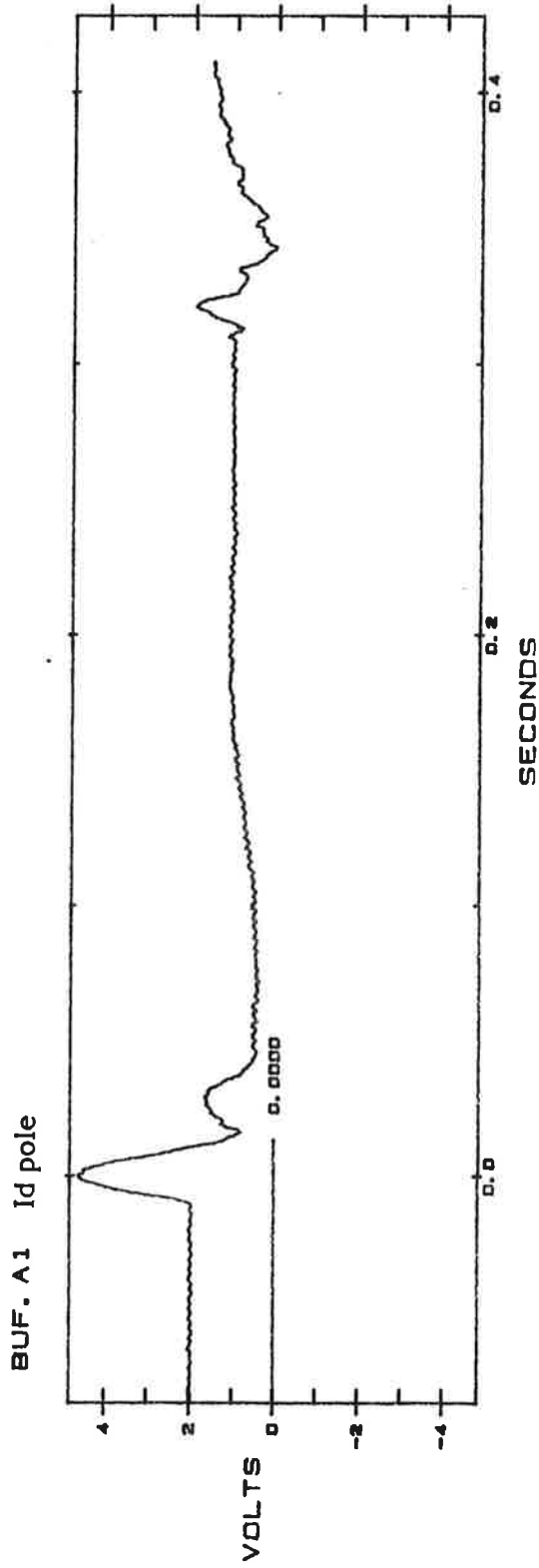
Modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
 $AC \text{ fel} = 300 \text{ ms}$
 $L_{\text{SC}} = 50 \text{ mH}$



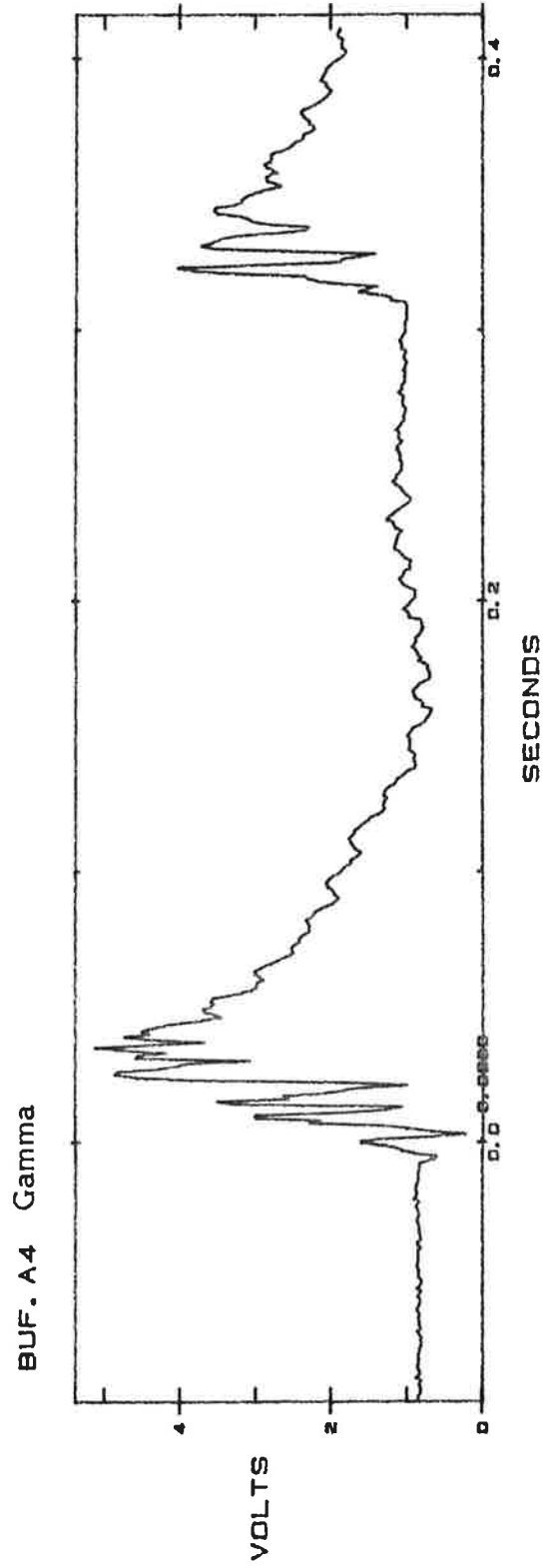
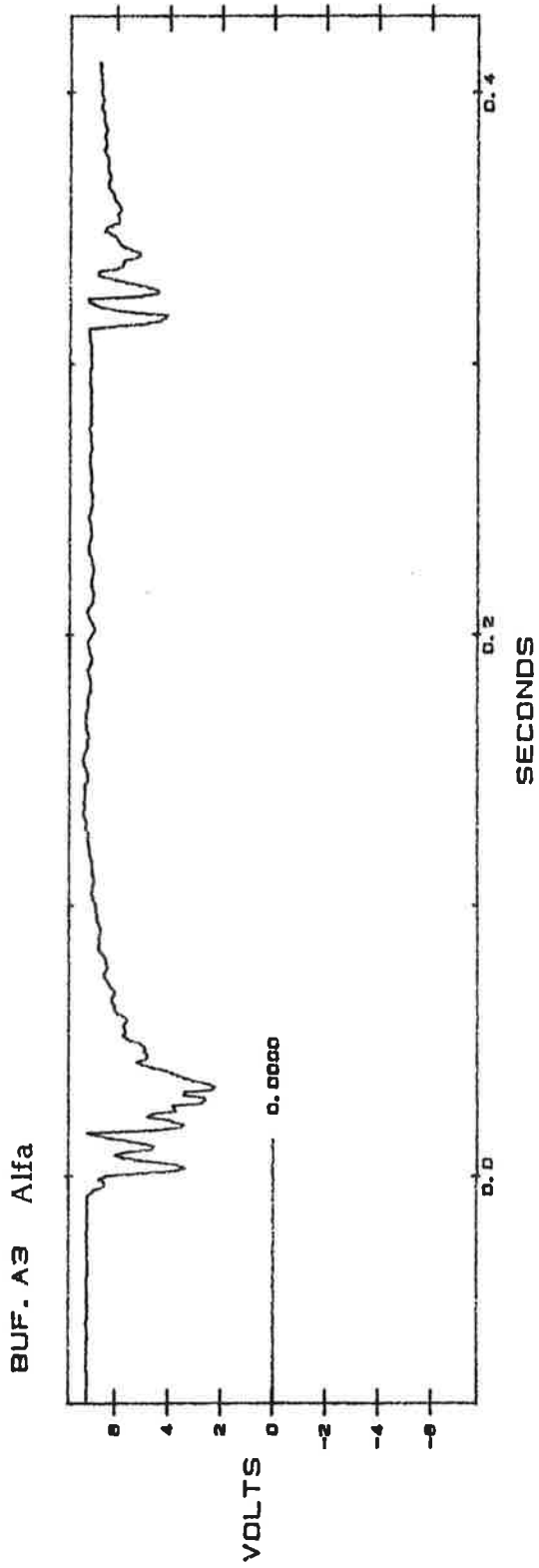
Modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
 $AC \text{ fel} = 300 \text{ ms}$
 $L_{\text{SC}} = 50 \text{ mH}$



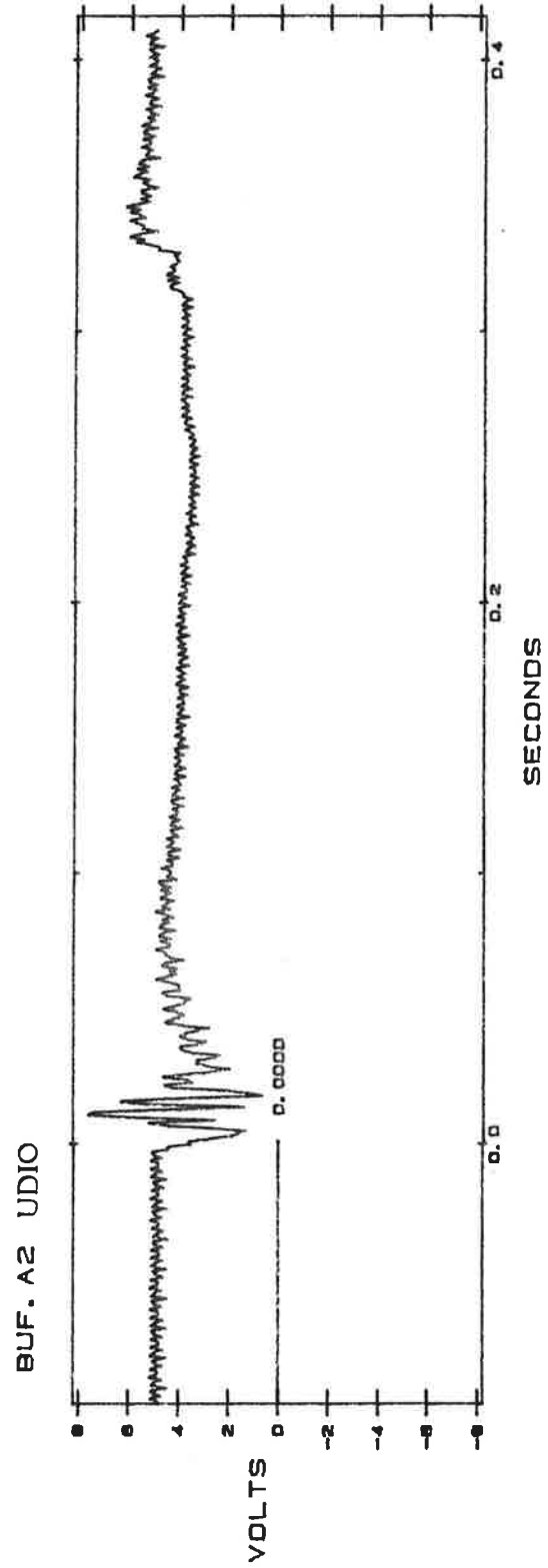
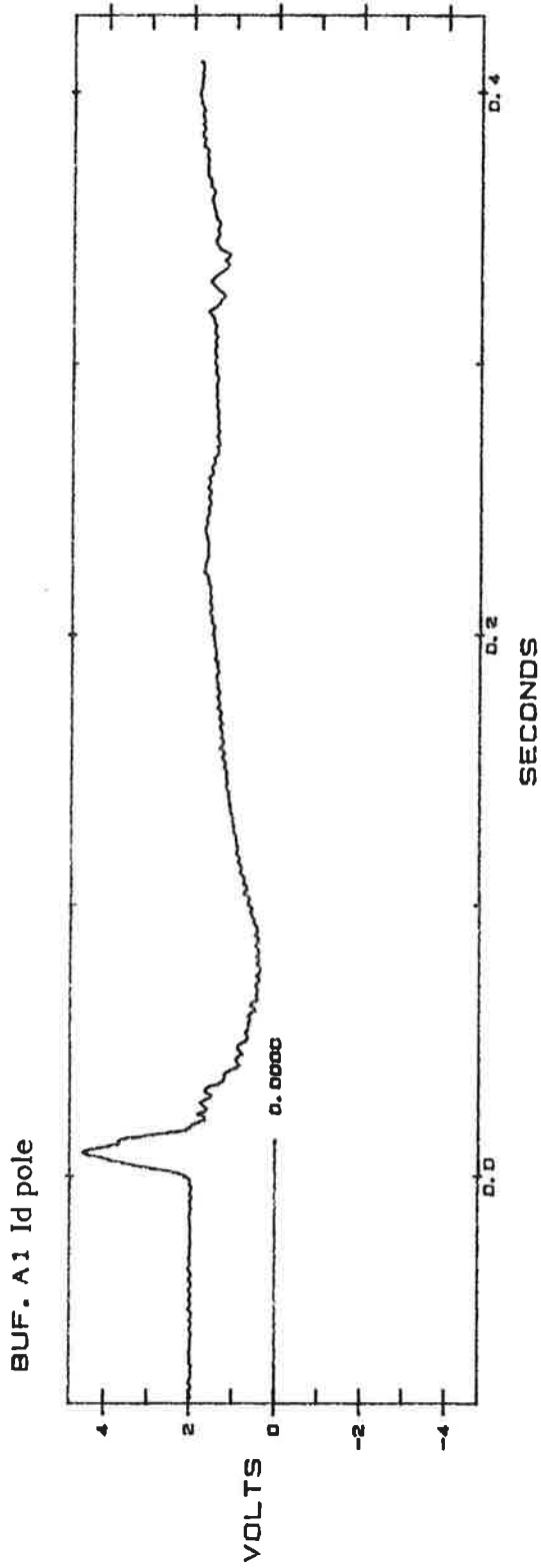
Ej modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
 $AC \text{ fel} = 300 \text{ ms}$
 $L_{\text{SC}} = 50 \text{ mH}$



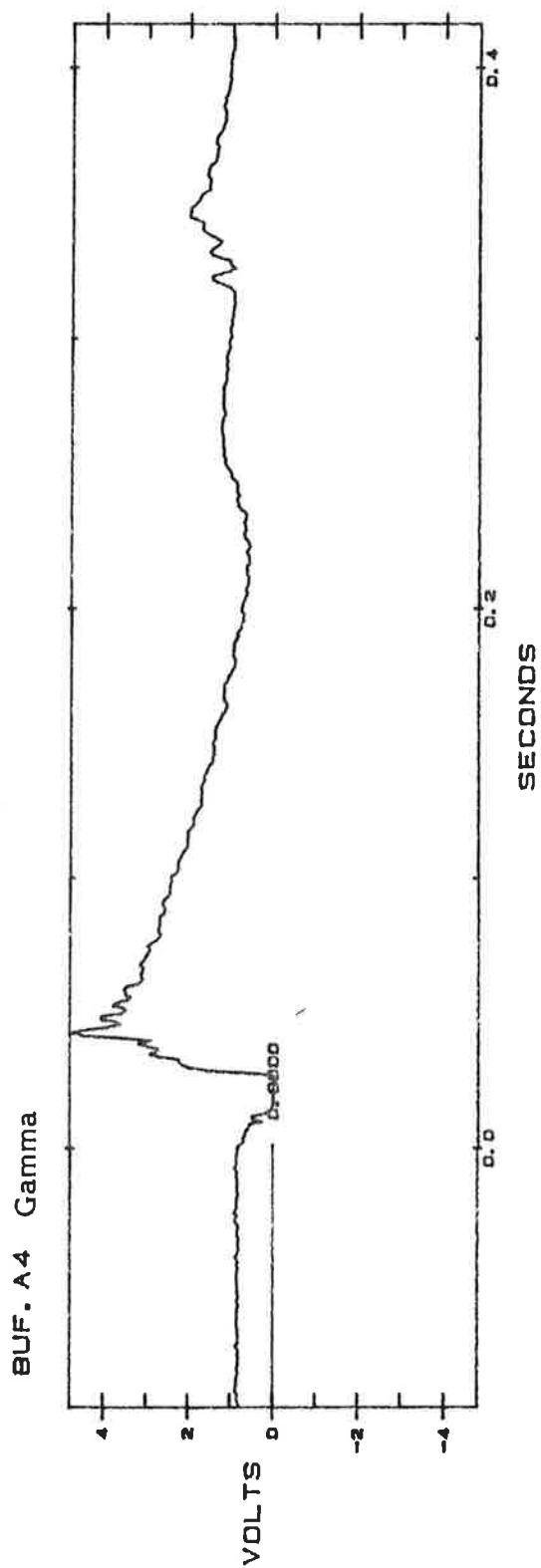
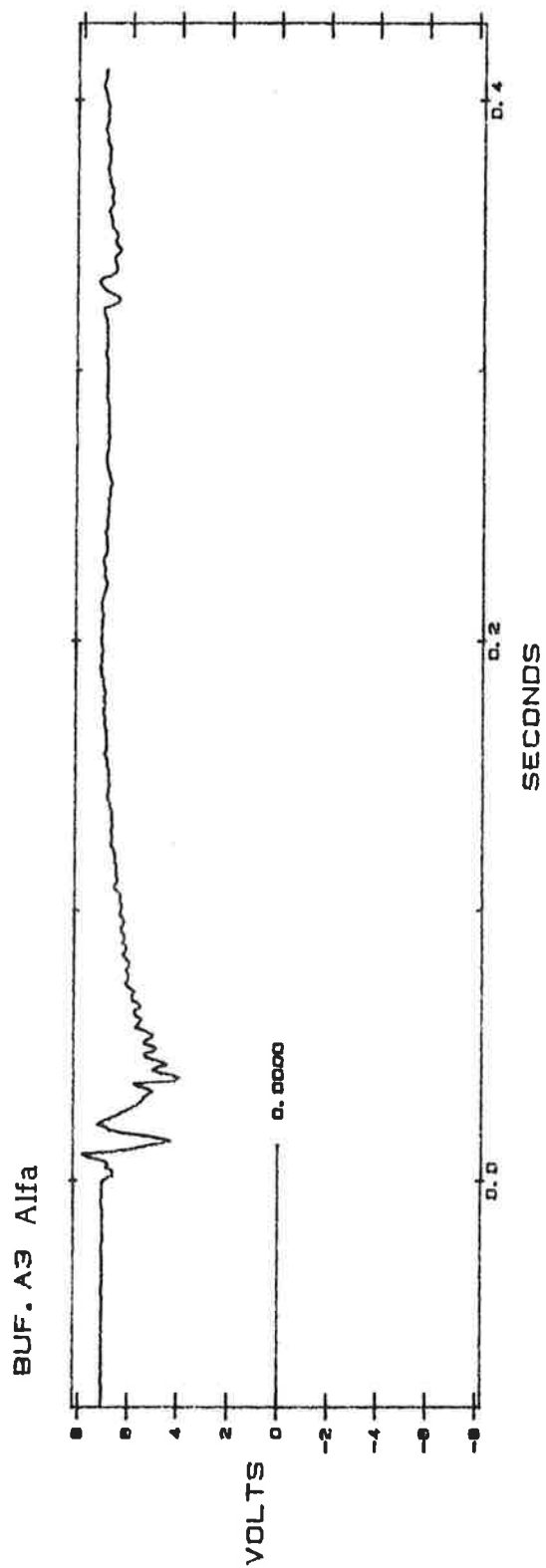
Ej modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
 $AC \text{ fel} = 300 \text{ ms}$
 $L_{\text{SC}} = 50 \text{ mH}$



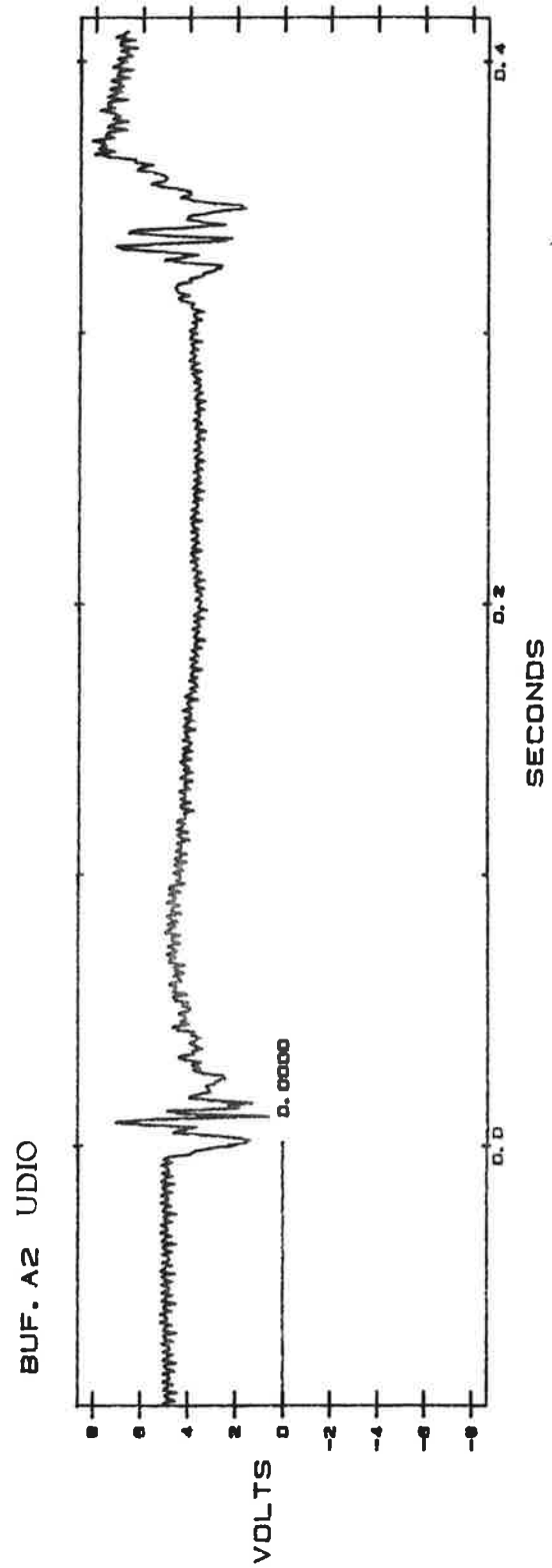
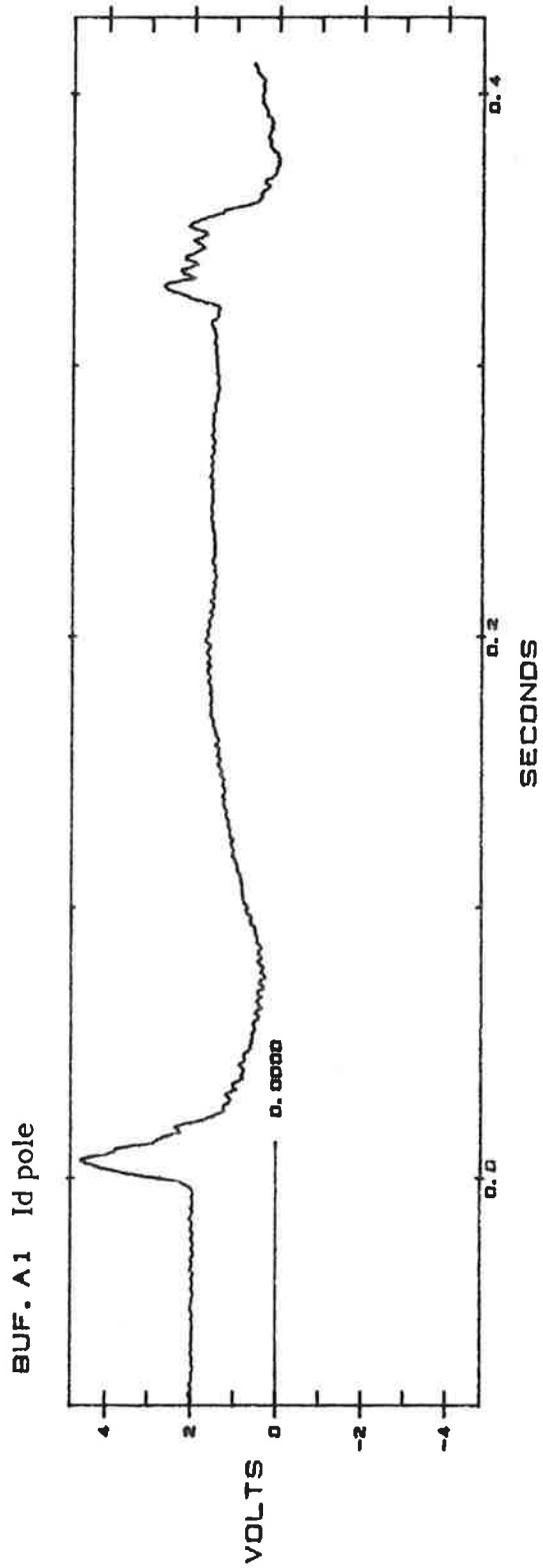
Modifiat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
 $AC \text{ fel} = 300 \text{ ms}$
 $L_{\text{SC}} = 150 \text{ mH}$



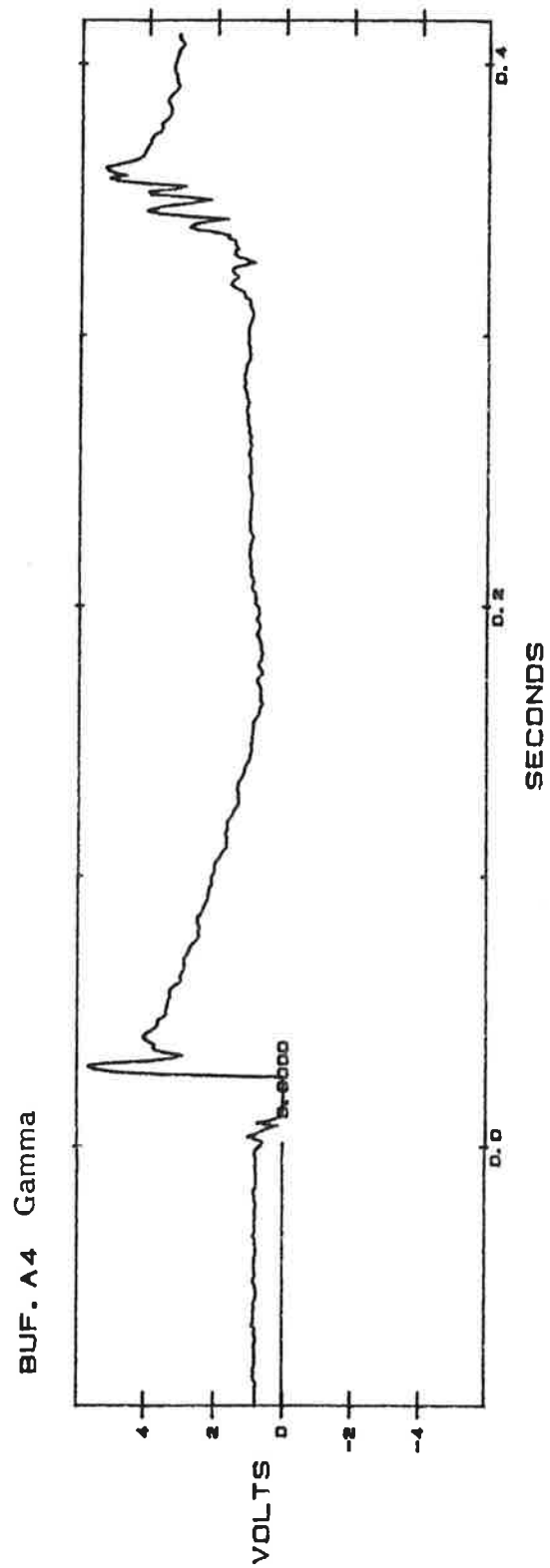
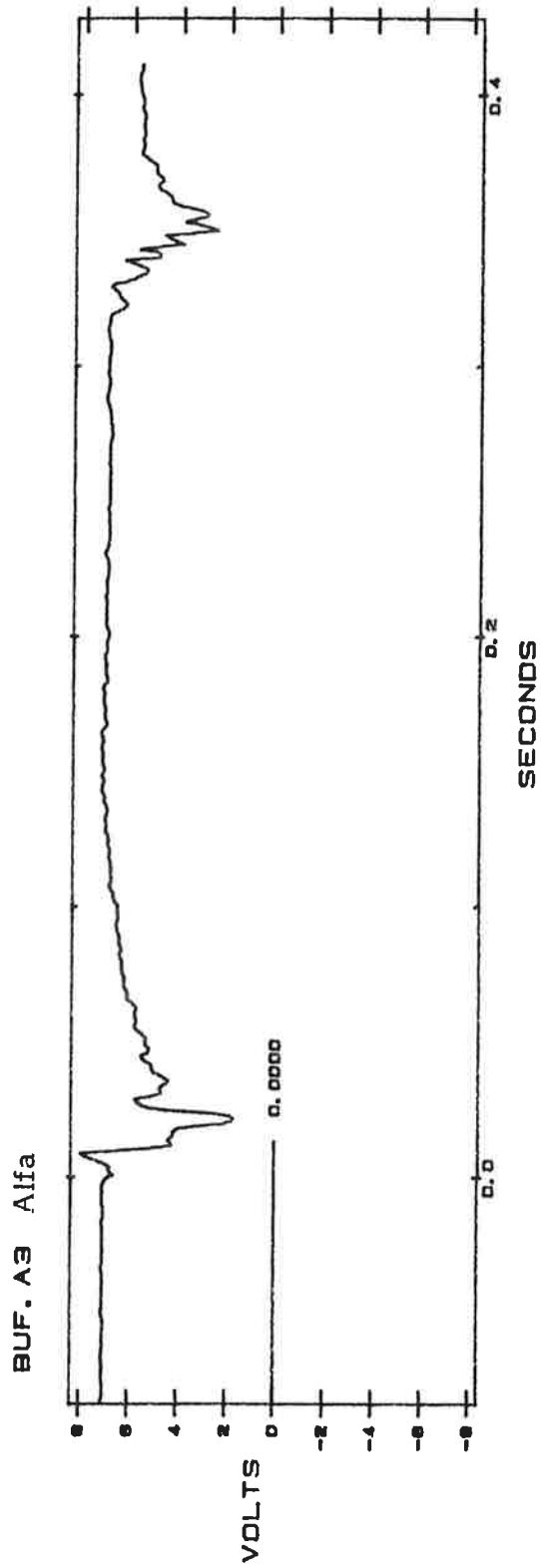
Modifiat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
AC fel = 300 ms
 $L_{\text{SC}} = 150 \text{ mH}$



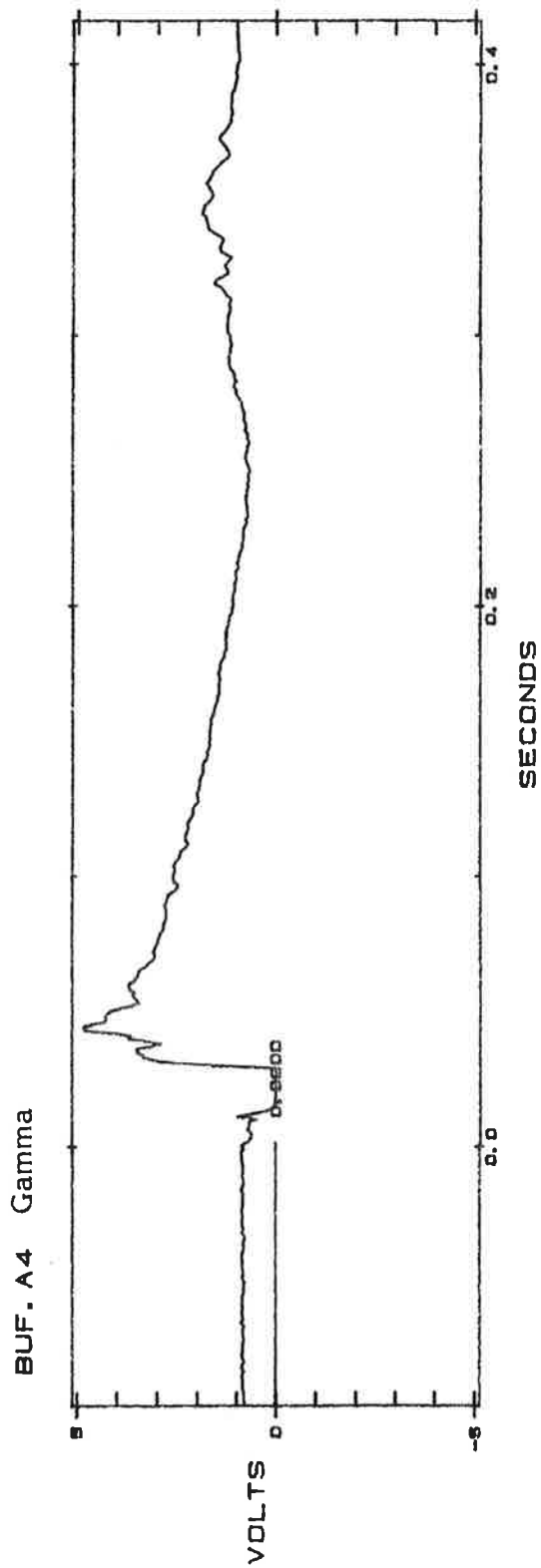
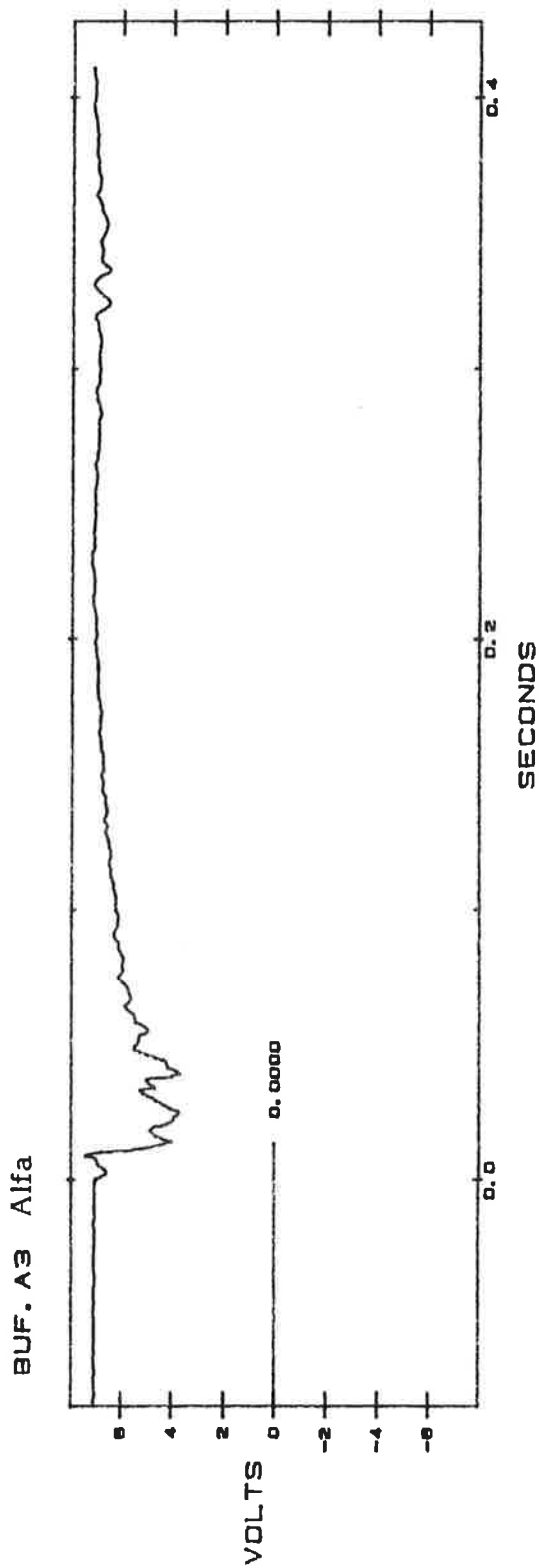
Ej modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
AC fel = 300 ms
 $L_{\text{SC}} = 150 \text{ mH}$



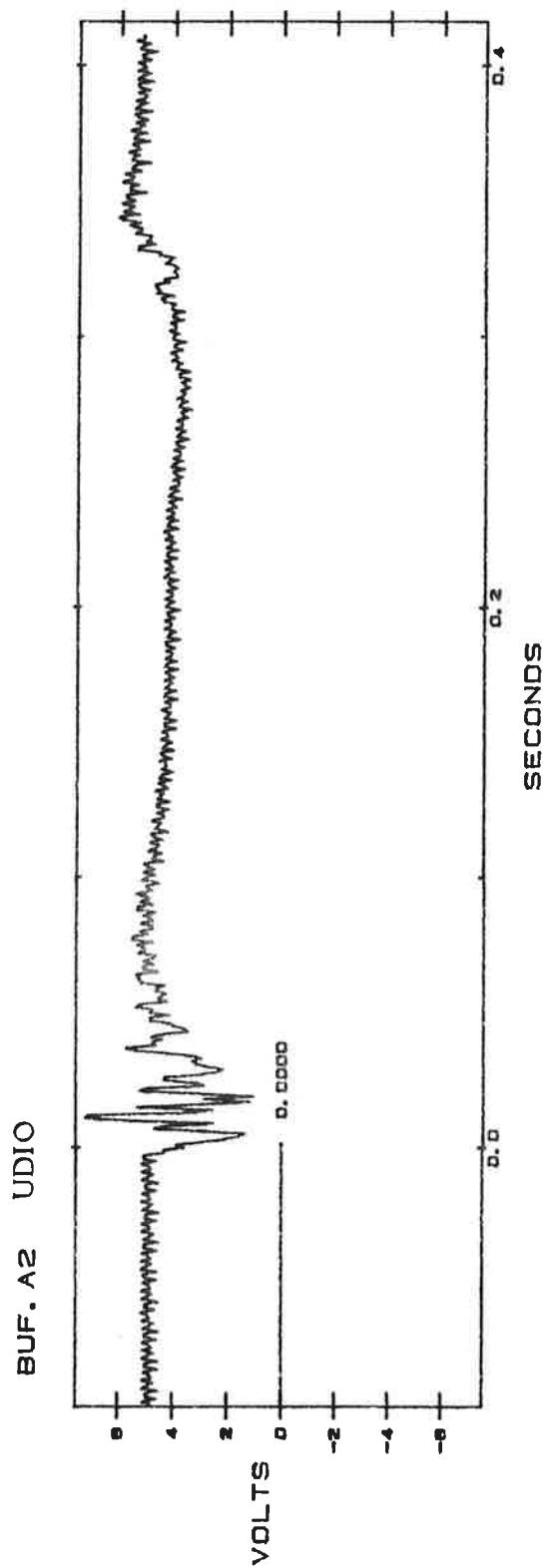
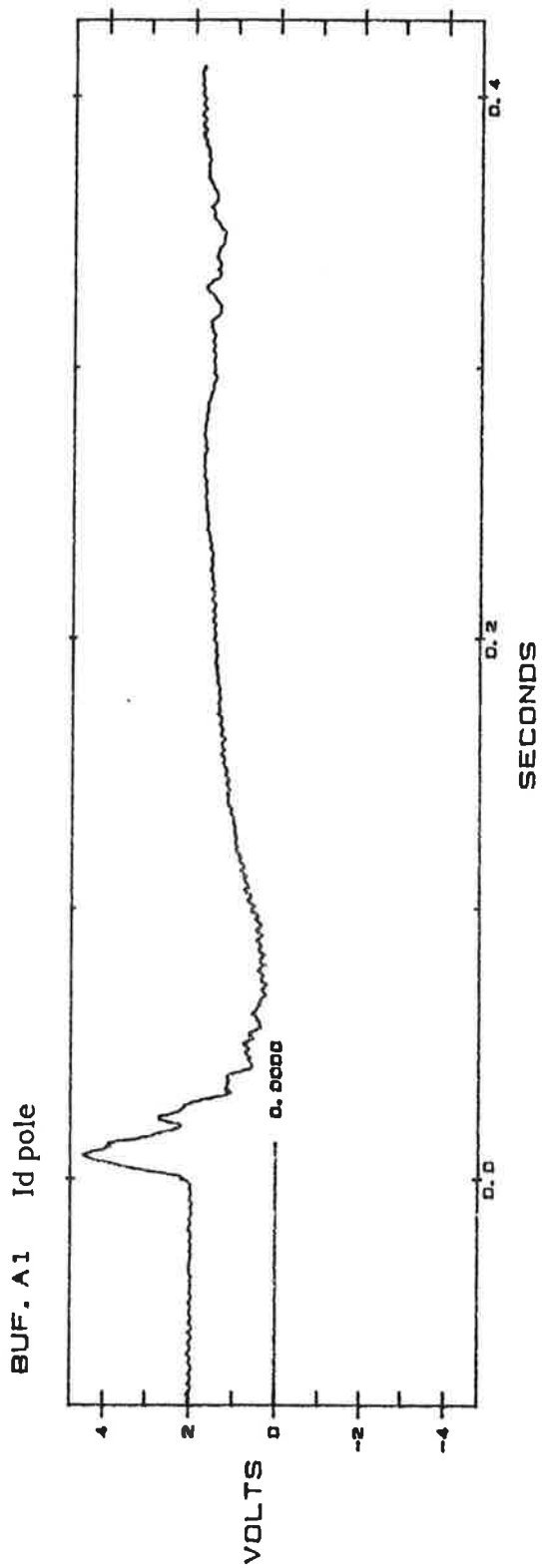
Ej modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
 $AC \text{ fel} = 300 \text{ ms}$
 $L_{\text{SC}} = 150 \text{ mH}$



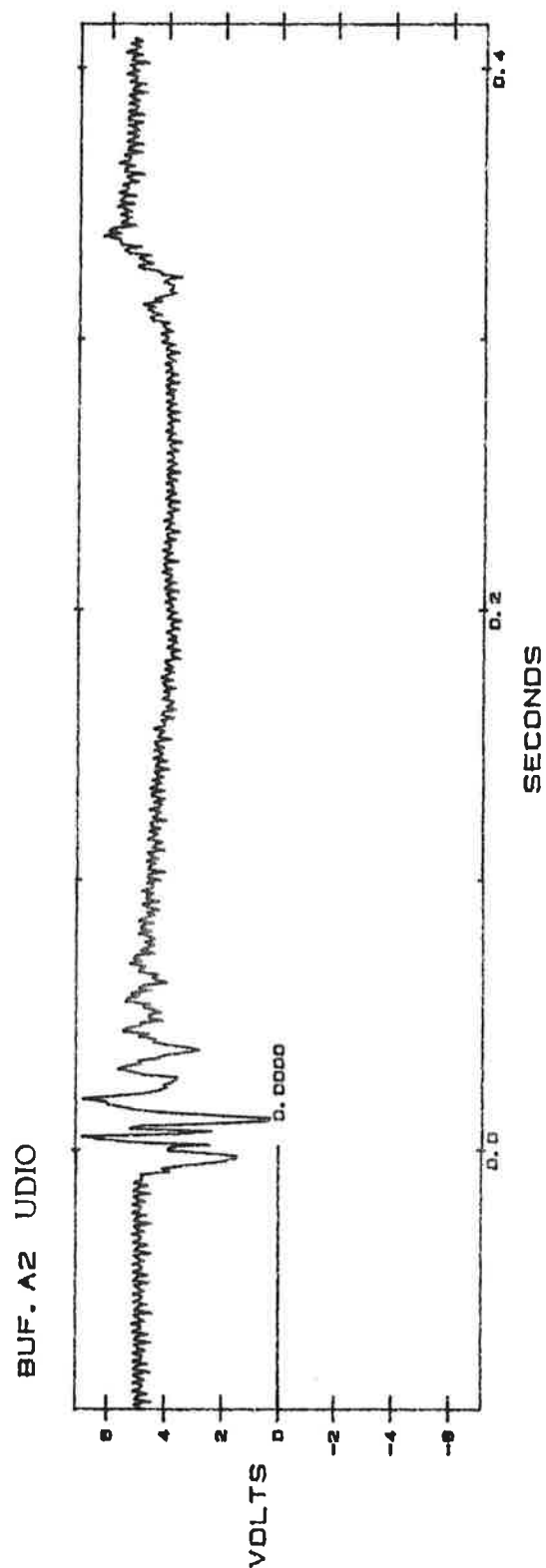
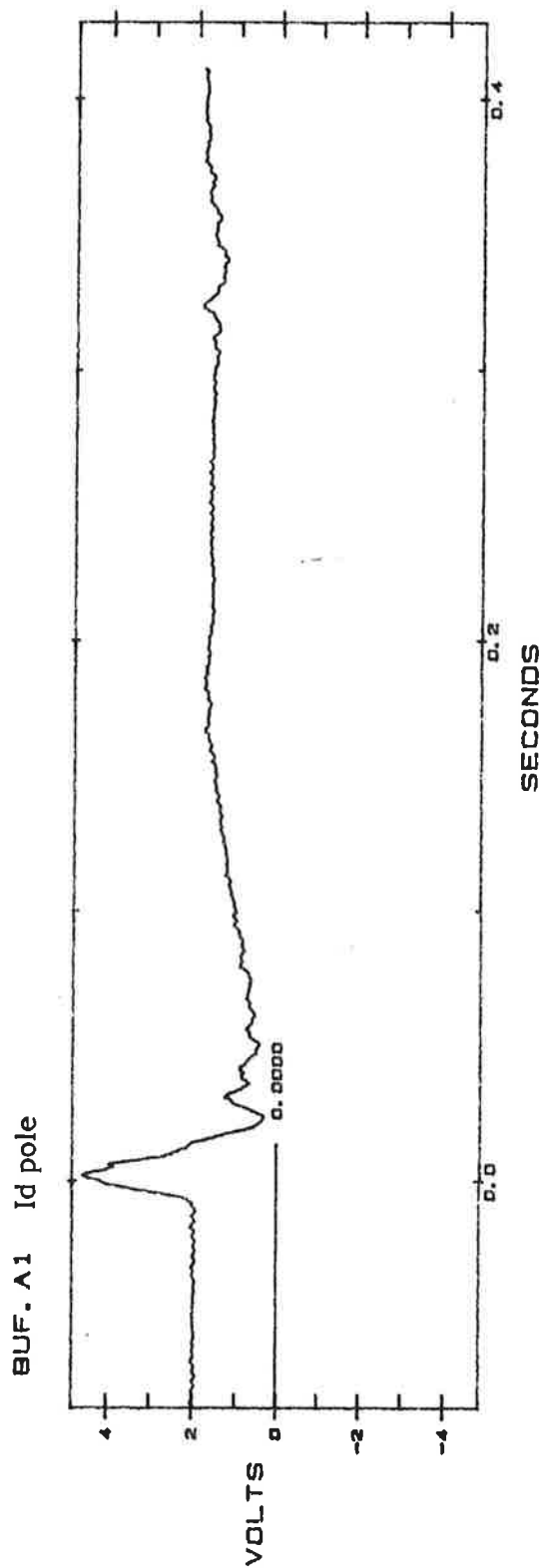
Modiferaat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
 $AC \text{ fel} = 300 \text{ ms}$
 $L_{\text{SC}} = 200 \text{ mH}$



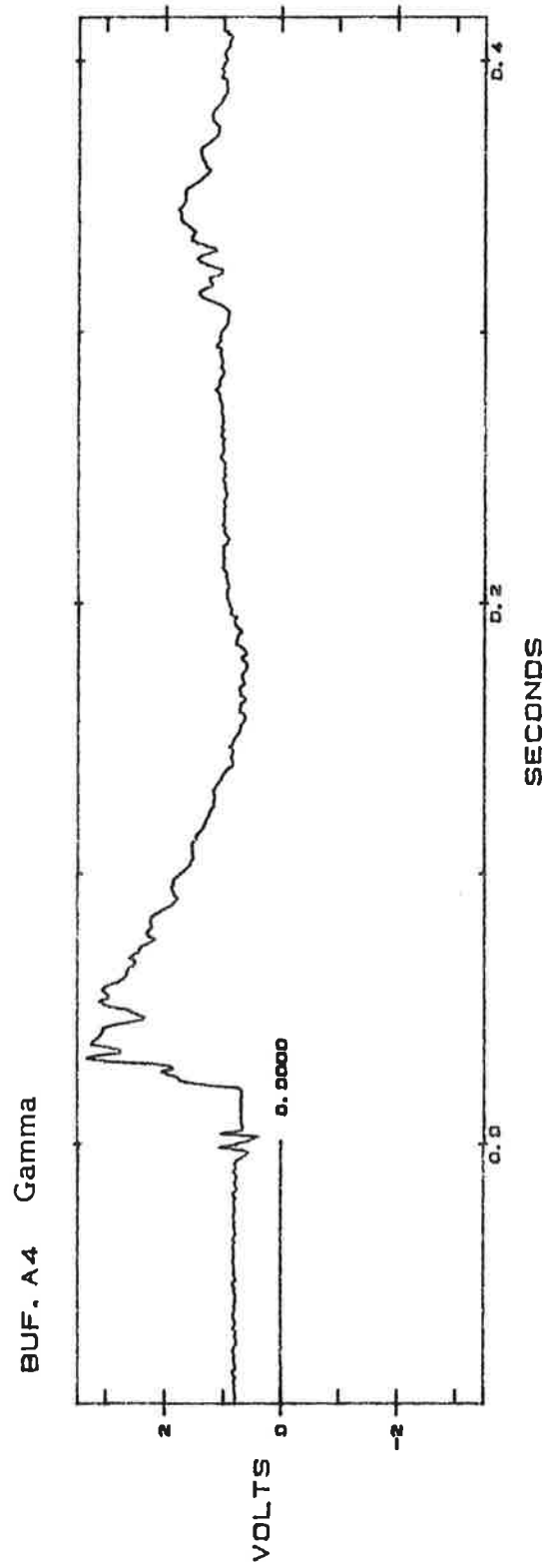
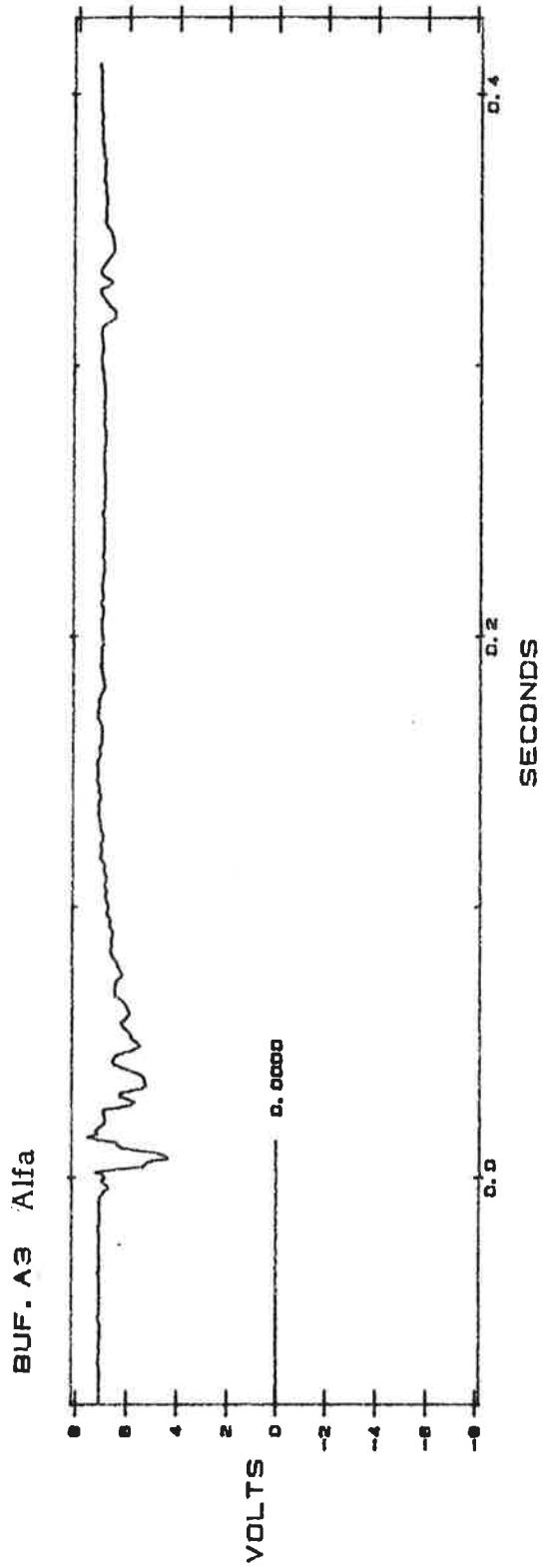
Modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
 $AC \text{ fel} = 300 \text{ ms}$
 $L_{\text{SC}} = 200 \text{ mH}$



Ej modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
 $AC \text{ fel} = 300 \text{ ms}$
 $L_{\text{SC}} = 200 \text{ mH}$

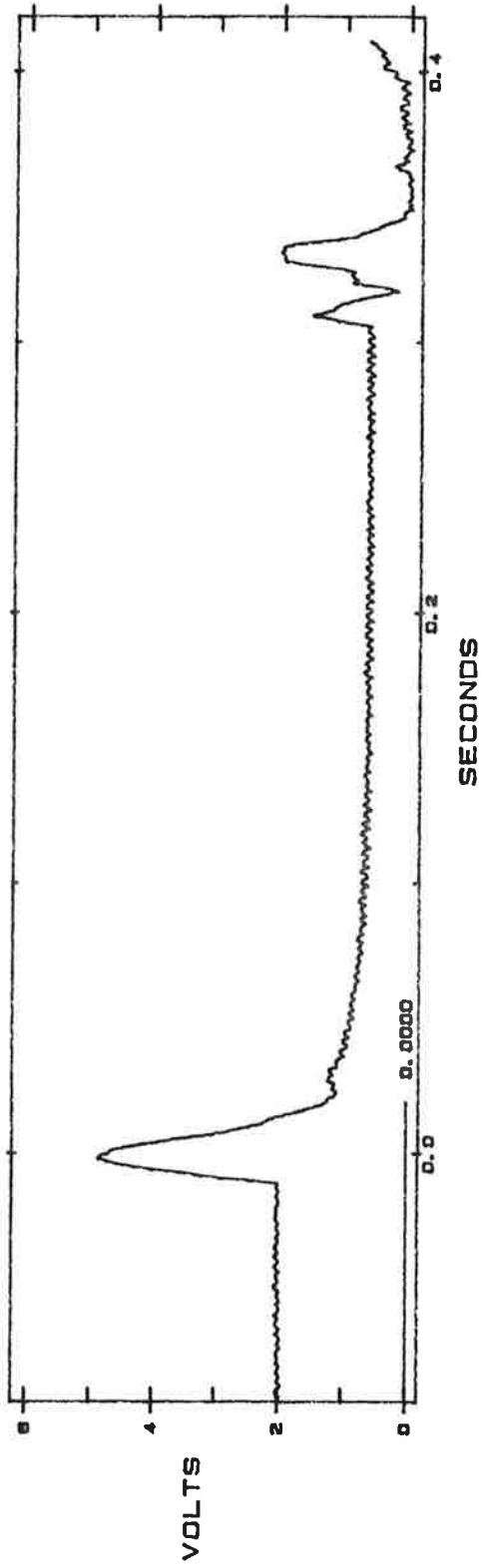


Ej modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
 $AC \text{ fel} = 300 \text{ ms}$
 $L_{\text{SC}} = 200 \text{ mH}$

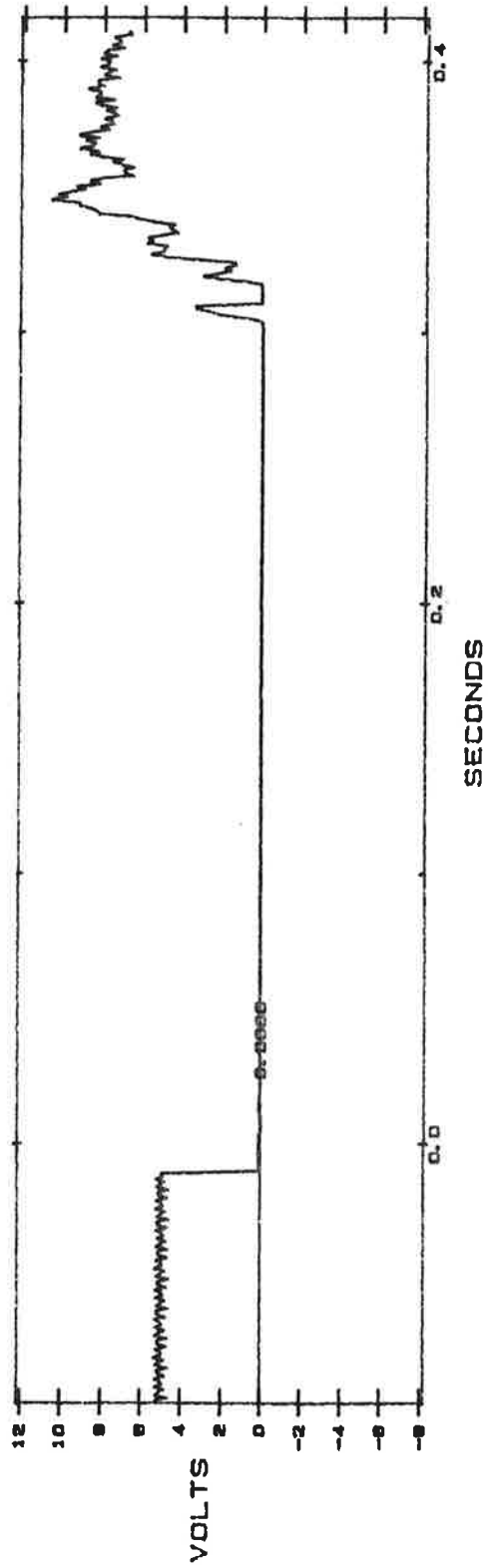


Modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 60,5 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
 AC fel = 300 ms
 Kortslutning till jord

BUF. A1 Id pole

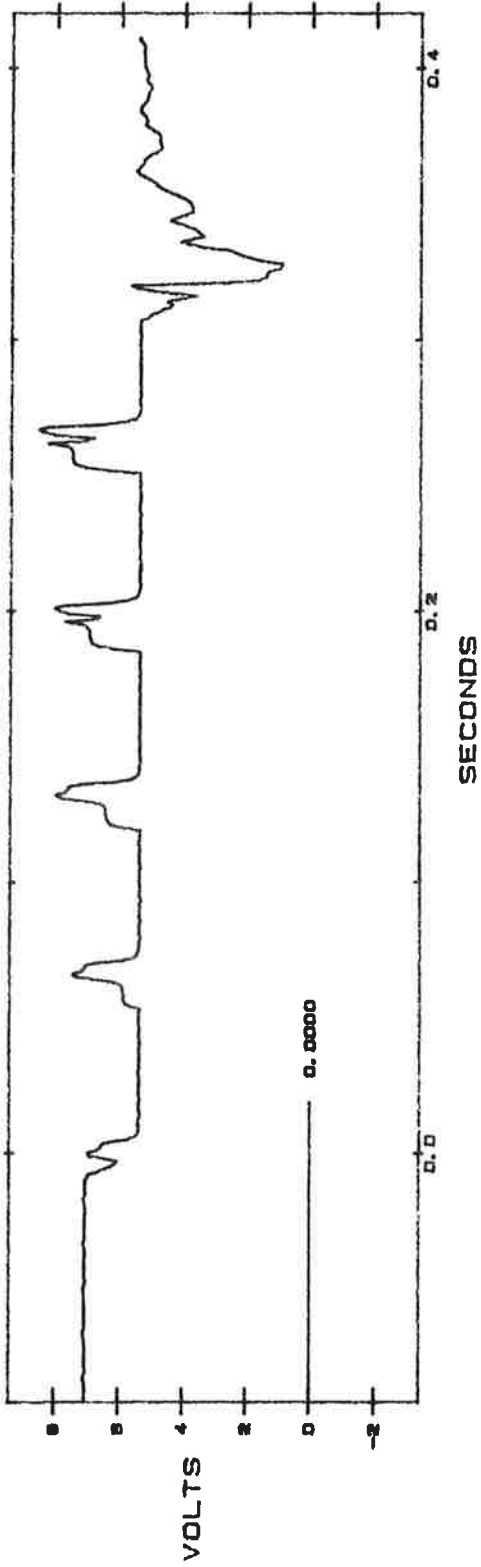


BUF. A2 UDIO

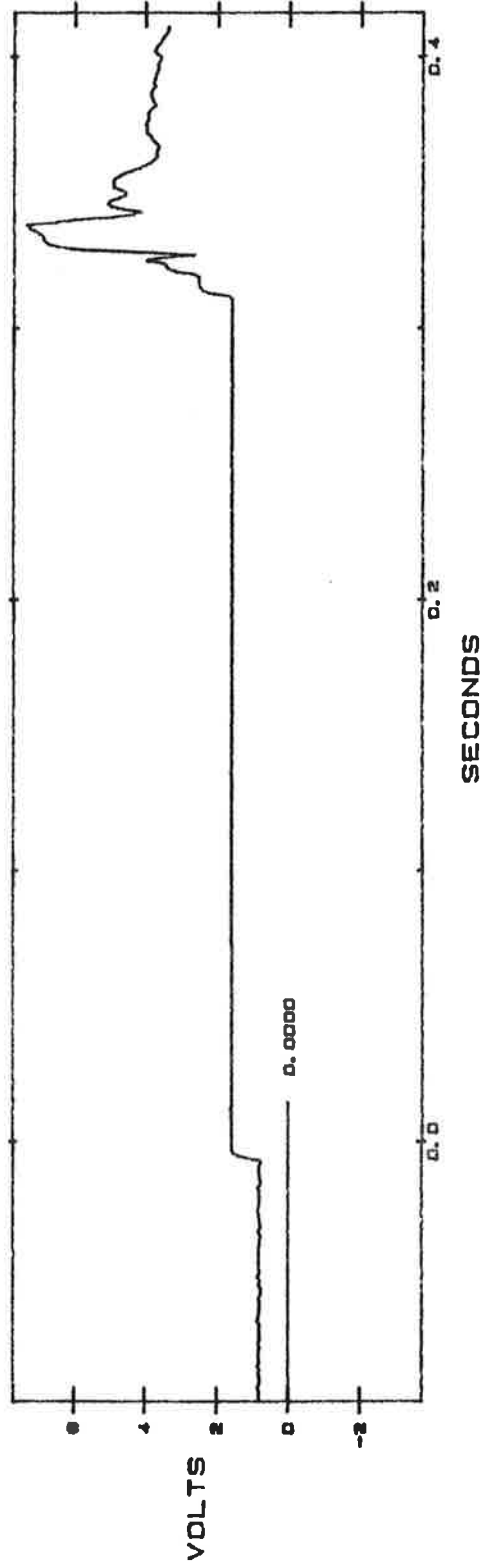


Modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 60,5 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
AC fel = 300 ms
Kortslutning till jord

BUF. A3 Alfa

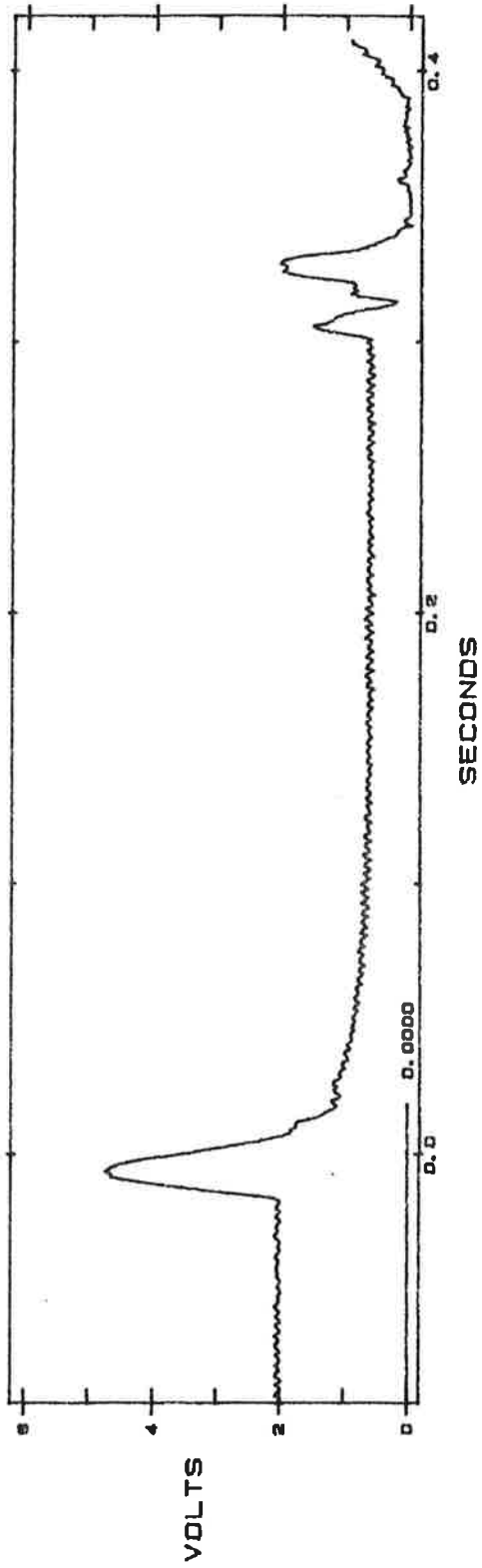


BUF. A4 Gamma

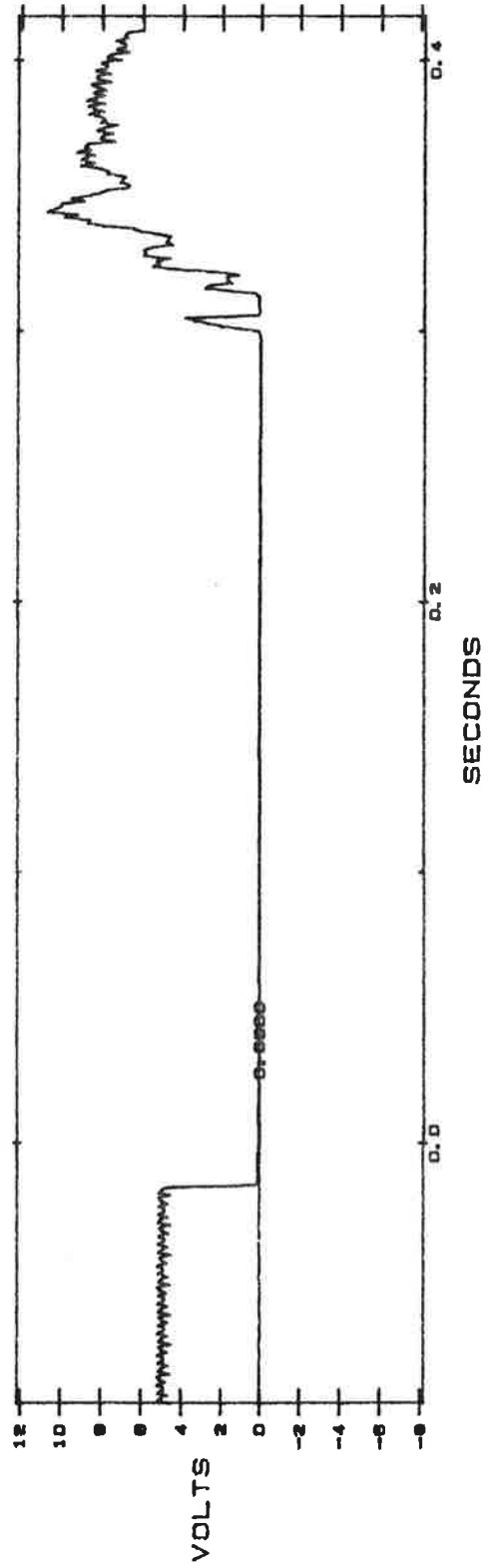


Ej modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 60,5 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
 AC fel = 300 ms
 Kortslutning till jord

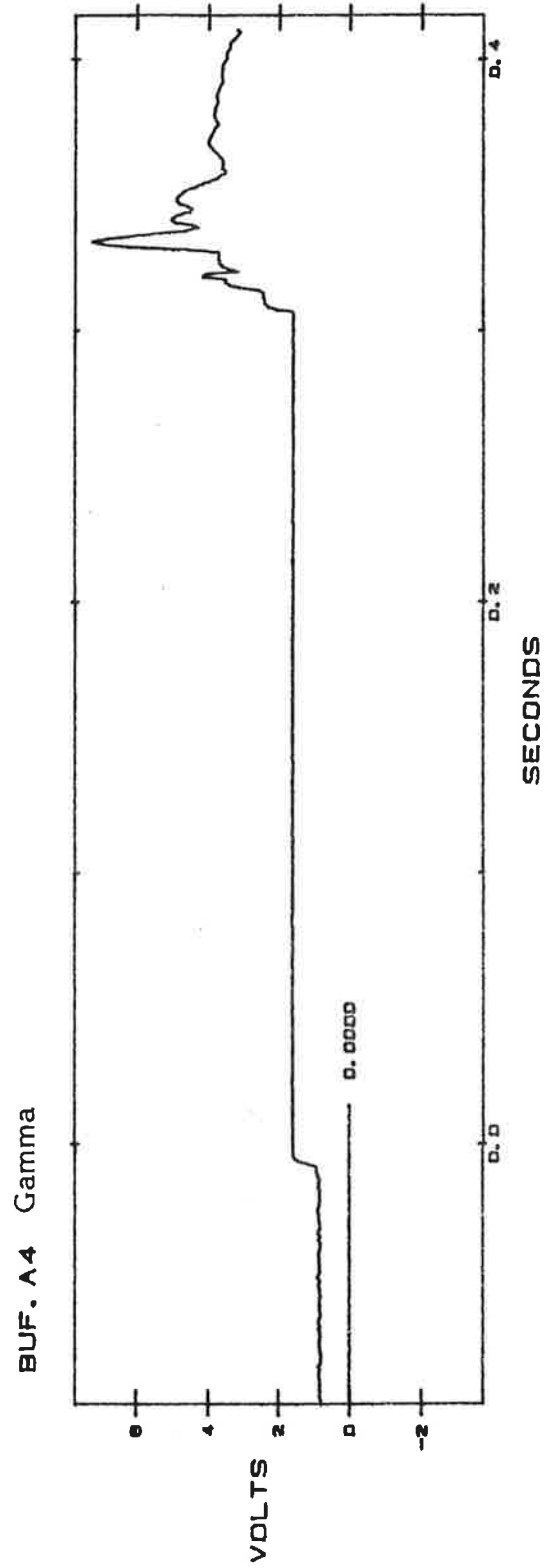
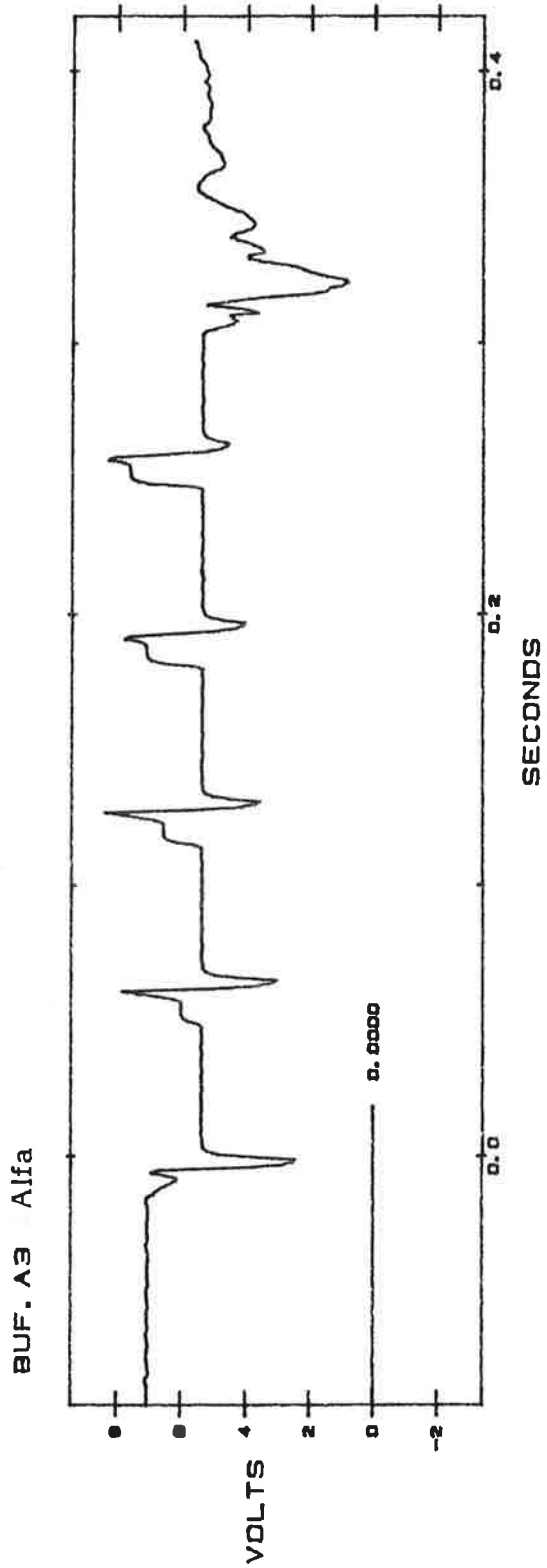
BUF. A1 Id pole



BUF. A2 UDIO

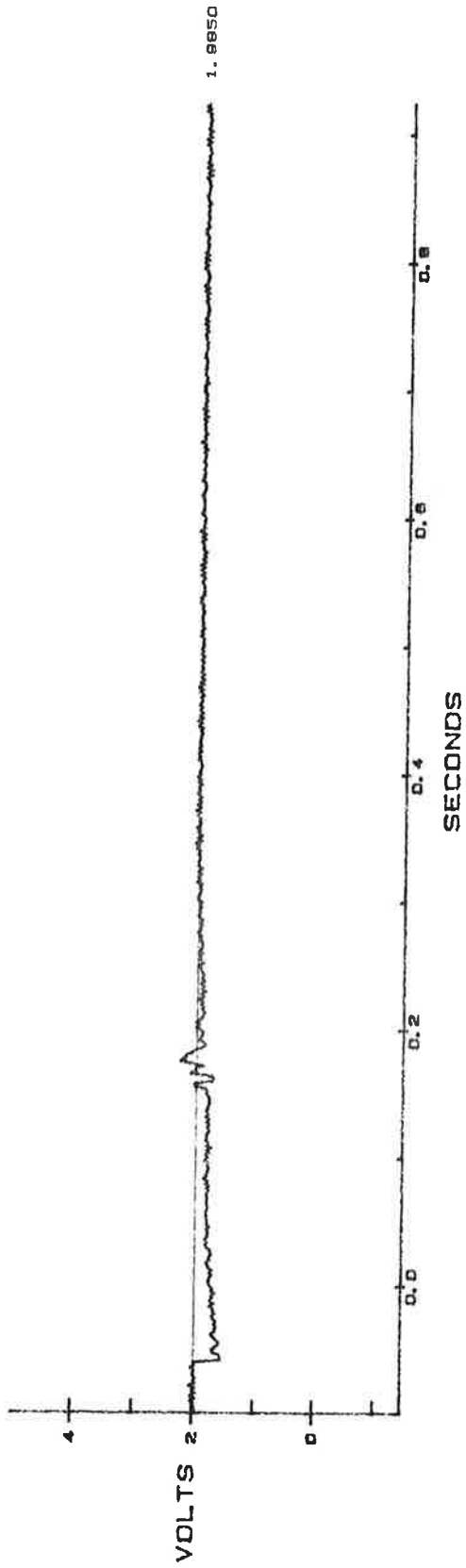


Ej modifierat kort
 $L_{\text{nät}} = 60,5 \text{ mH}$
 $dx = 8,4 \%$
AC fel = 300 ms
Kortslutning till jord

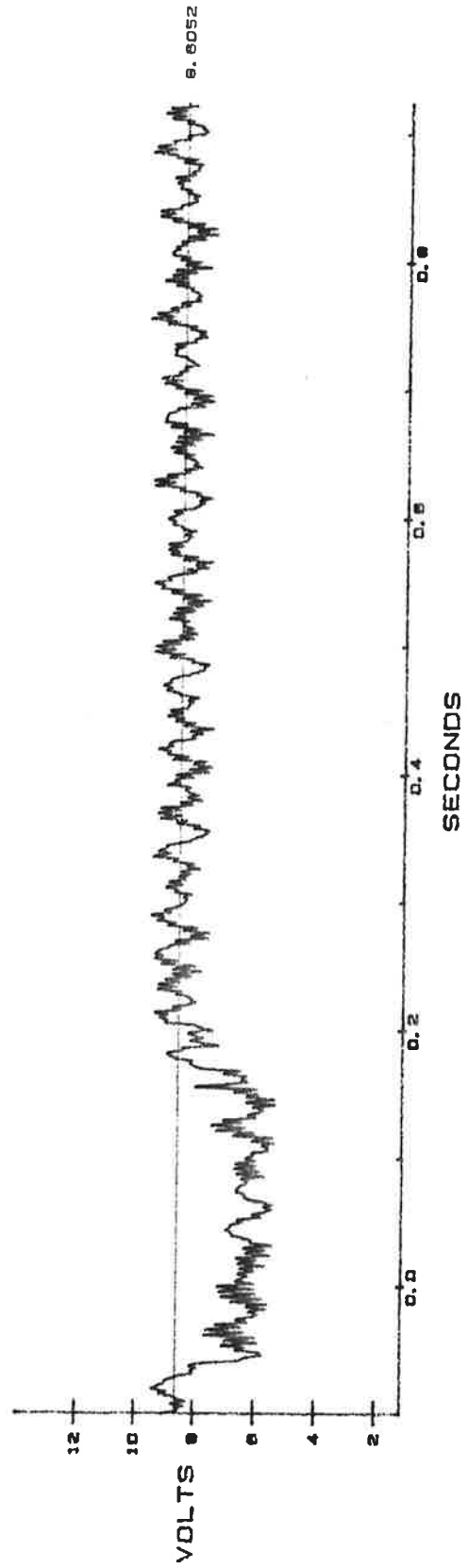


Modifierat kort
Fel i likriktarnät
Plot 1
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 200 ms

BUF. A1 Id pole

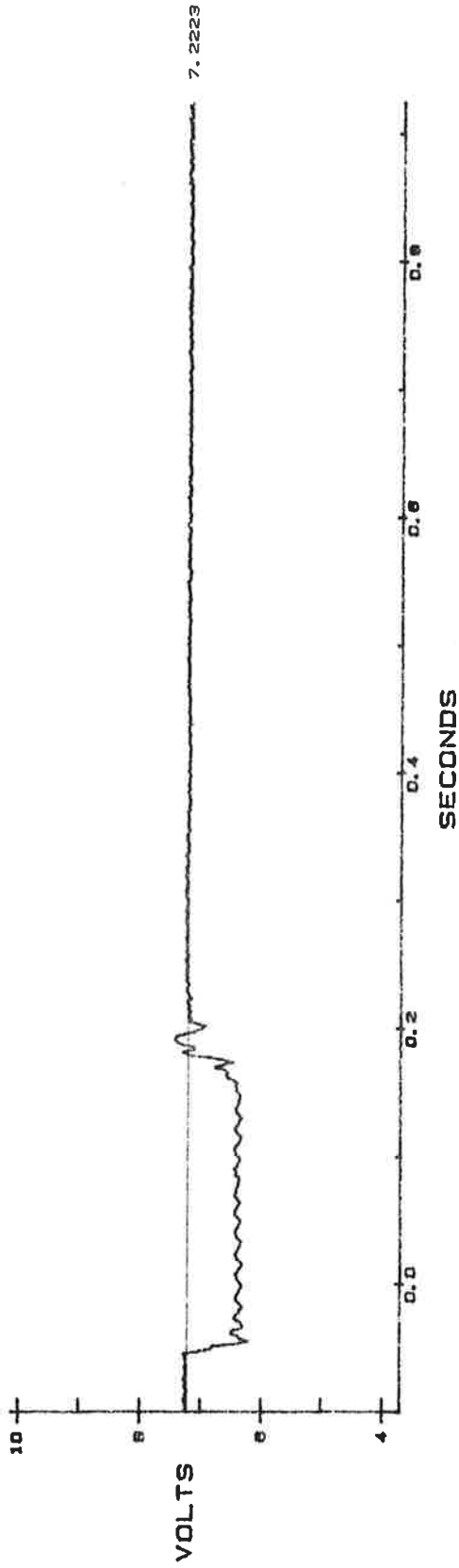


BUF. A2 UD

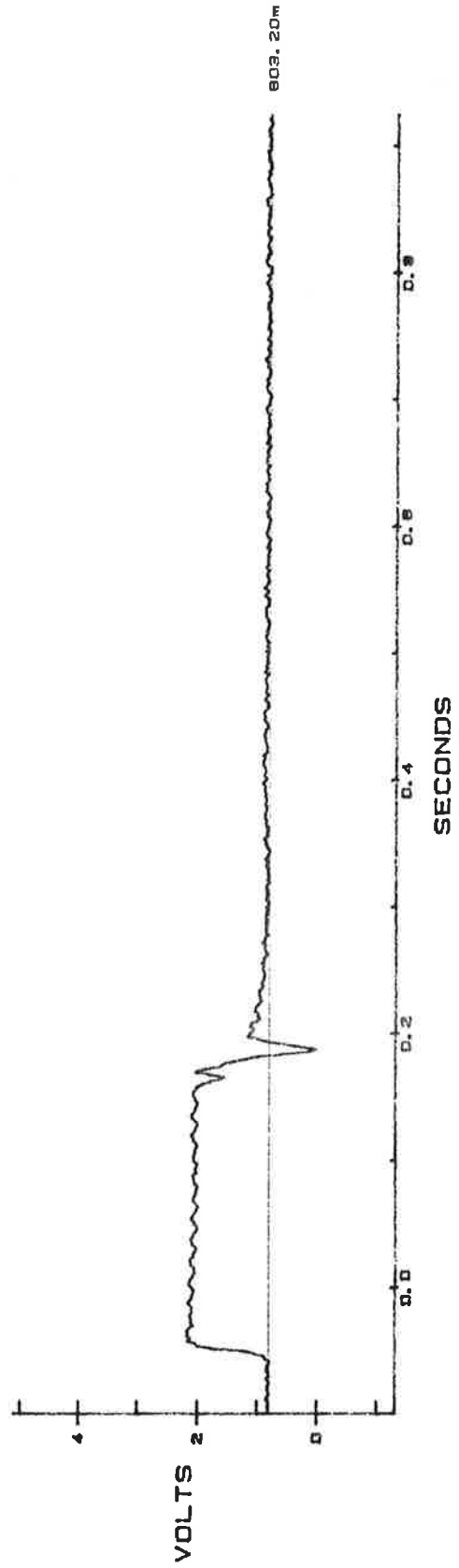


Modifierat kort
Fel i likriktarnät
Plot 1
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 200 ms

BUF. A3 Alfa

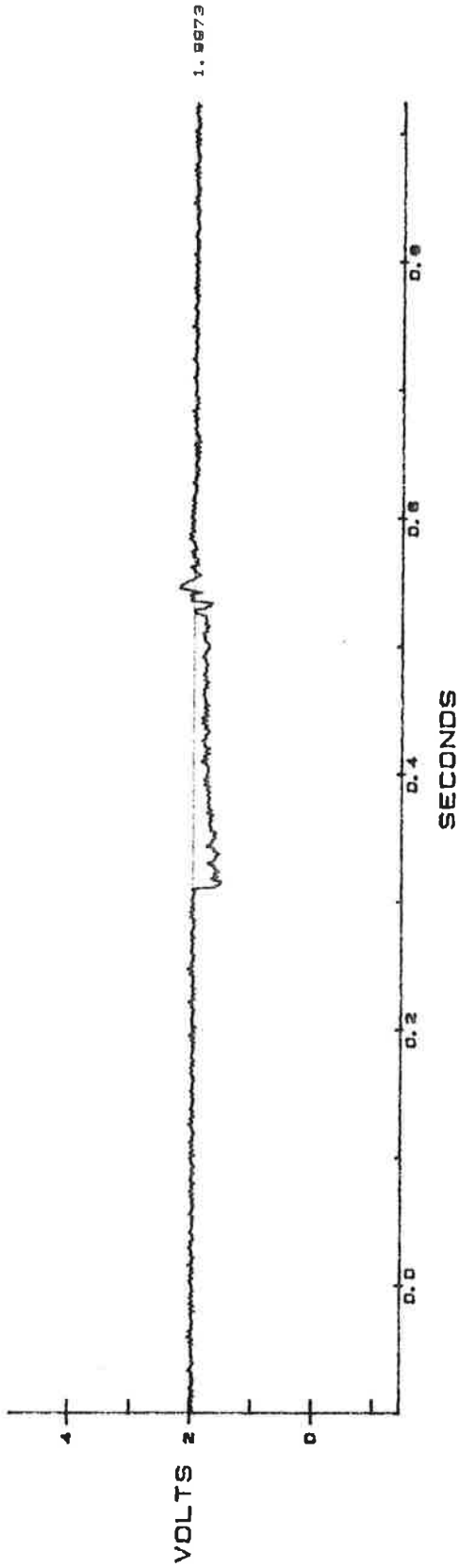


BUF. A4 Gamma

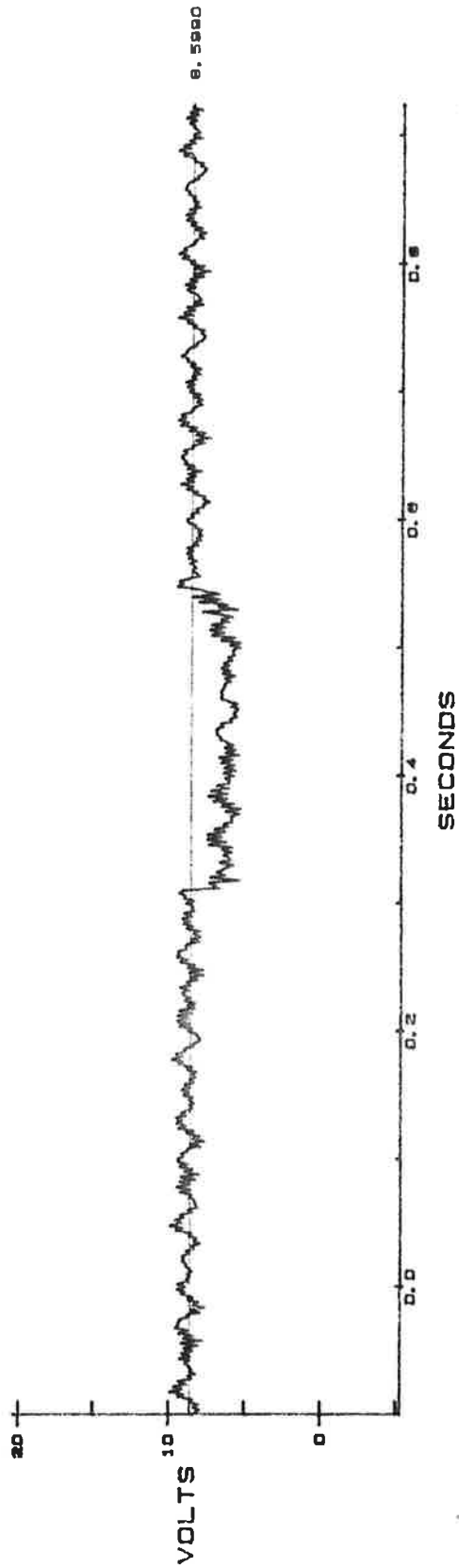


Ej modifierat kort
Fel i likriktarnät
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 200 ms

BUF. A1 Id pole

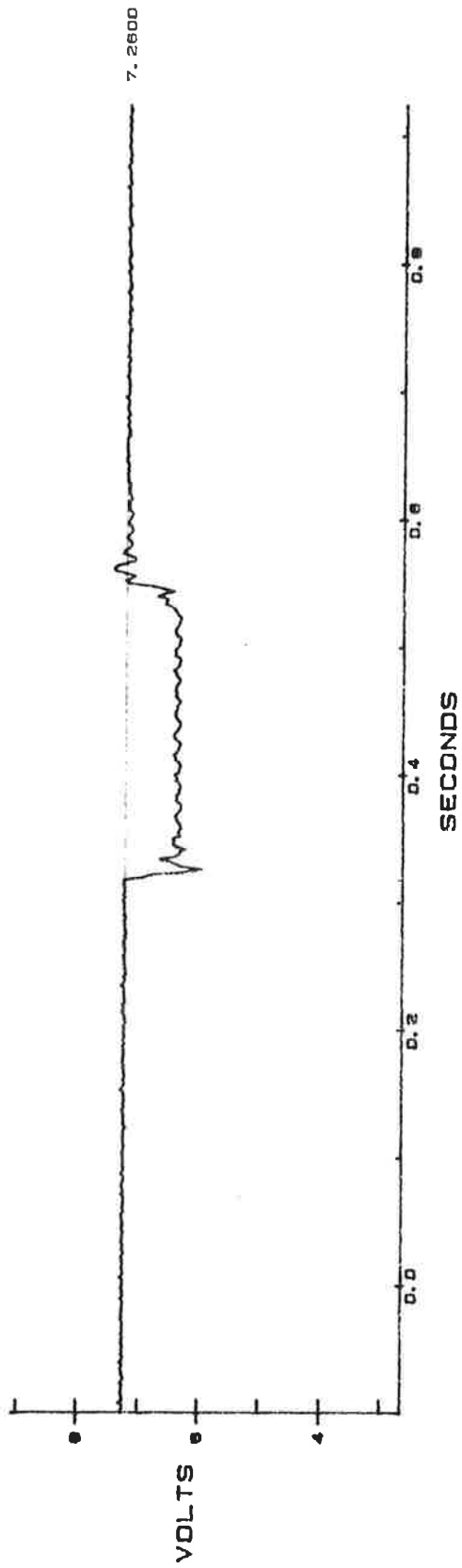


BUF. A2 UD

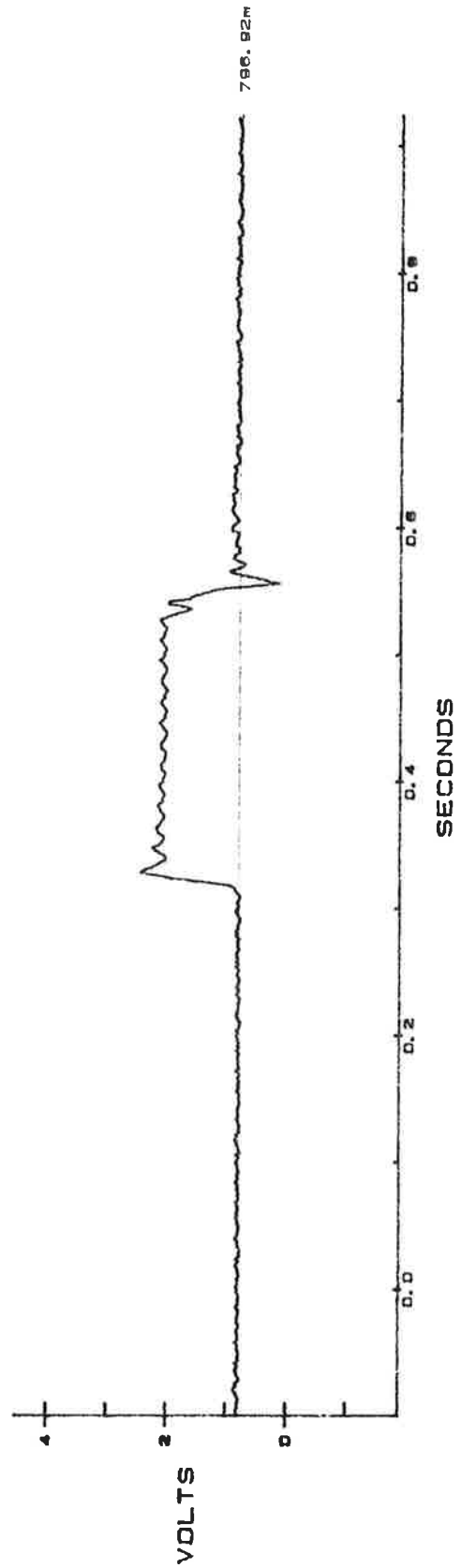


Ej modifierat kort
Fel i likriktarnät
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 200 ms

BUF. A3 Alfa

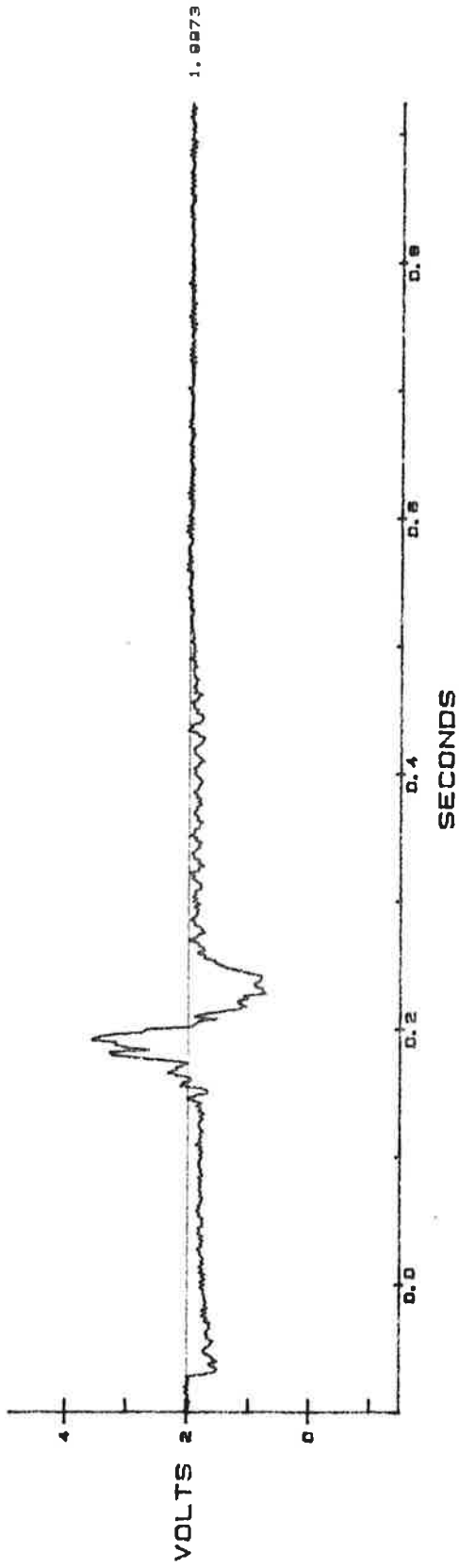


BUF. A4 Gamma

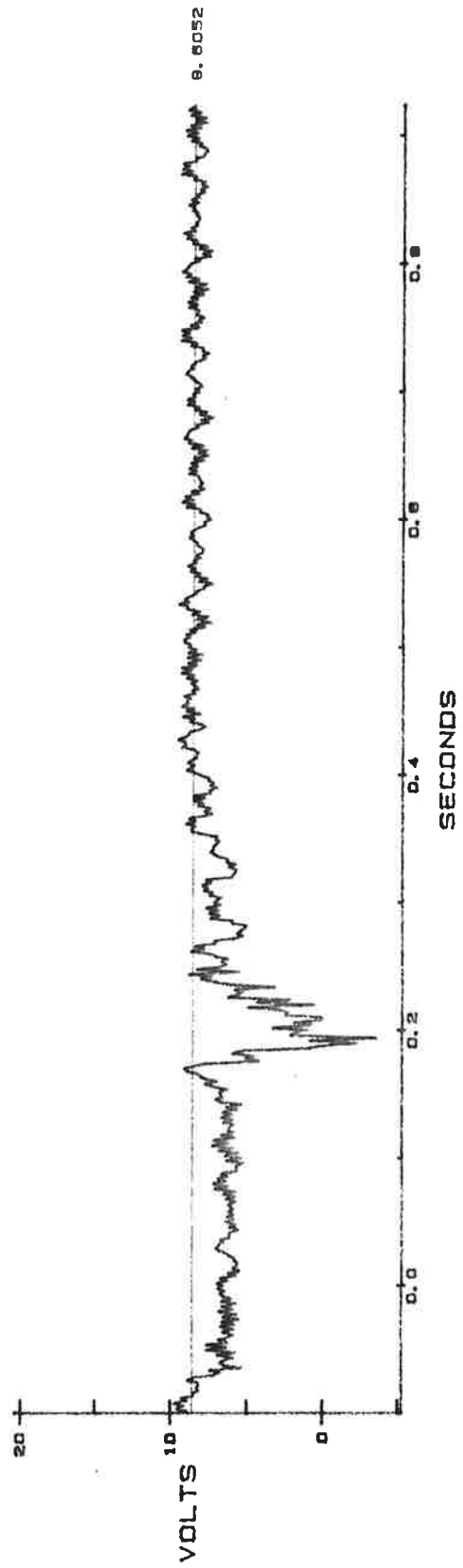


Modifierat kort
Fel i likriktarnät
Plot 2
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 200 ms

BUF. A1 Id pole

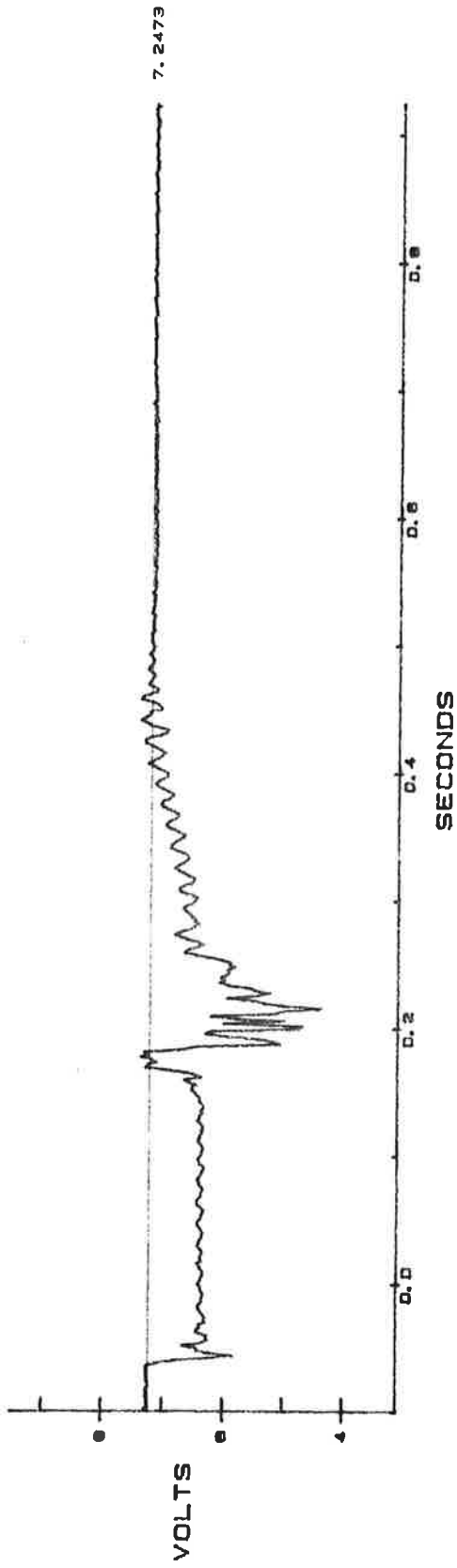


BUF. A2 UD

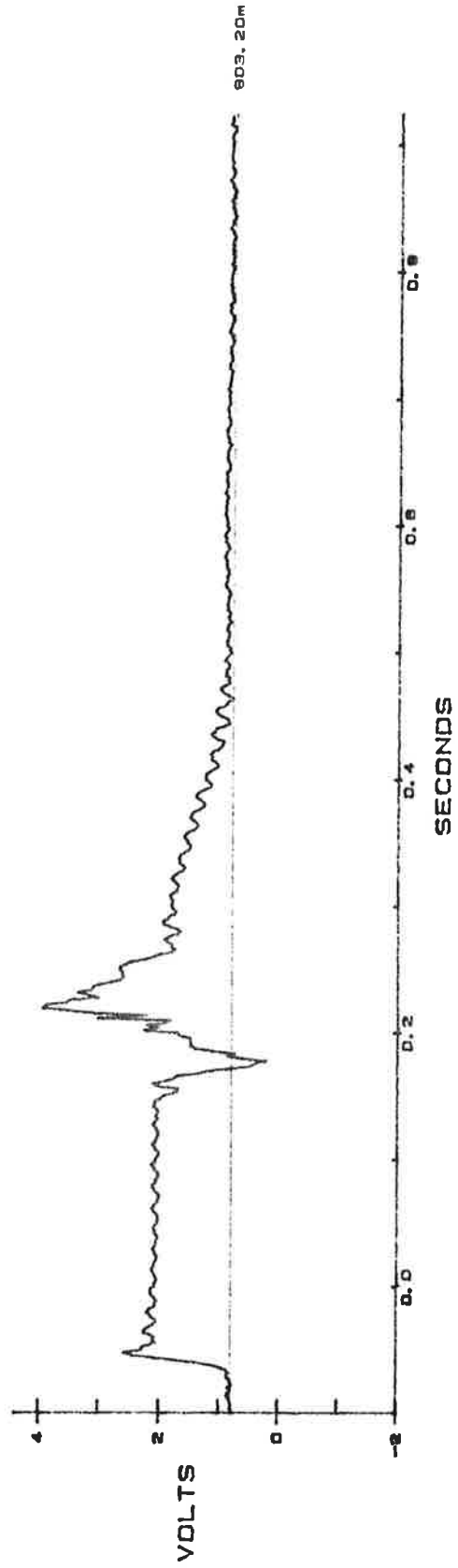


Modifierat kort
Fel i likriktarnät
Plot 2
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 200 ms

BUF. A3 Alfa

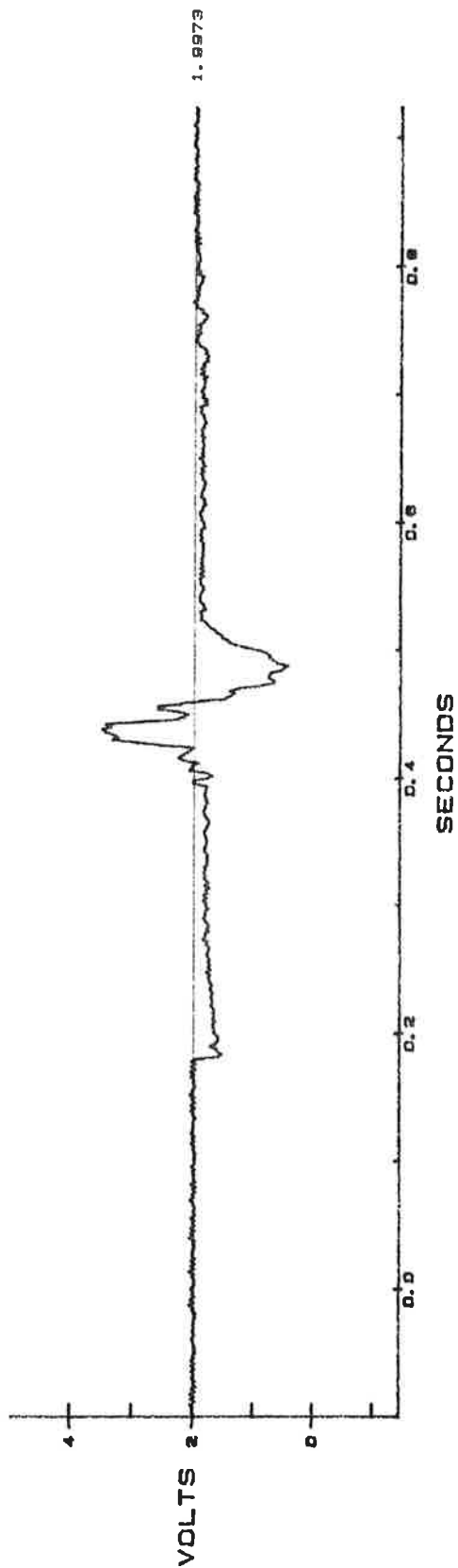


BUF. A4 Gamma

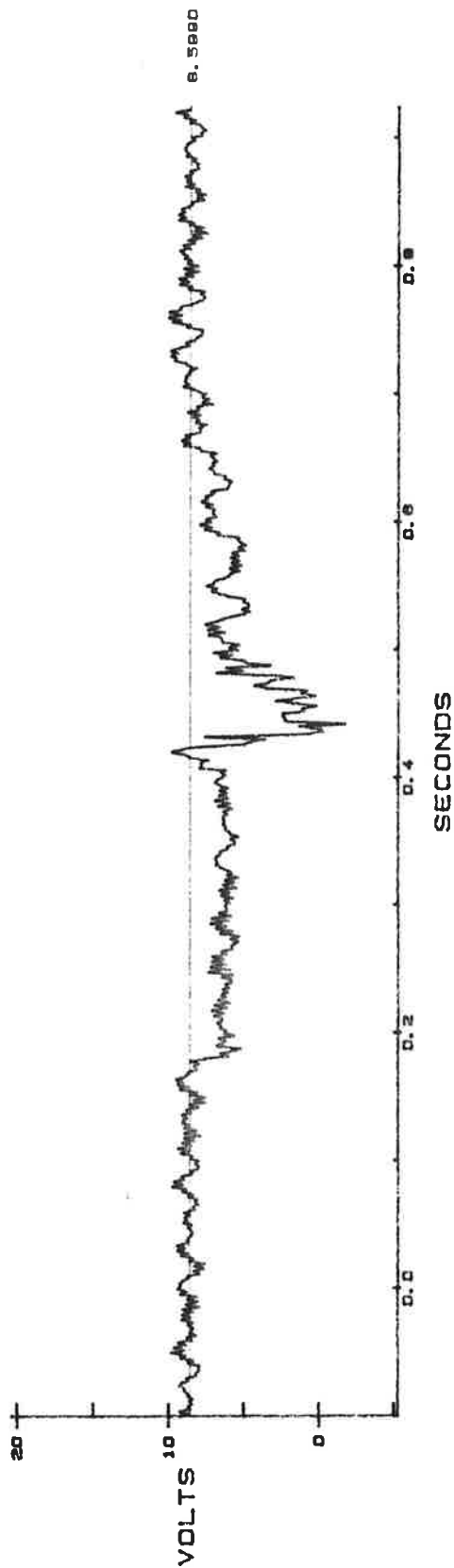


Ej modifierat kort
Fel i likriktarnät
Plot 2
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 200 ms

BUF. A1 Id pole

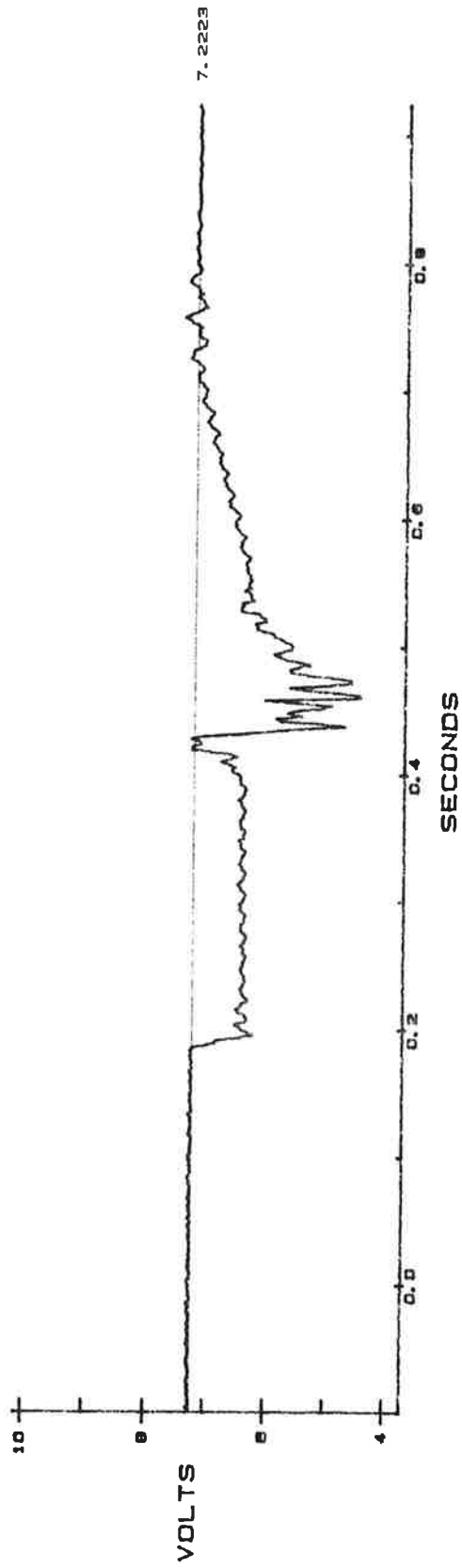


BUF. A2 UD

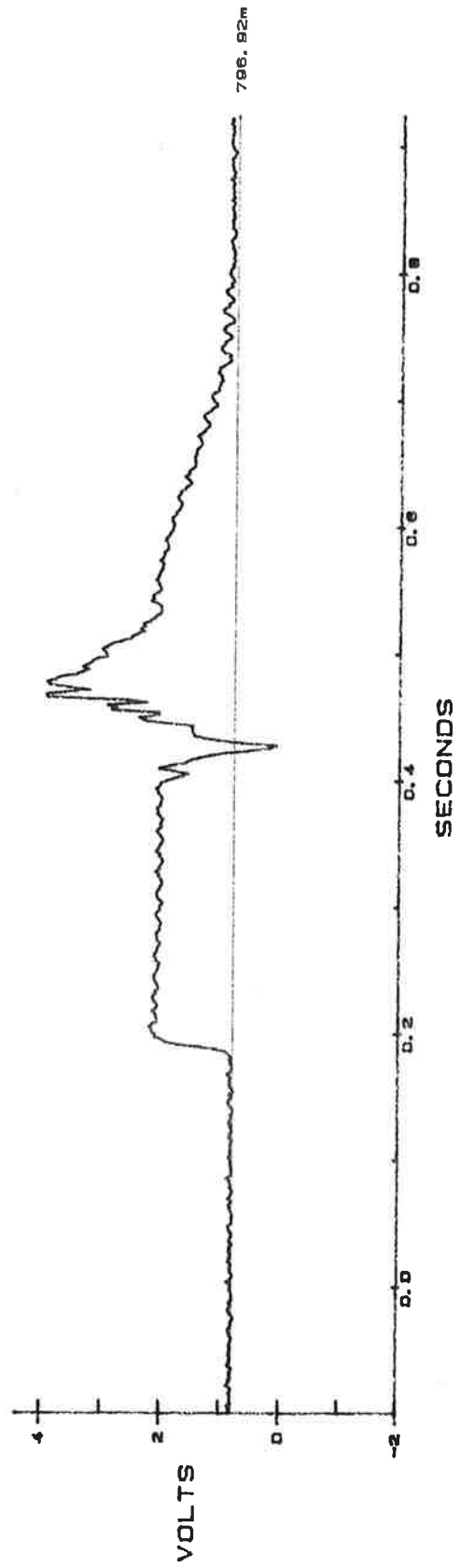


Ej modifierat kort
Fel i likriktarnät
Plot 2
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 200 ms

BUF. A3 Alfa

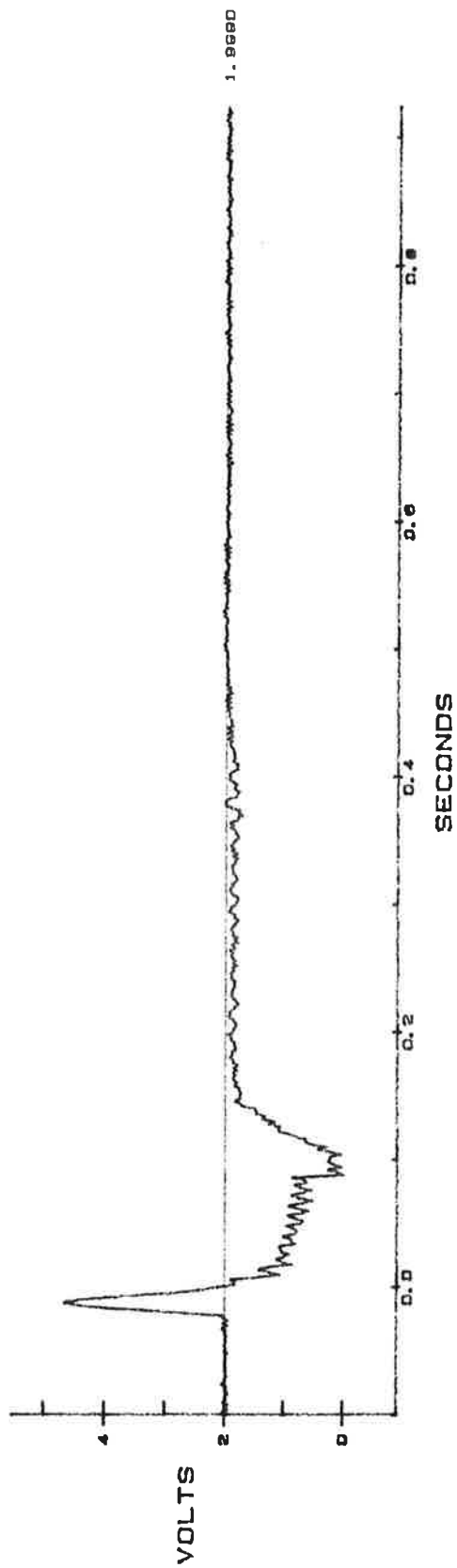


BUF. A4 Gamma

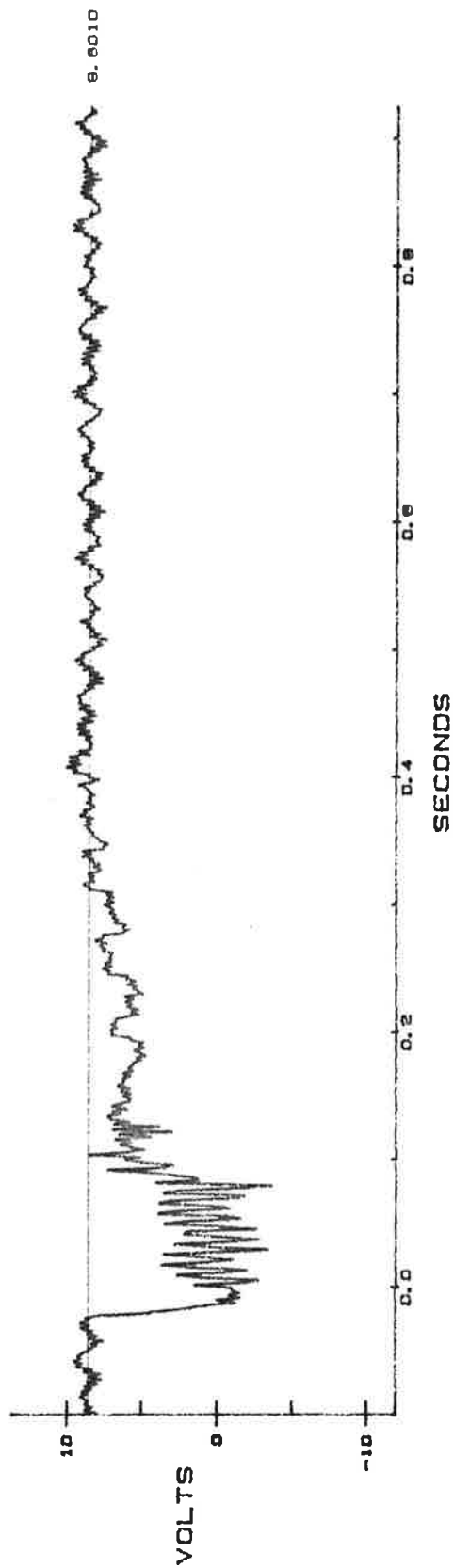


Modifierat kort
Enfas jordfel i växelriktaren
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 75 ms

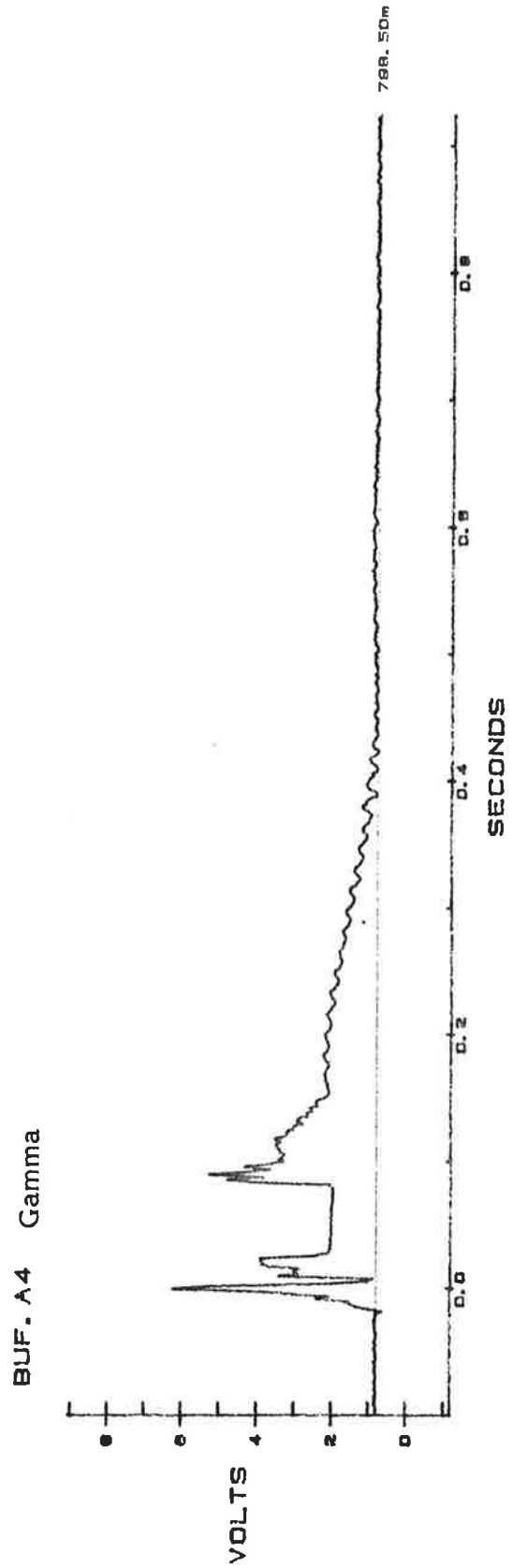
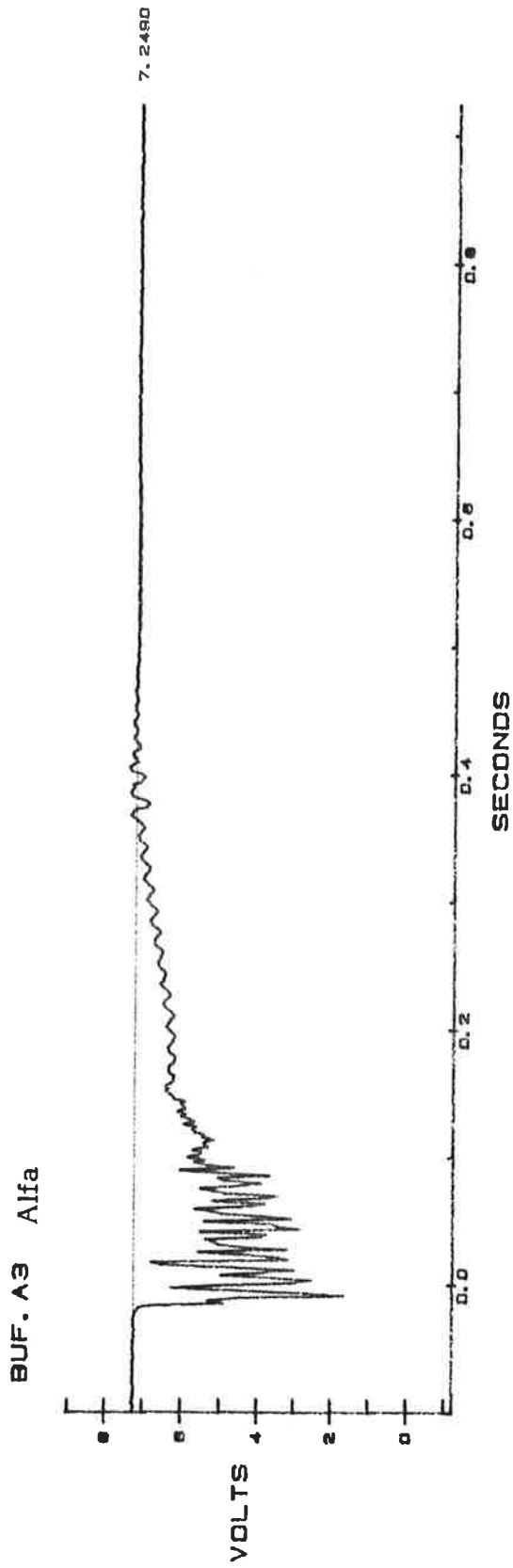
BUF. A1 Id pole



BUF. A2 UD

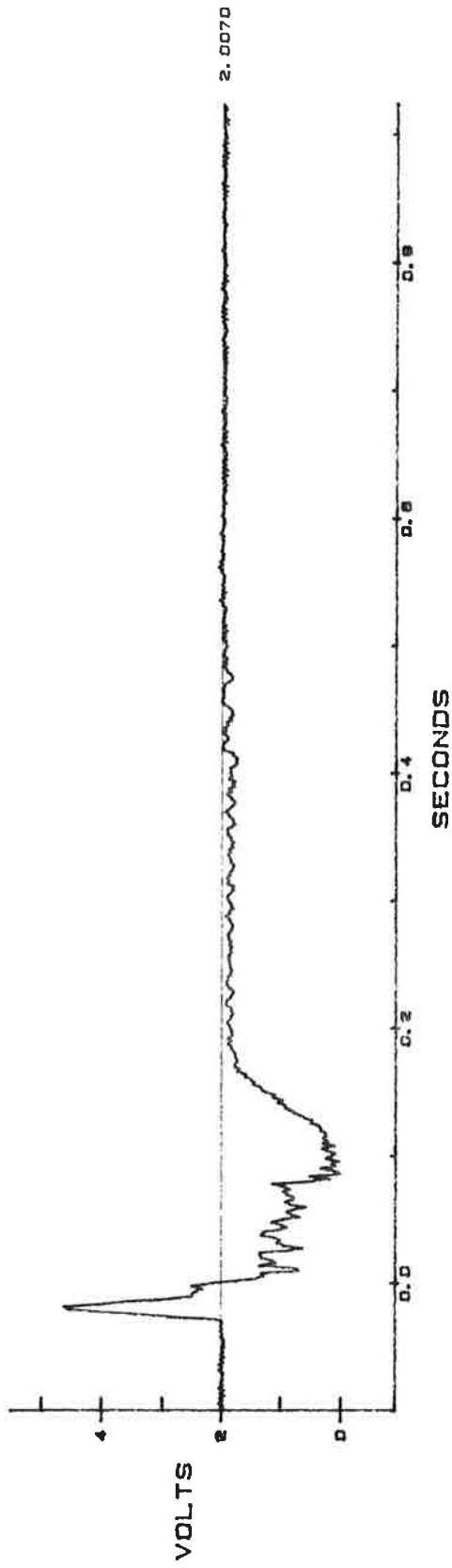


Modifierat kort
Enfas jordfel i växelriktaren
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 75 ms

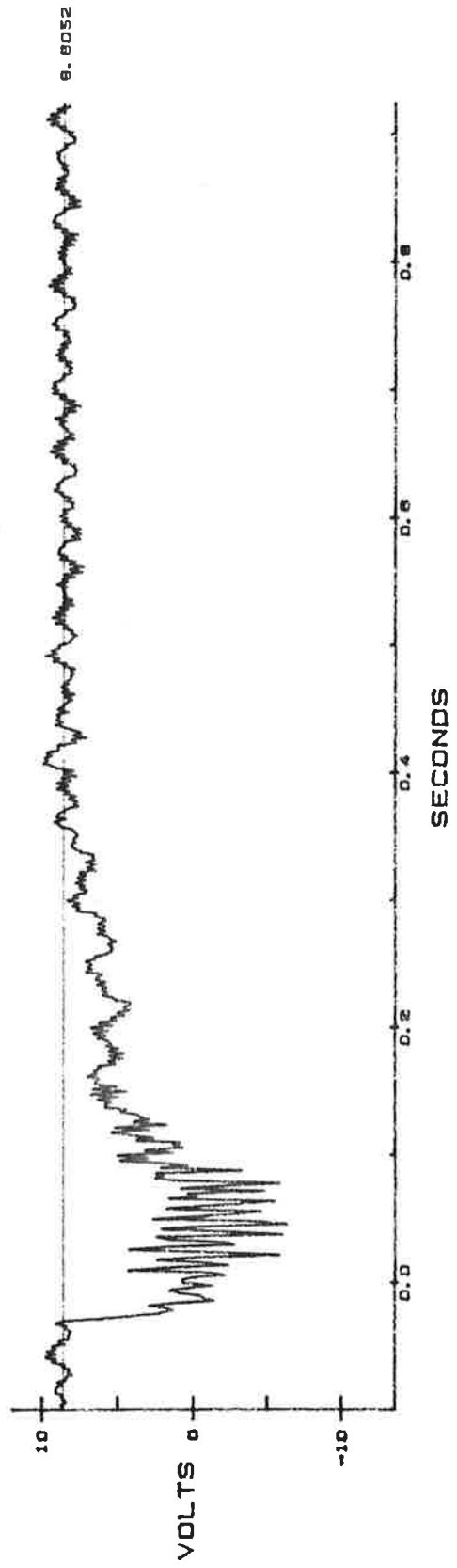


Ej modifierat kort
Enfas jordfel i växelriktaren
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 75 ms

BUF. A1 Id pole

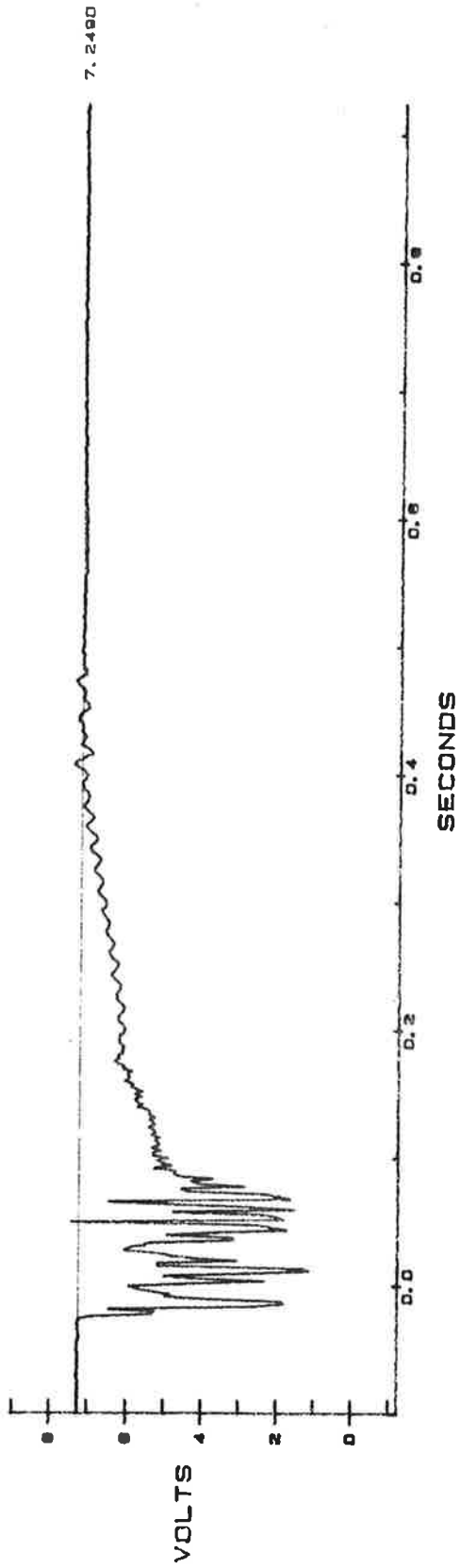


BUF. A2 Ud

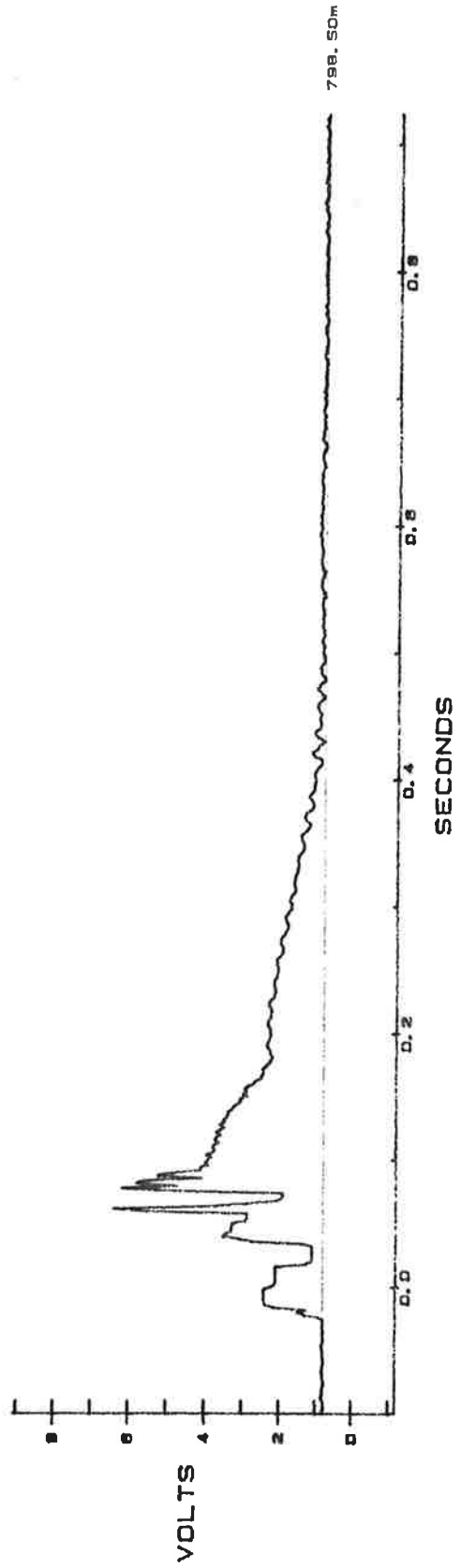


Ej modifierat kort
Enfas jordfel i växelriktaren
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 75 ms

BUF. A3 Alfa

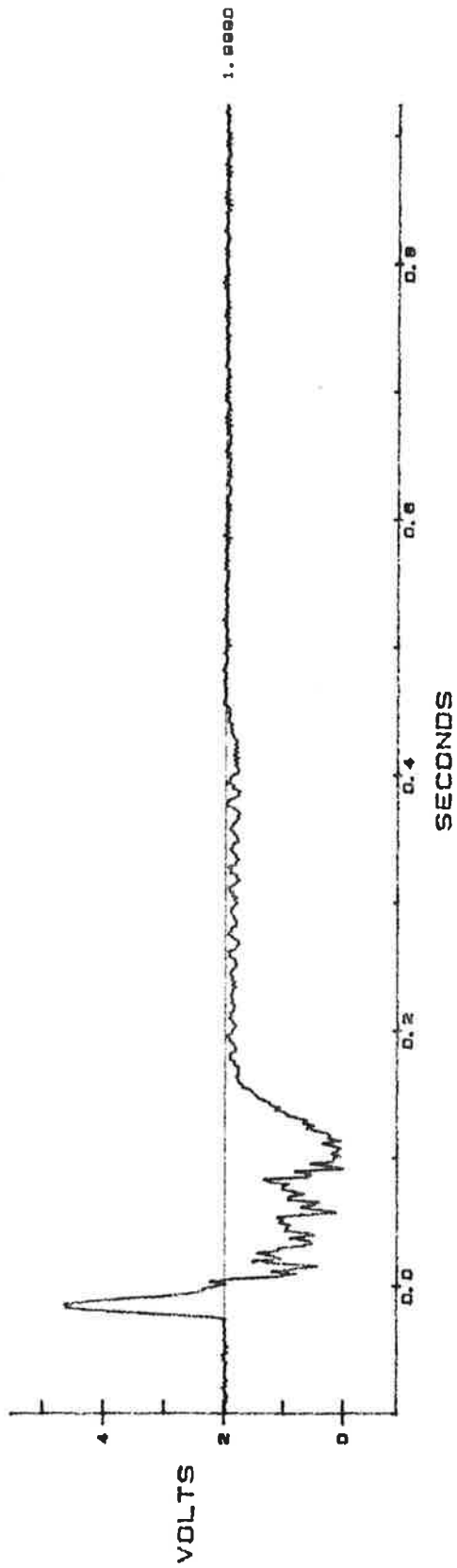


BUF. A4 Gamma

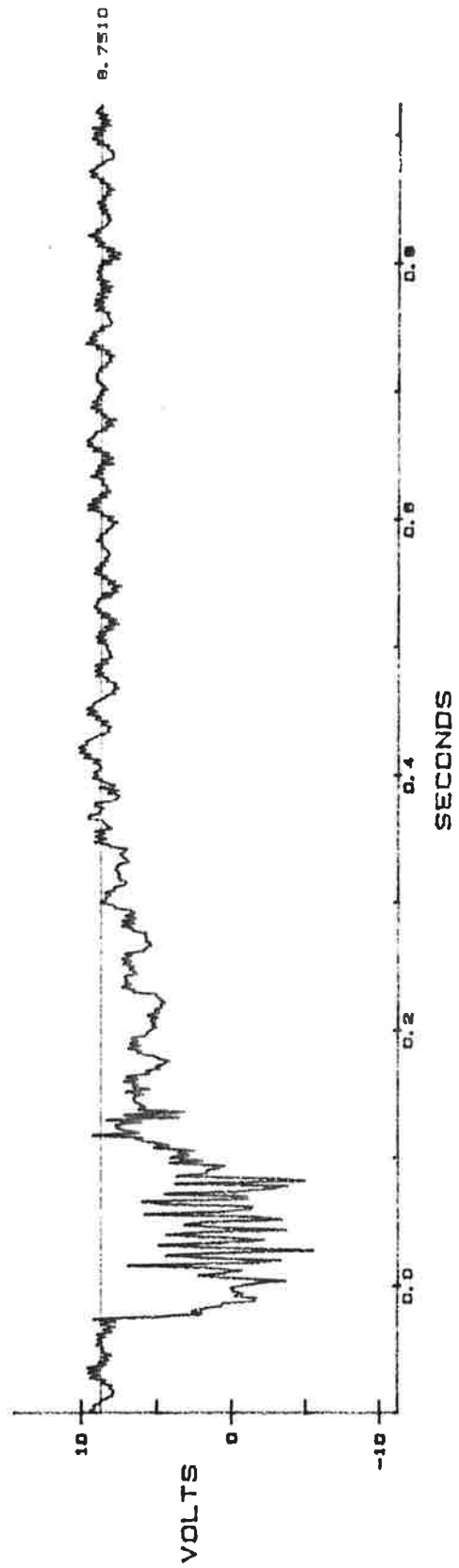


Modifierat kort
Enfas jordfel i växelriktaren
 $L_{\text{nät}} = 60,5 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 75 ms

BUF. A1 Id pole

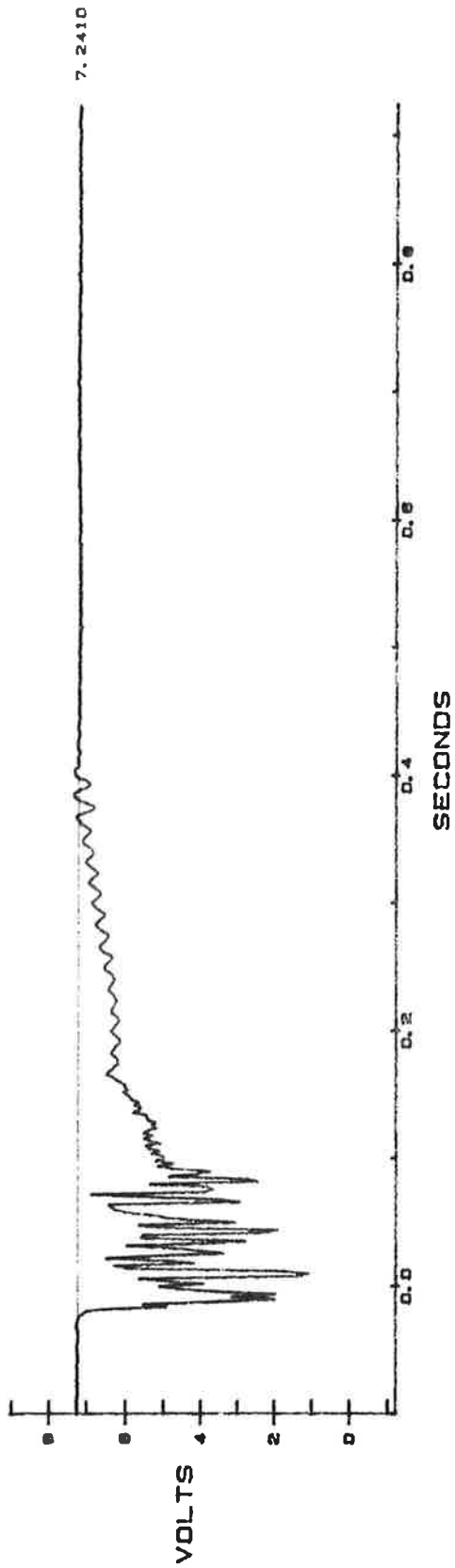


BUF. A2 UD

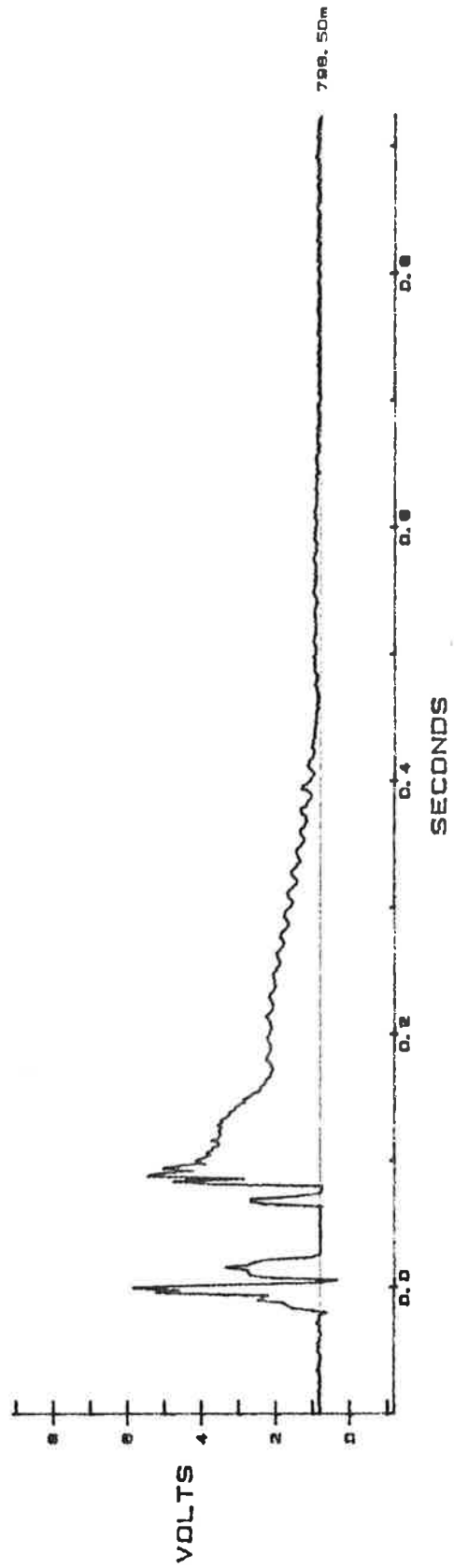


Modifierat kort
Enfas jordfel i växelriktaren
 $L_{\text{nät}} = 60,5 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 75 ms

BUF. A3 Alfa

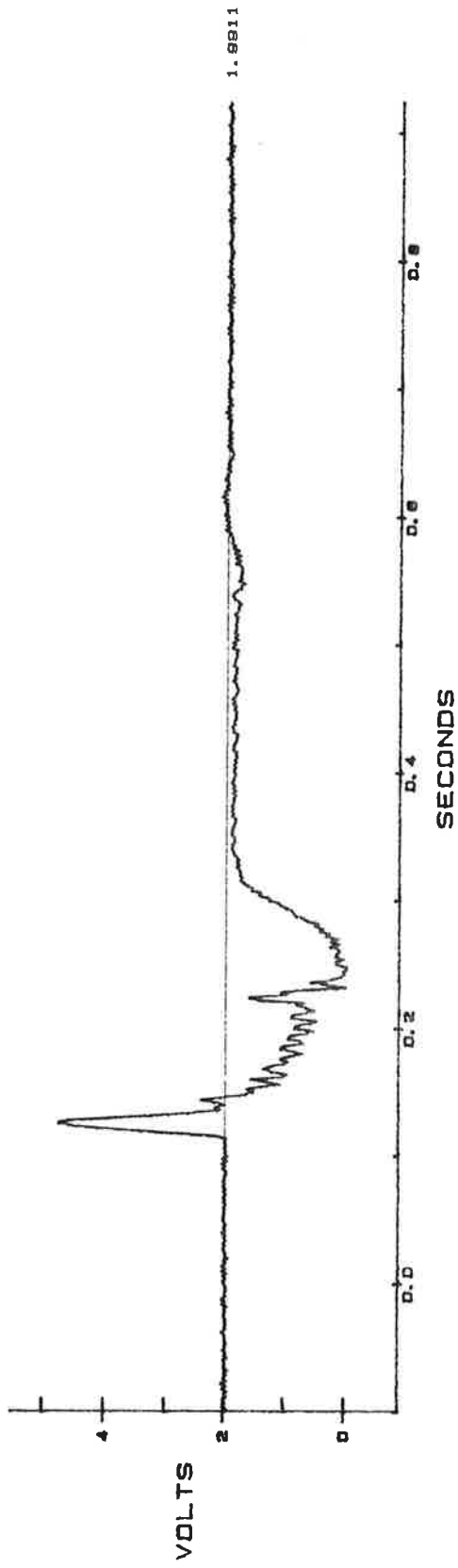


BUF. A4 Gamma

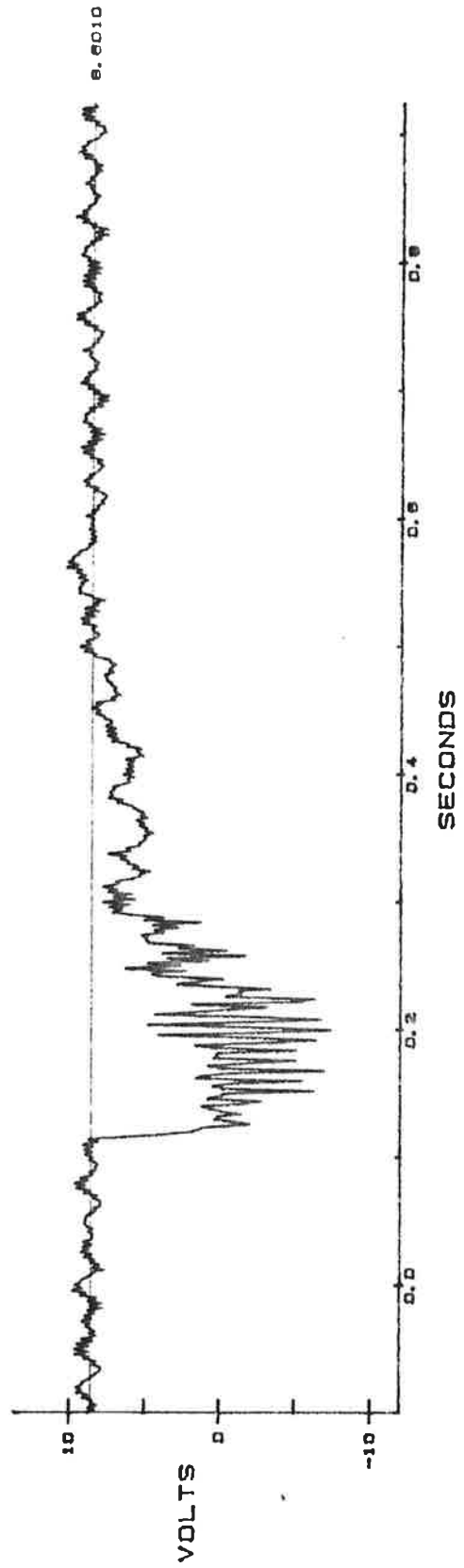


Ej modifierat kort
Enfas jordfel i växelriktaren
 $L_{\text{nät}} = 60,5 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 75 ms

BUF. A1 Id pole

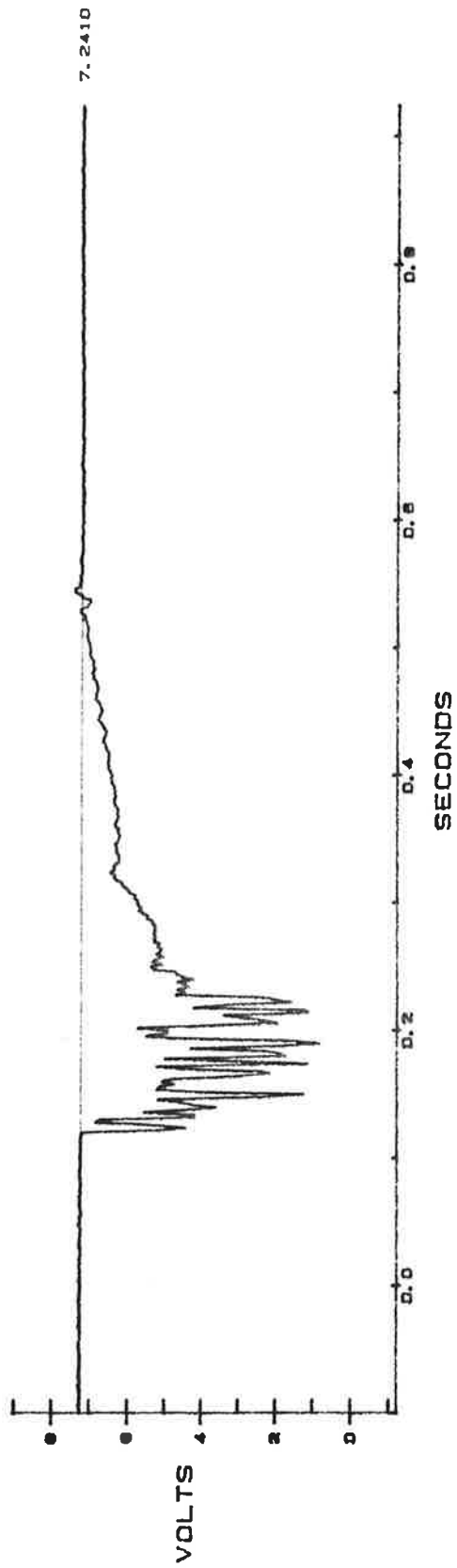


BUF. A2 UD

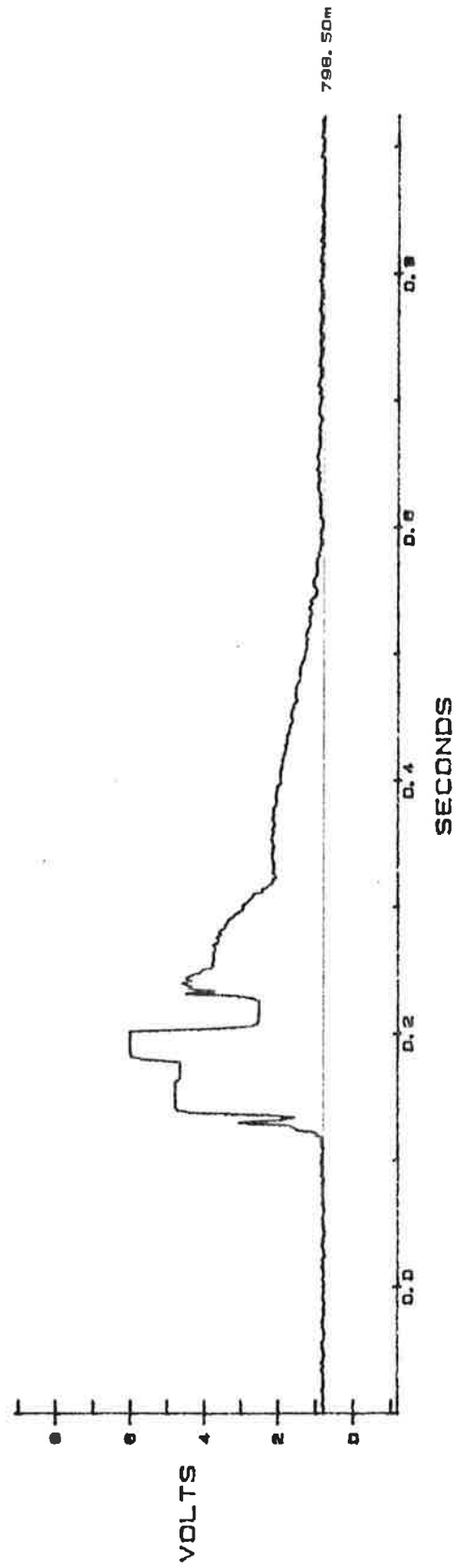


Ej modifierat kort
Enfas jordfel i växelriktaren
 $L_{\text{nät}} = 60,5 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$
Feltid = 75 ms

BUF. A3 Alfa

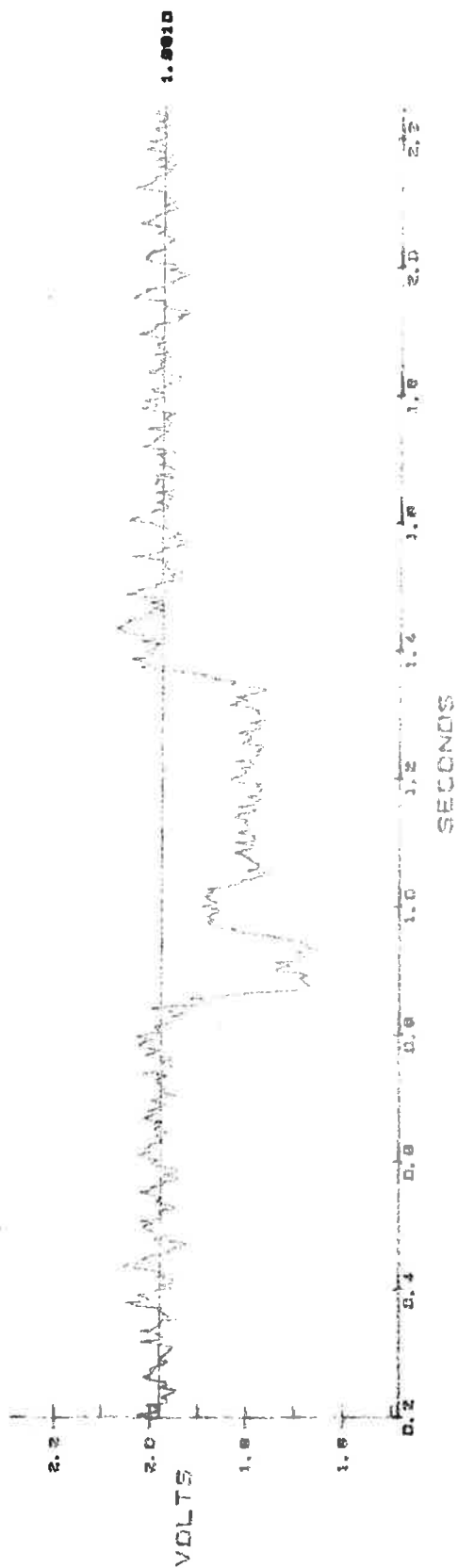


BUF. A4 Gamma



Modifiat kort
10 steg 100 → 90 %, 90 → 100 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 10,8 \%$

BUF. A1 Id pole



BUF. A2 UDIO

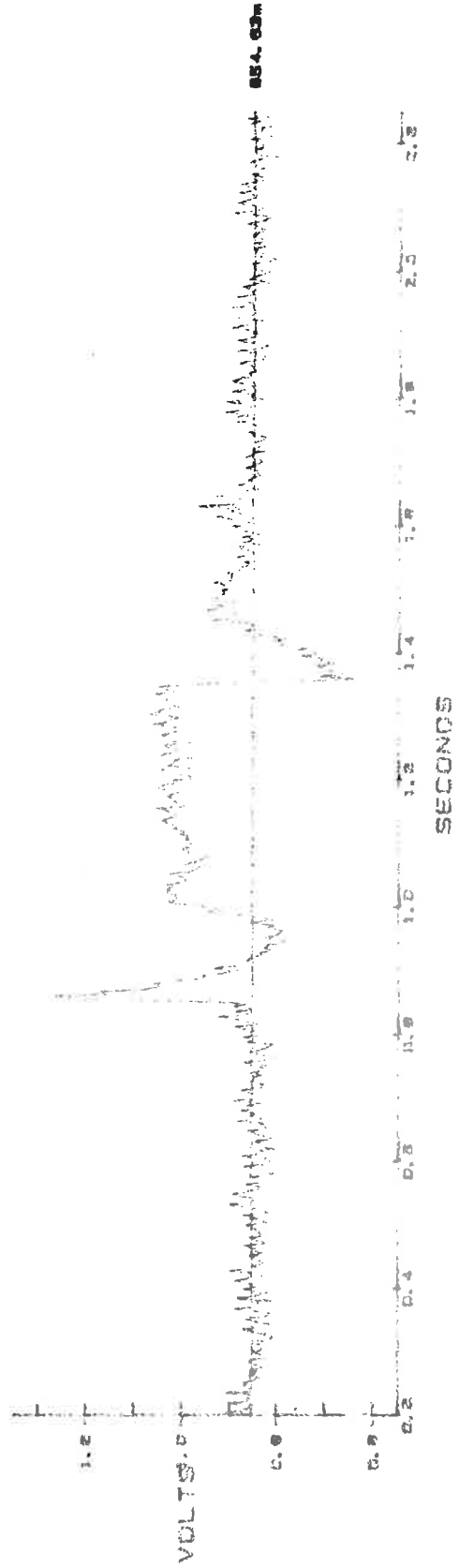


Modifierat kort
IO steg 100 → 90 %, 90 → 100 %
L_{nät} = 50 mH
dx = 10,8 %

BUF. A3 Alfa

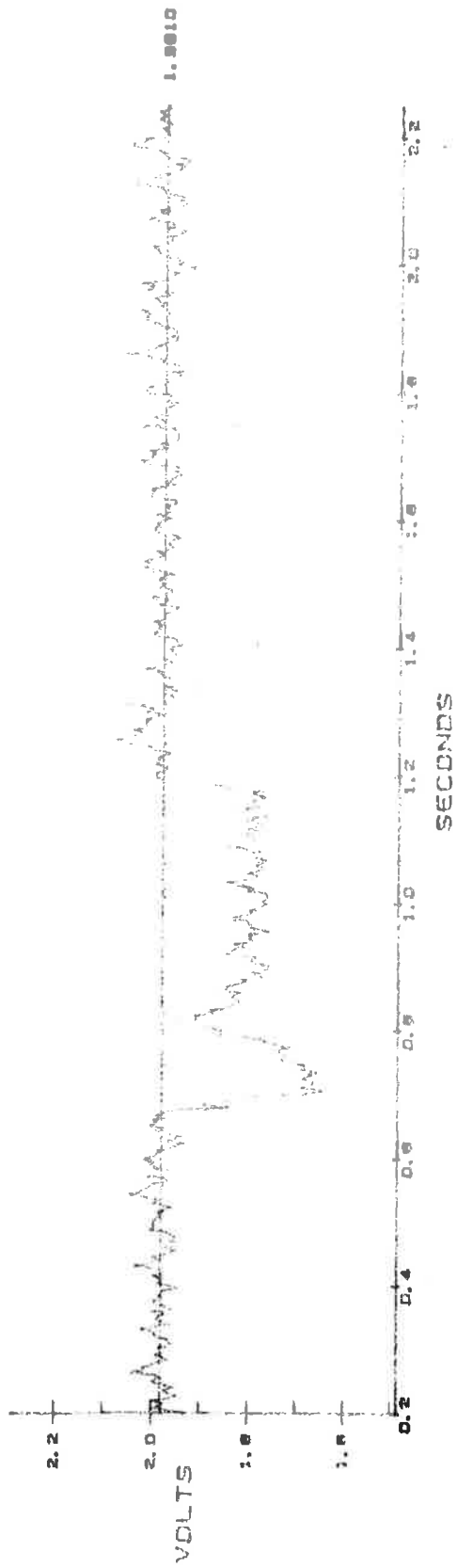


BUF. A4 Gamma



Ej modifierat kort
IO steg 100 → 90 %, 90 → 100 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 10,8 \%$

BUF. A1 Id pole

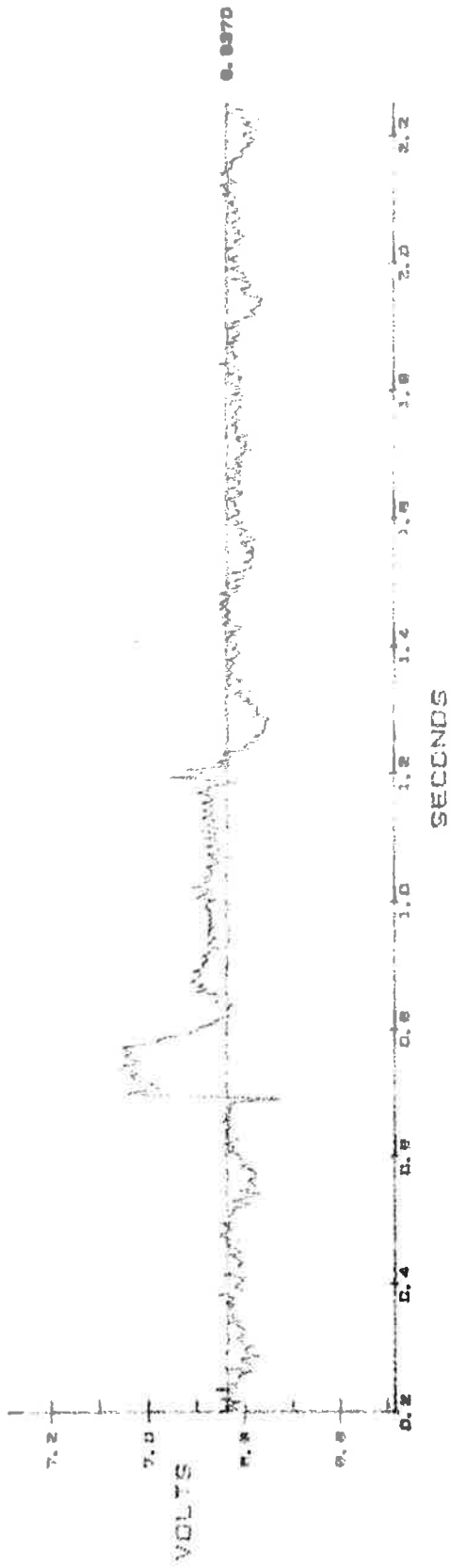


BUF. A2 UDIO



Ej modifierat kort
10 steg 100 → 90 %, 90 → 100 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 10,8 \%$

BUF. A3 Alfa



BUF. A4 Gamma



Modifierat kort
I0 steg 100 → 110 %, 110 → 100 %

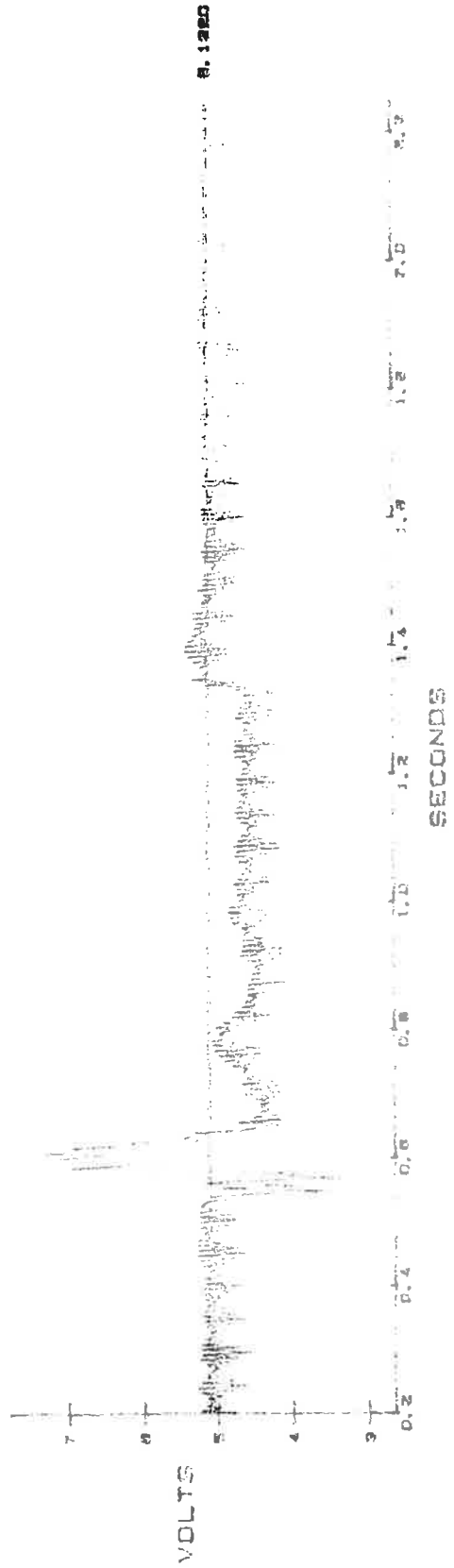
$L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$

$dx = 10,8 \%$

BUF. A1 Id pole



BUF. A2 UDIO

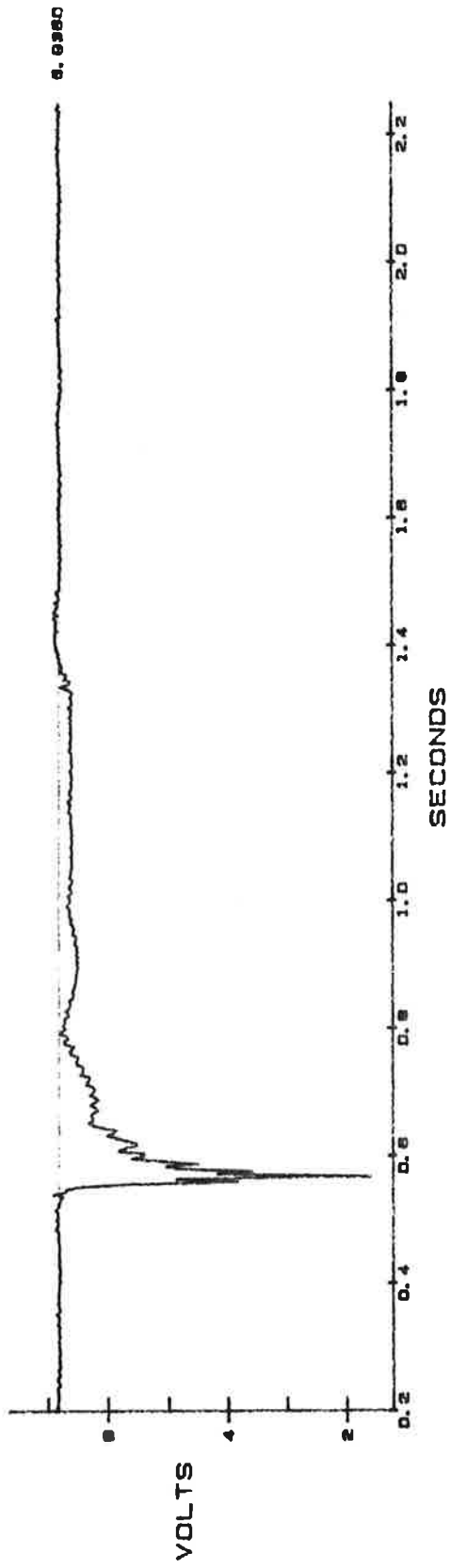


Modifierat kort
10 steg 100 → 110 %, 110 → 100 %

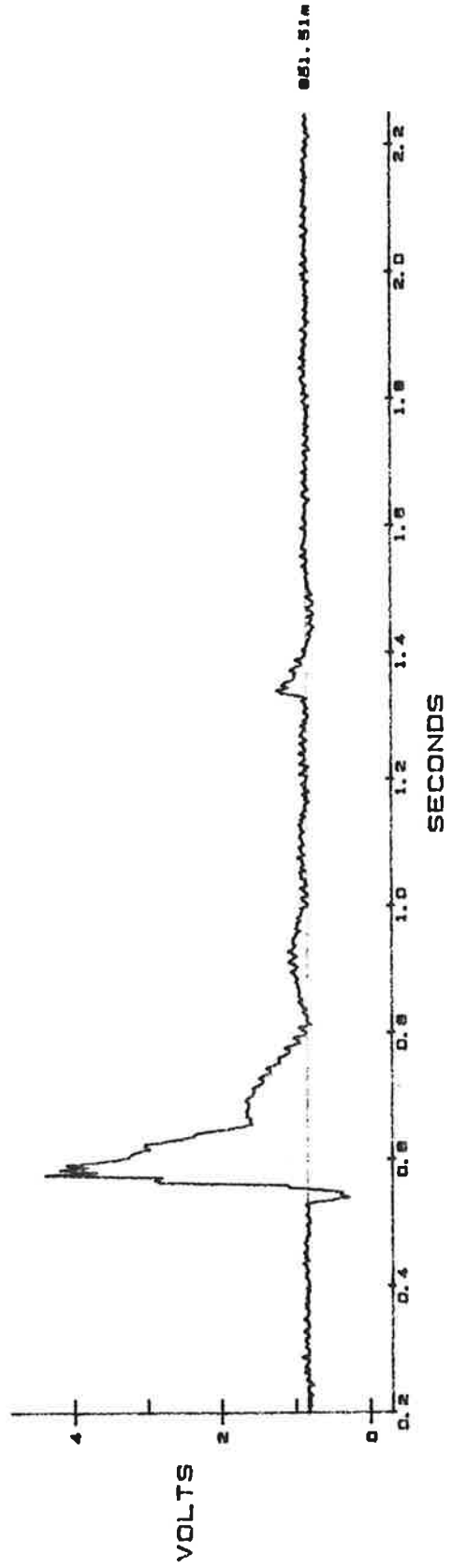
$L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$

$dx = 10,8 \%$

BUF. A3 Alfa



BUF. A4 Gamma

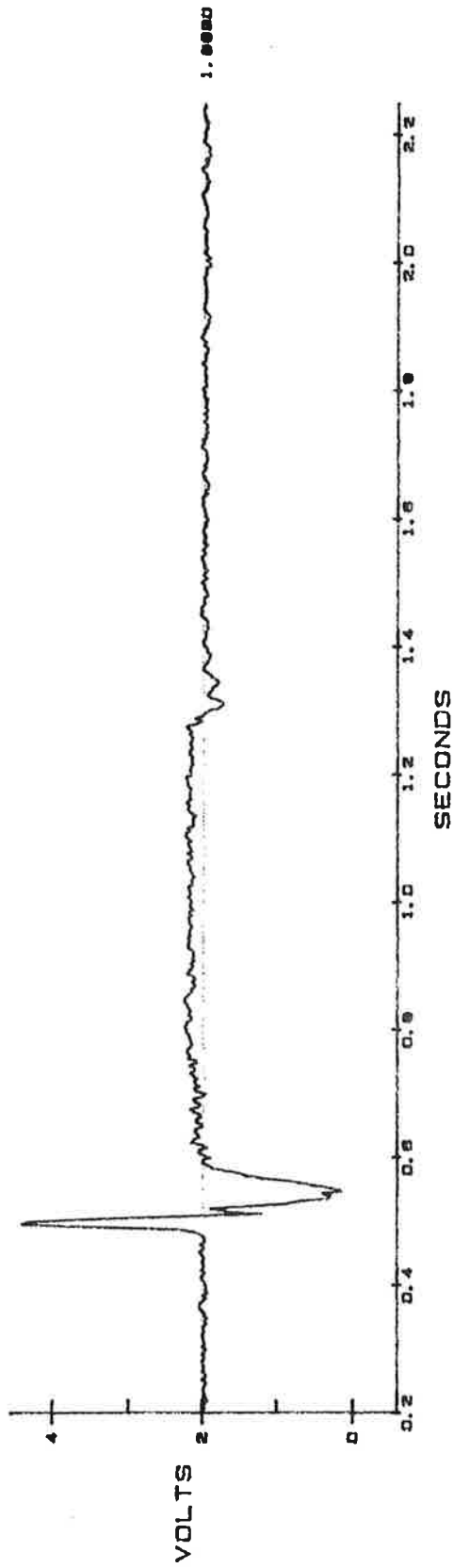


Ej modifierat kort
I0 steg 100 → 110 %, 110 → 100 %

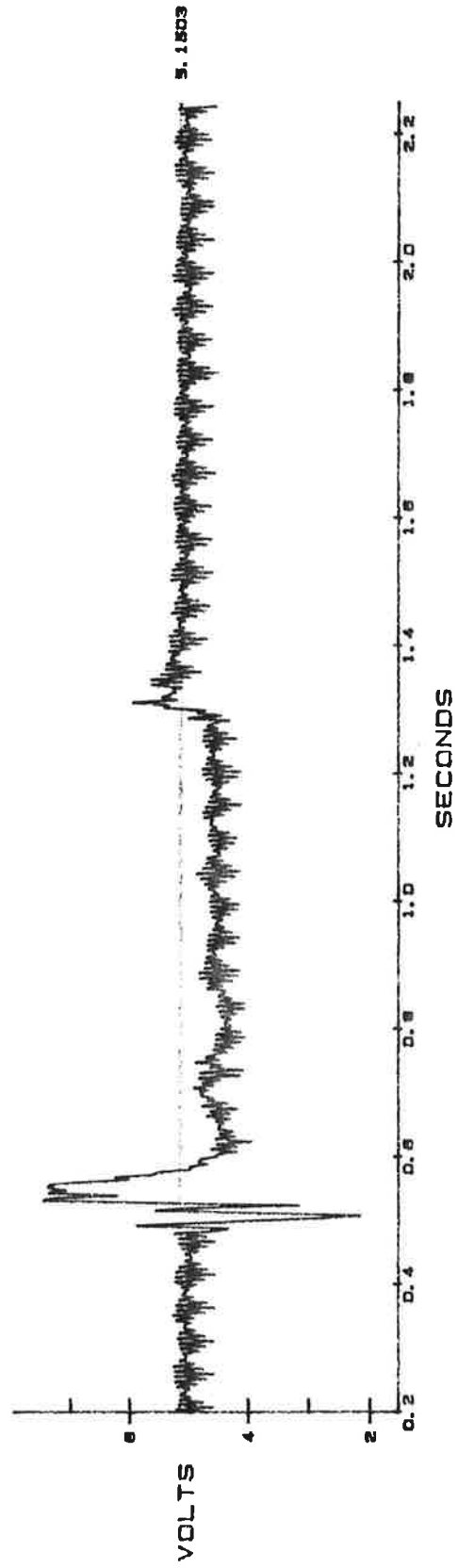
$L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$

$dx = 10,8 \%$

BUF. A1 Id pole

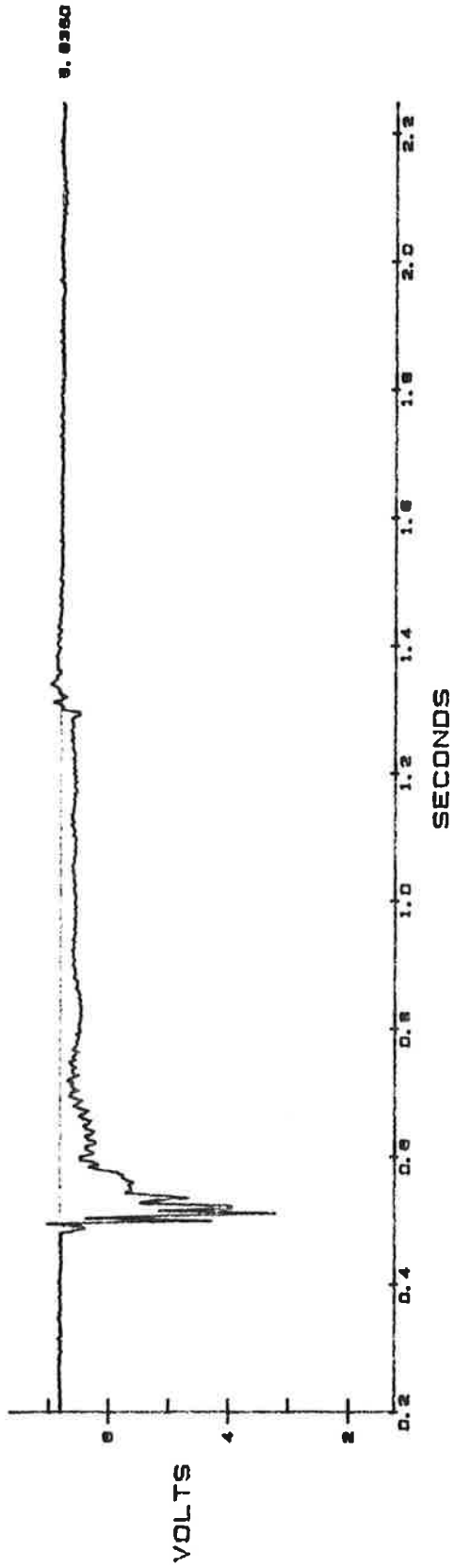


BUF. A2 UDIO OBS! Annan skala mot mod. kort.

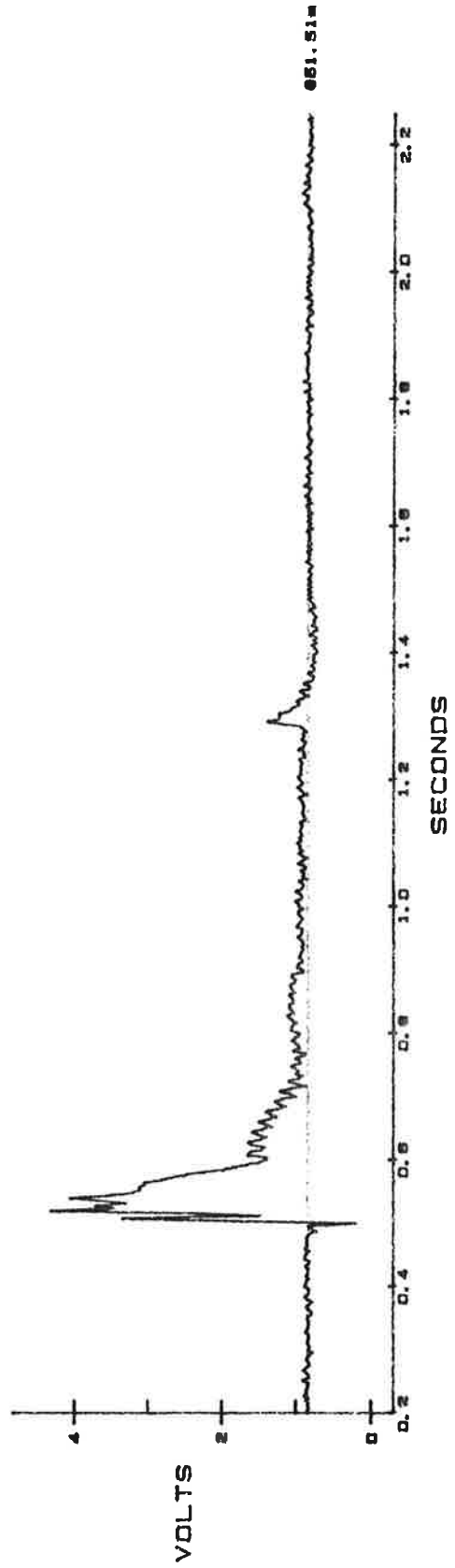


Ej modifierat kort
10 steg 100 → 110 %, 110 → 100 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 10,8 \%$

BUF. A3 Alfa

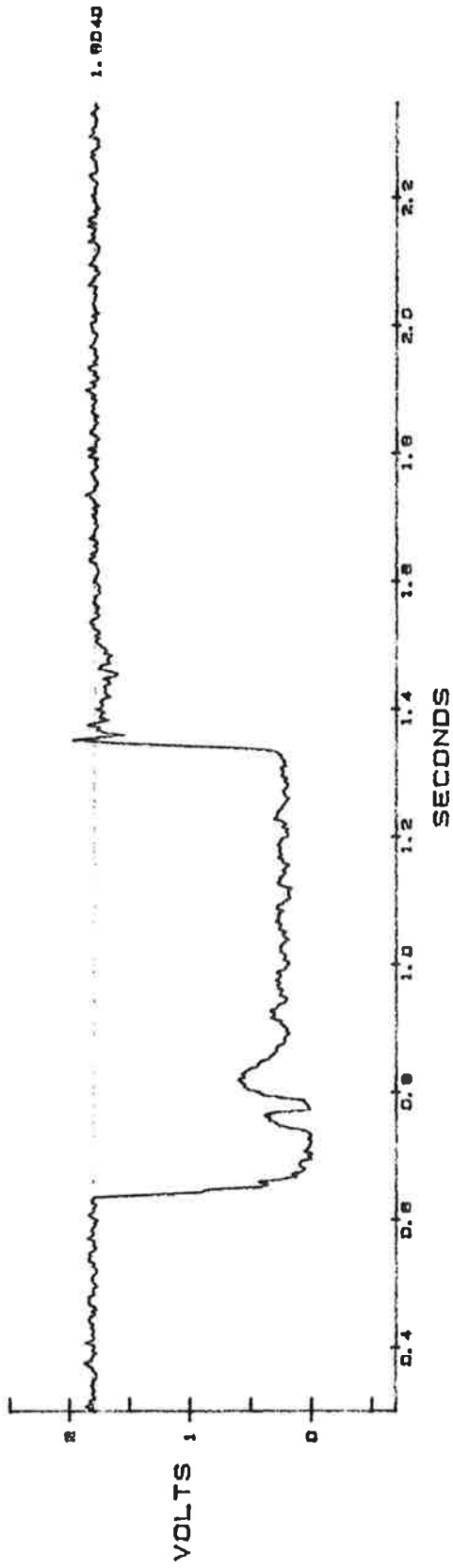


BUF. A4 Gamma

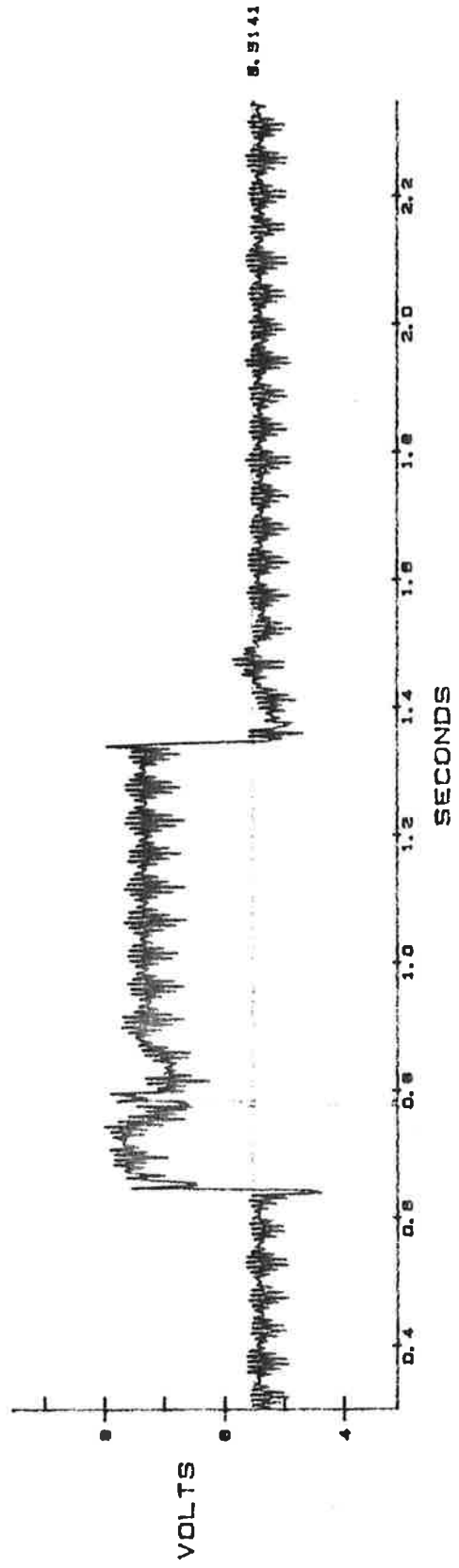


Modifierat kort
 10 steg 90 → 0 %, 0 → 90 %
 Spänning AG-nät ca 10,5 V
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 10,8 \%$

BUF. A1 Id pole

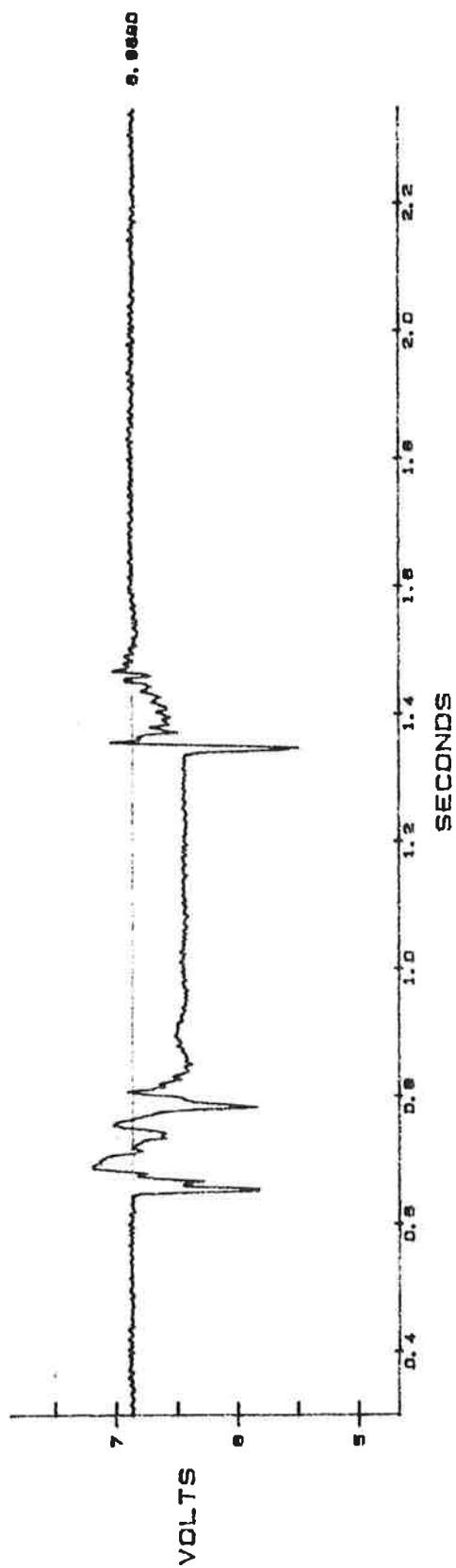


BUF. A2 UDIO

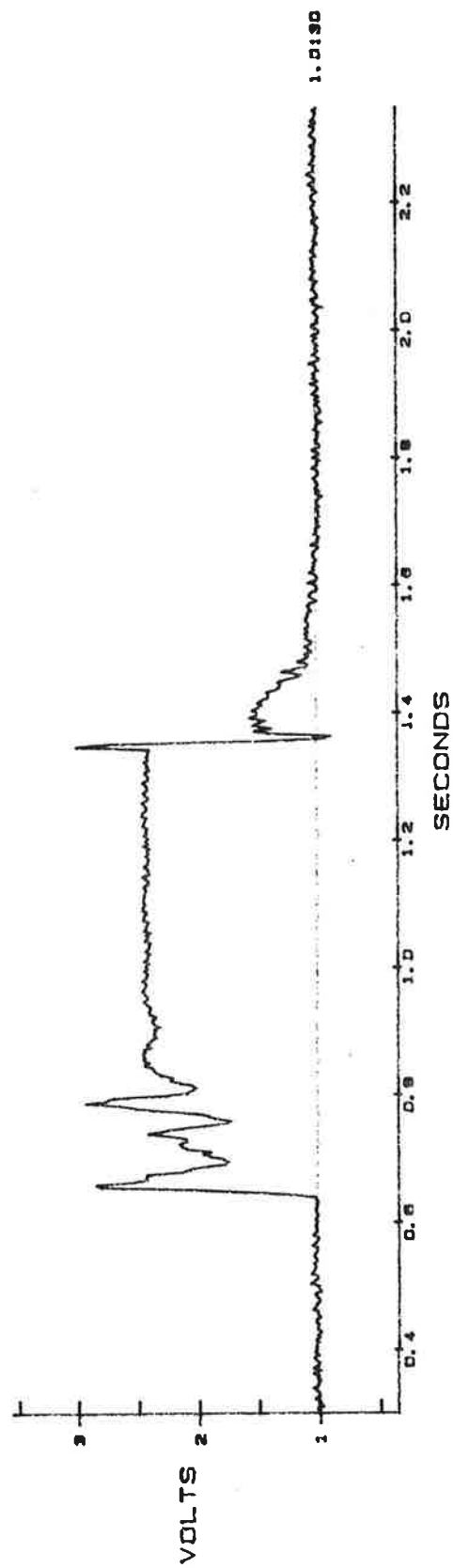


Modifiat kort
10 steg 90→0 %, 0→90 %
Spänning AC-nät ca 10,5 V
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 10,8 \%$

BUF. A3 Alfa

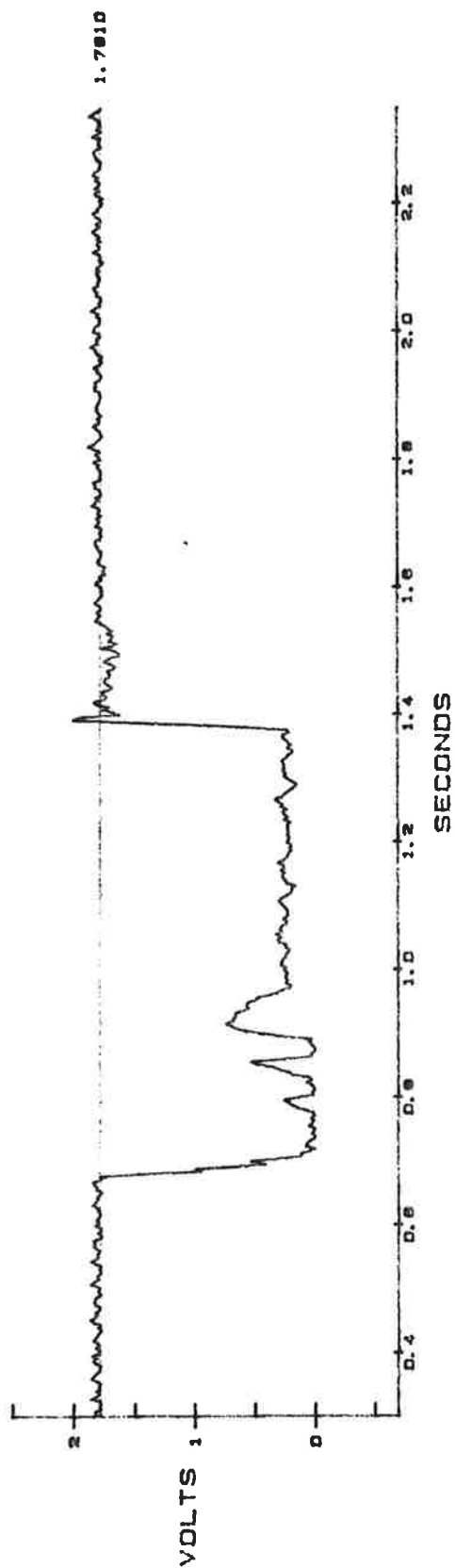


BUF. A4 Gamma

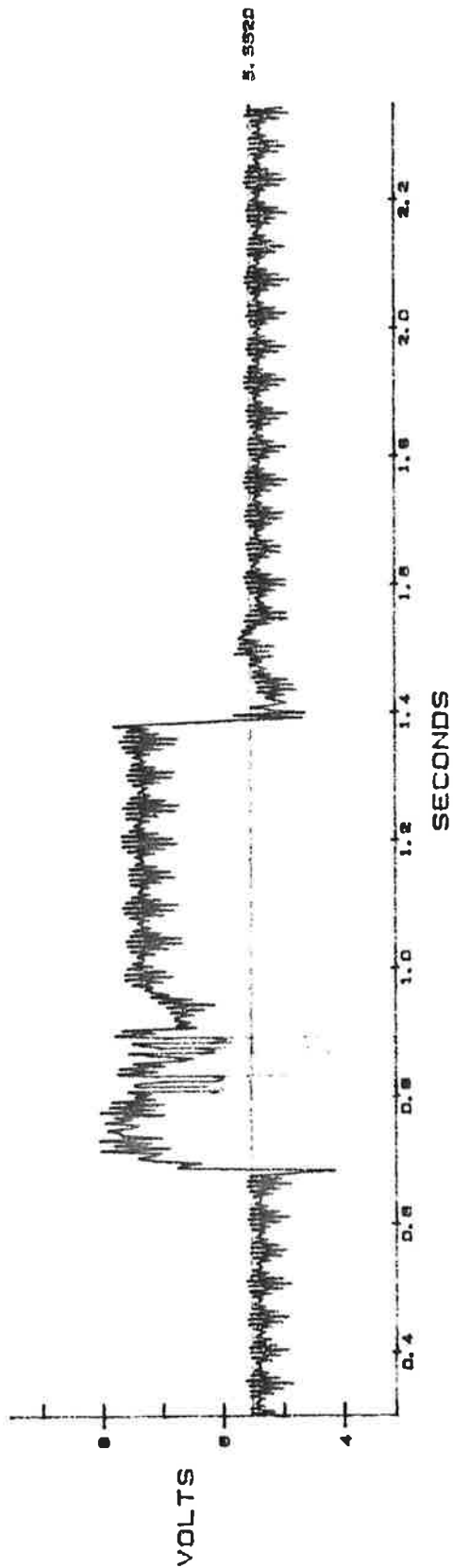


Ej modifierat kort
 10 steg 90 → 0 %, 0 → 90 %
 Spänning AC-nät ca 10,5 V
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 10,8 \%$

BUF. A1 Id pole

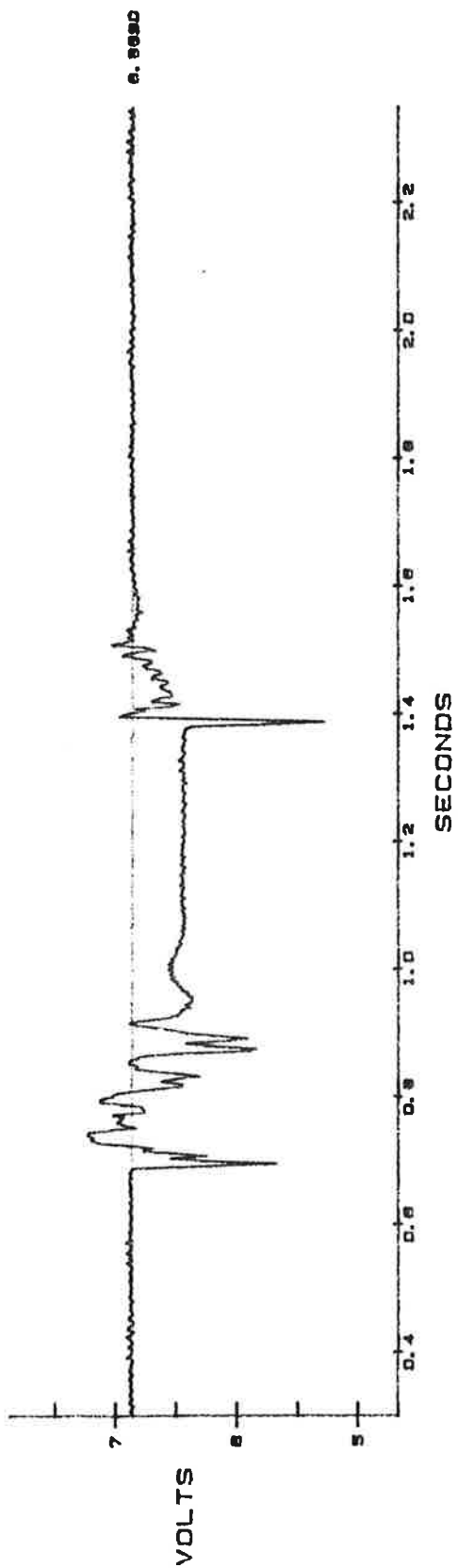


BUF. A2 UDIO

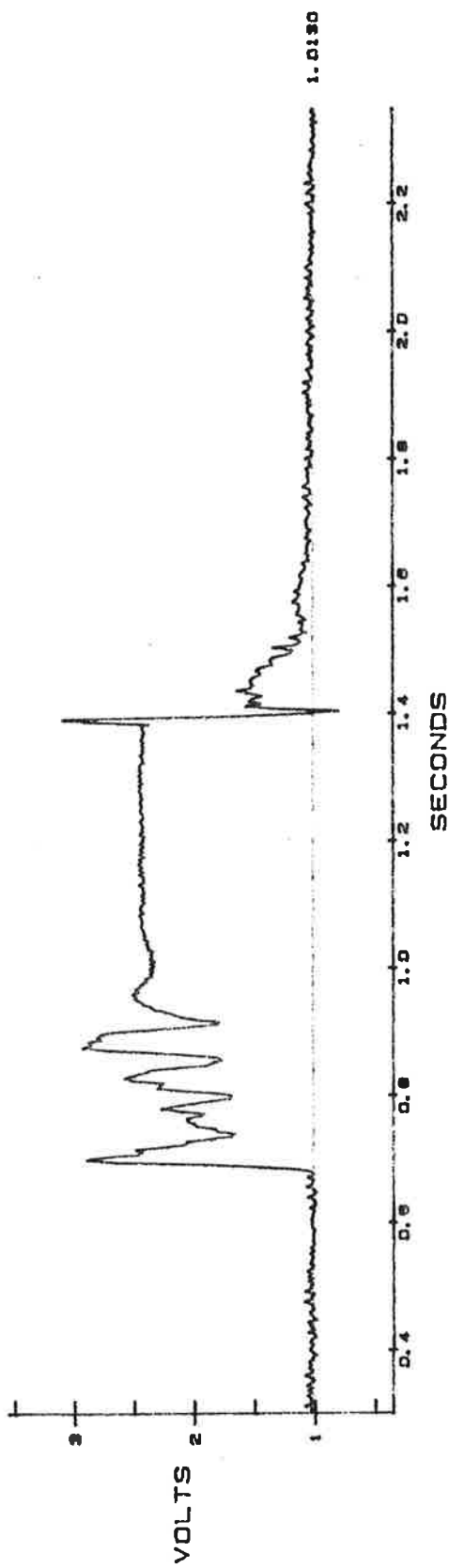


Ej modifierat kort
10 steg 90 → 0 %, 0 → 90 %
Spänning AC-nät ca 10,5 V
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 10,8 \%$

BUF. A3 Alfa

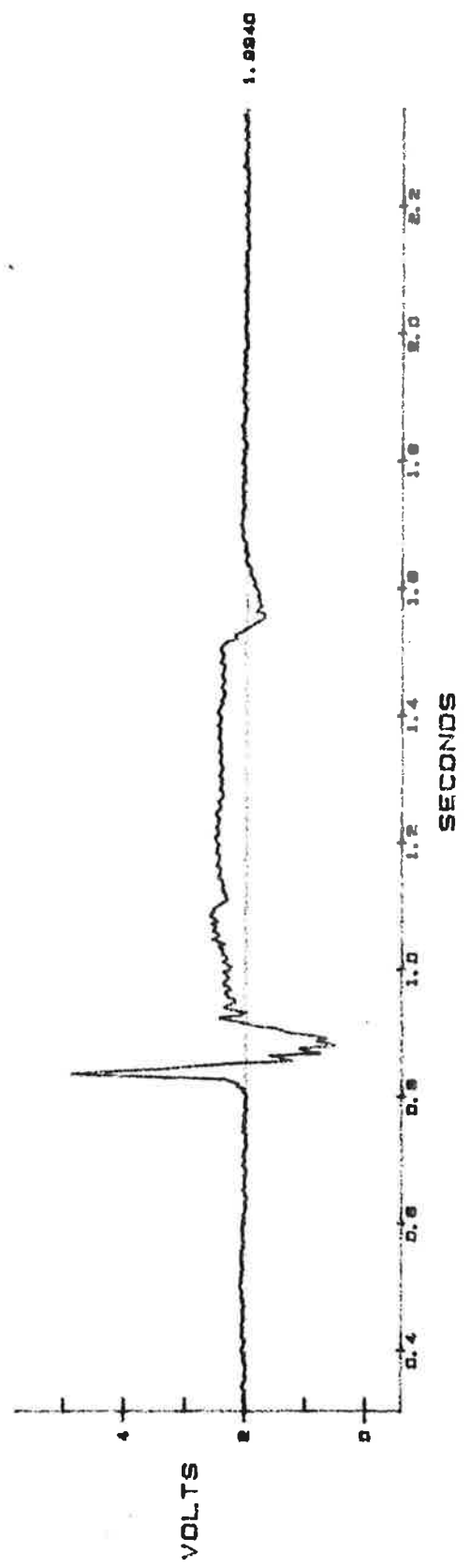


BUF. A4 Gamma

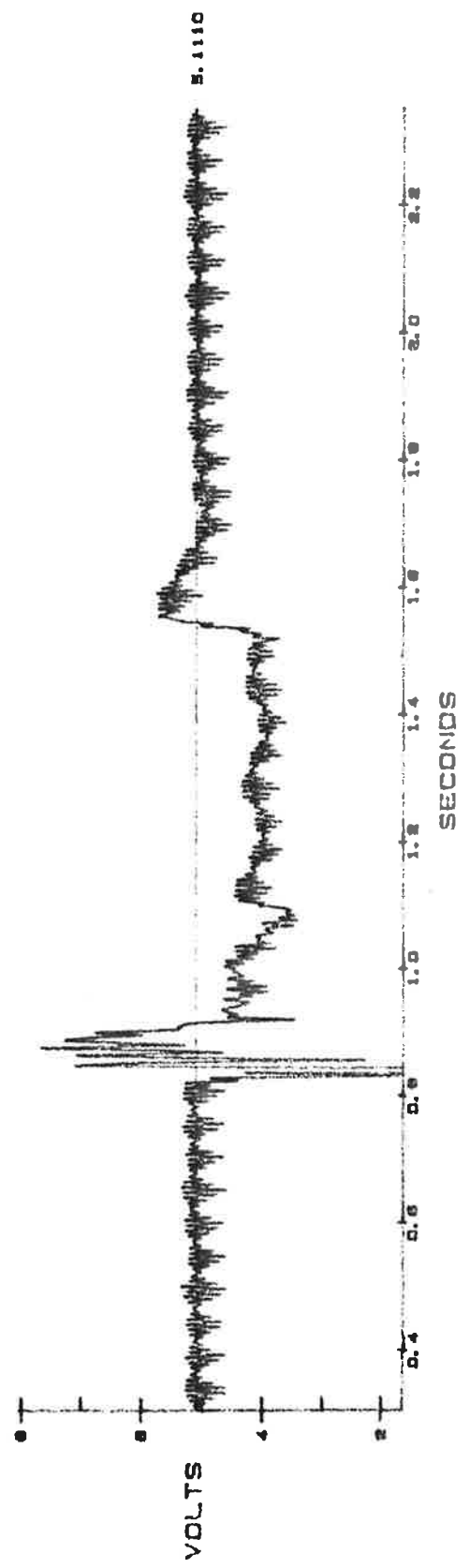


Modifirat kort
IO steg 100 → 120 %, 120 → 100 %
 $L_{nat} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 10,8 \%$

BUF. A1 Id pole

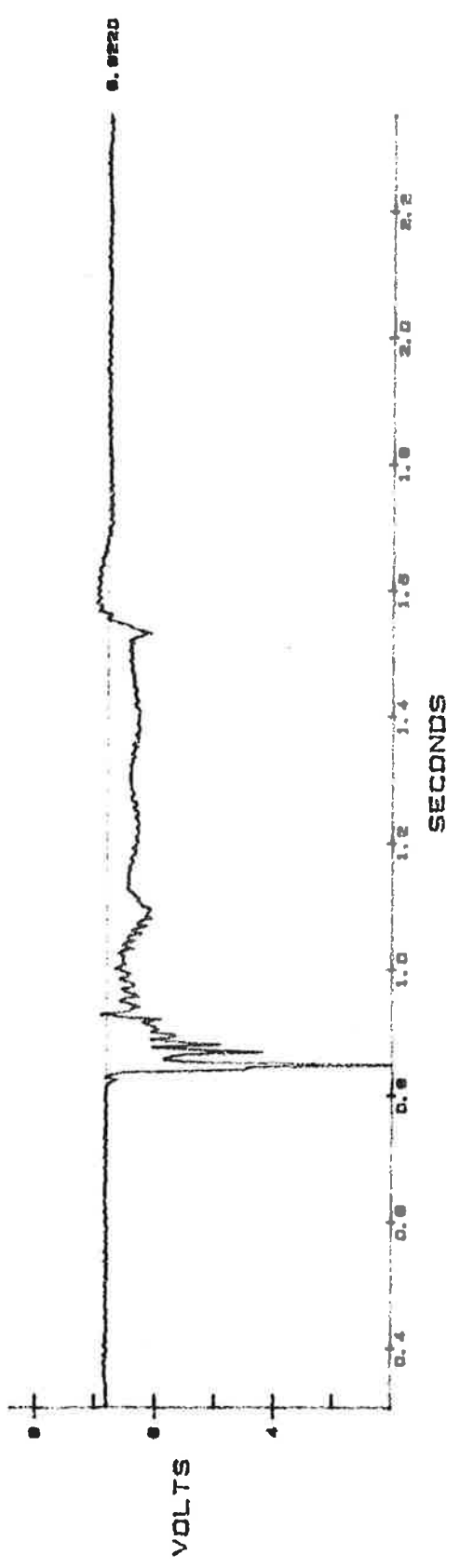


BUF. A2 UDIO

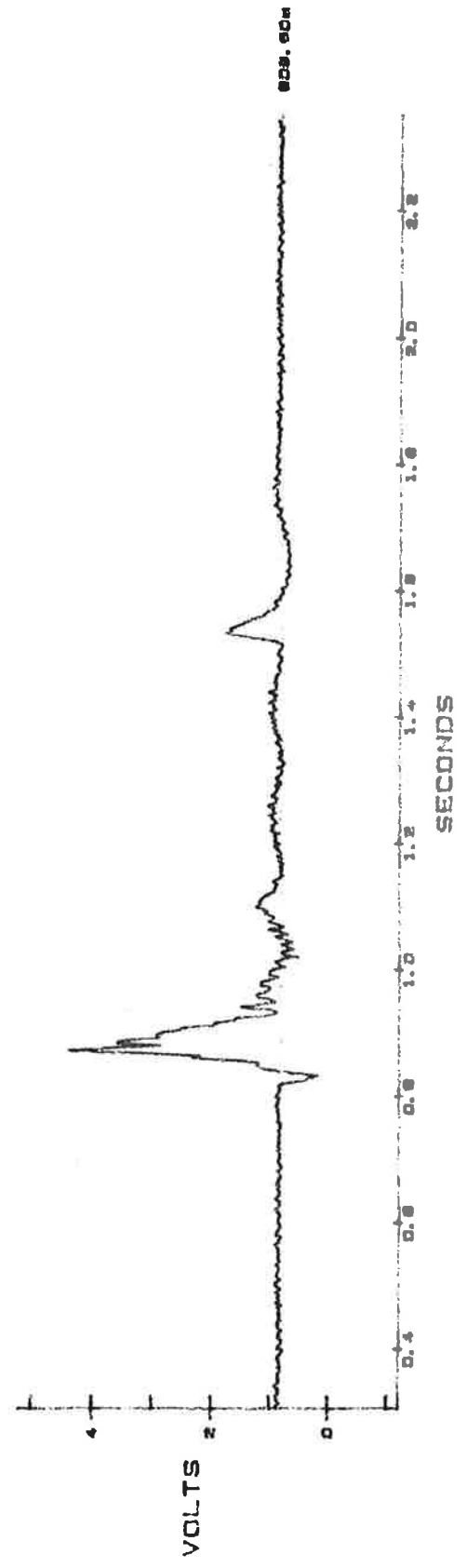


Modifiat kort
10 steg 100 → 120 %, 120 → 100 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 10,8 \%$

BUF. A3 Alfa

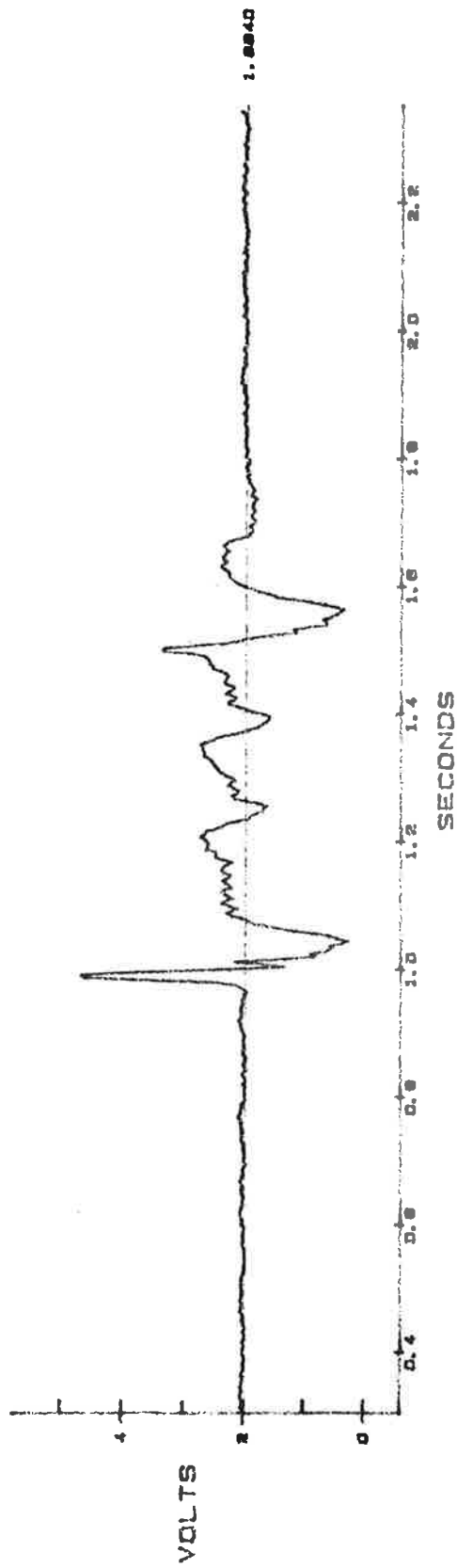


BUF. A4 Gamma

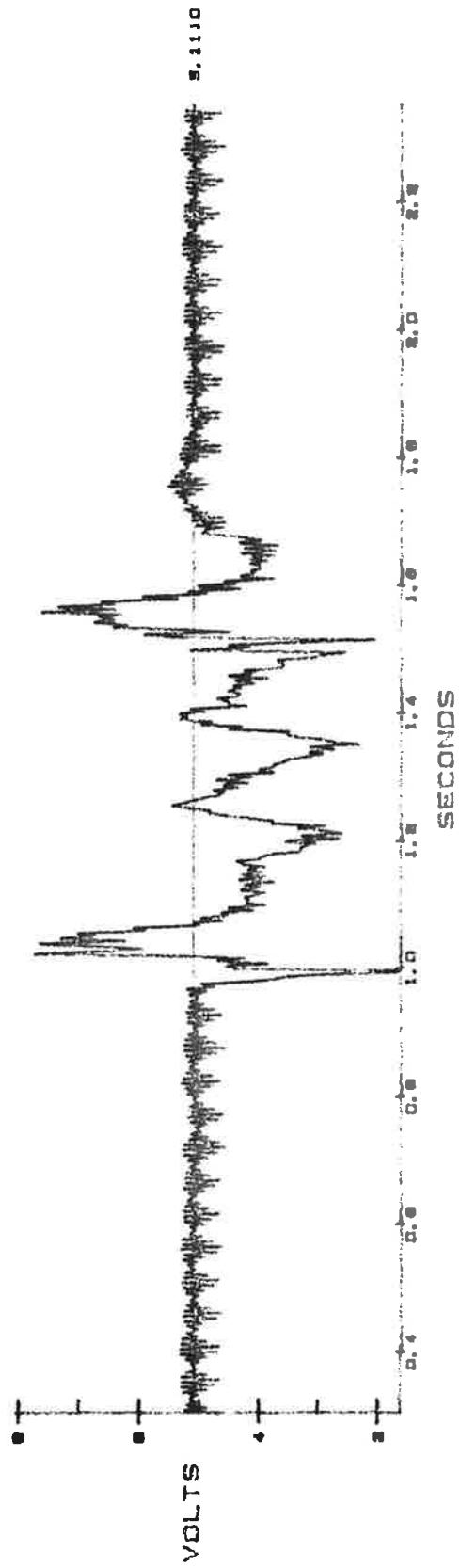


Ej modifierat kort
IO steg 100 → 120 %, 120 → 100 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 10,8 \%$

BUF. A1 Id pole

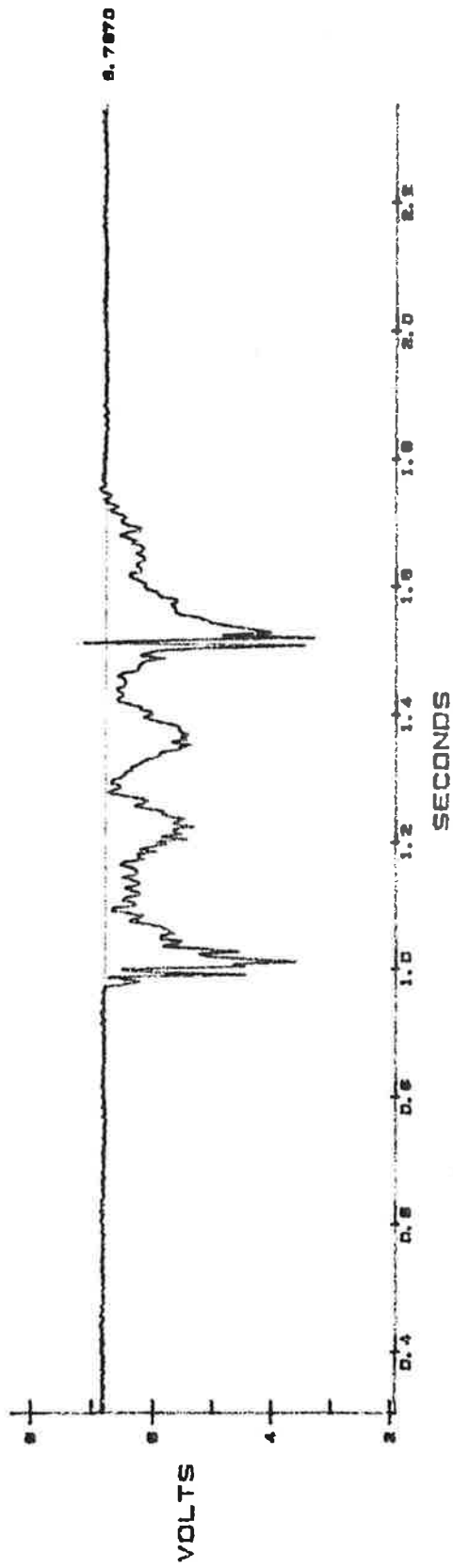


BUF. A2 UDIO

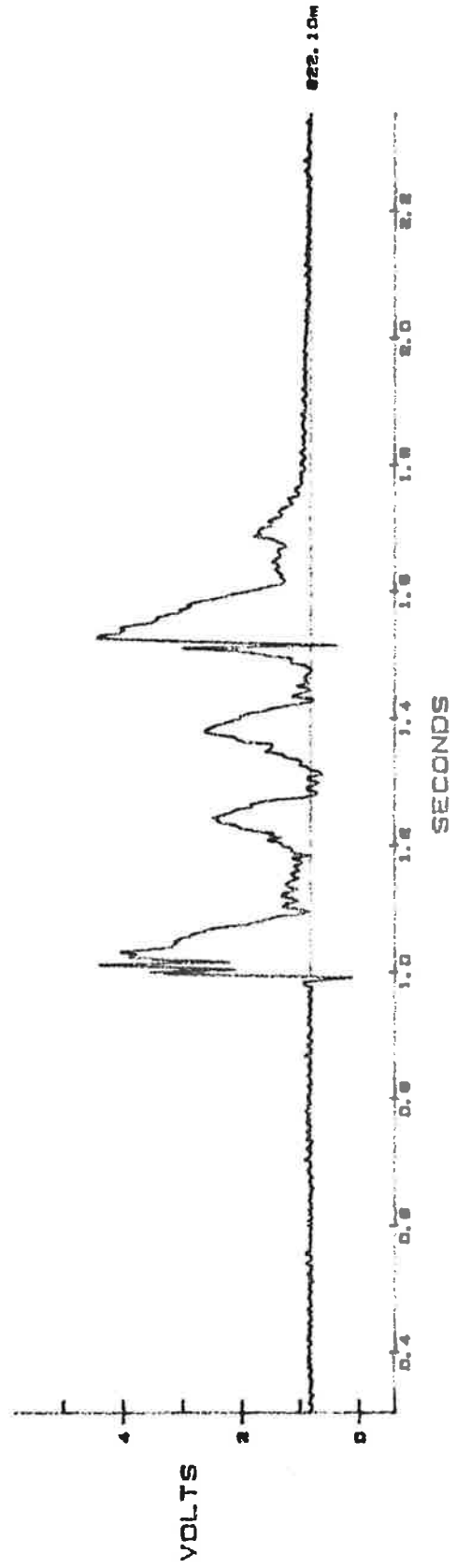


Ej modifierat kort
 10 steg 100 → 120 %, 120 → 100 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 10,8 \%$

BUF. A3 Alfa

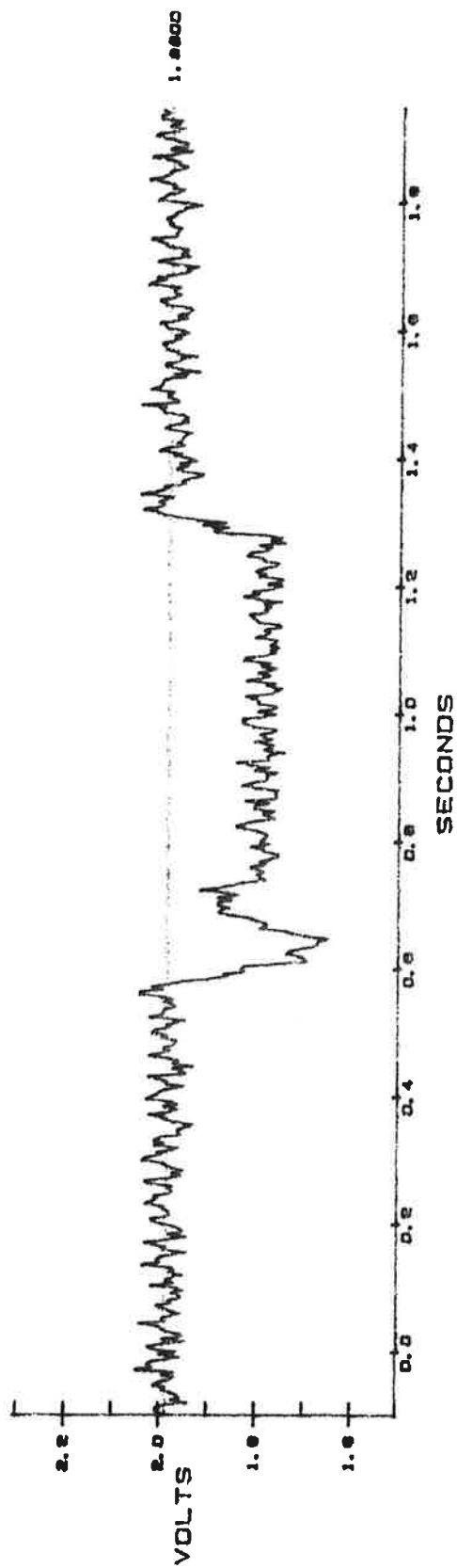


BUF. A4 Gamma

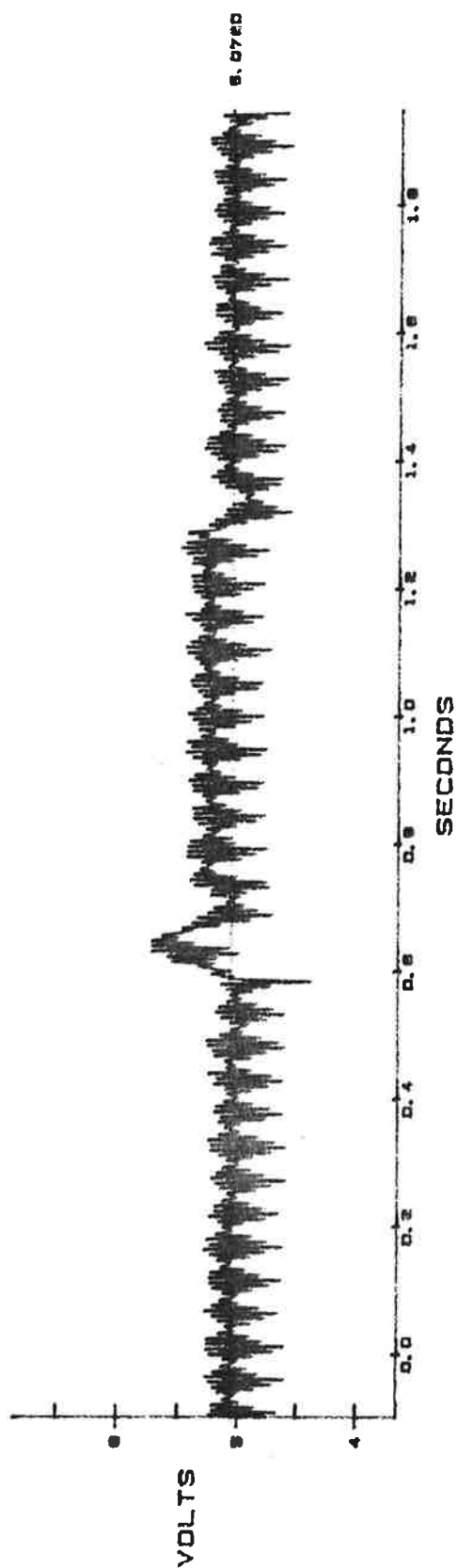


Modifierat kort
10 steg 100 → 90 %, 90 → 100 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$

BUF. A1 Id pole

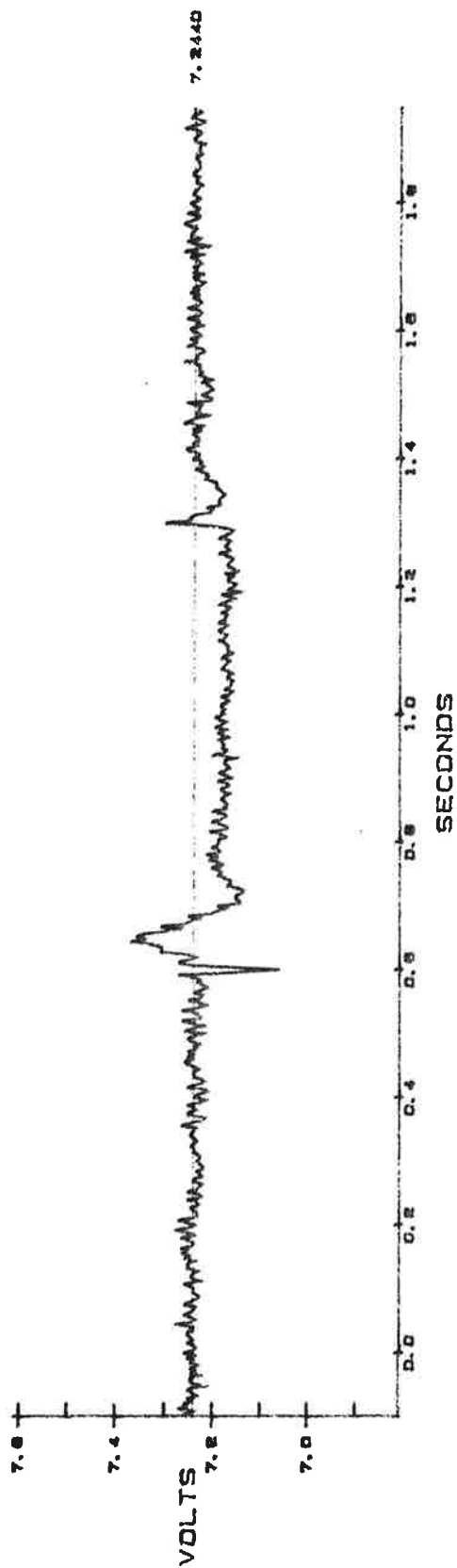


BUF. A2 UDIO

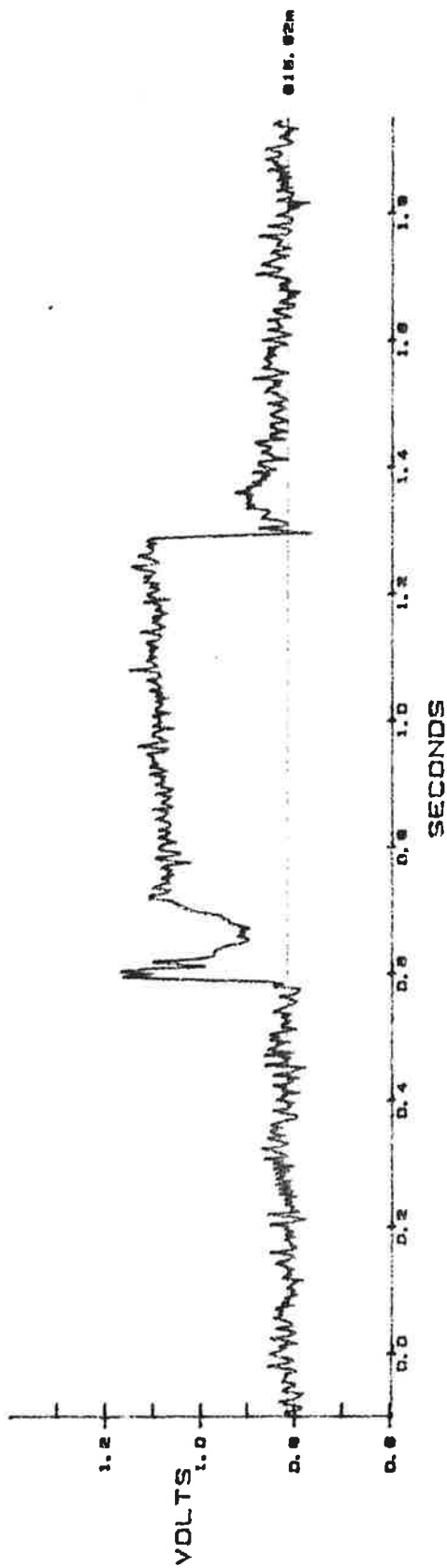


Modifiat kort
10 steg 100 90 %, 90 100 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$

BUF. A3 Alfa

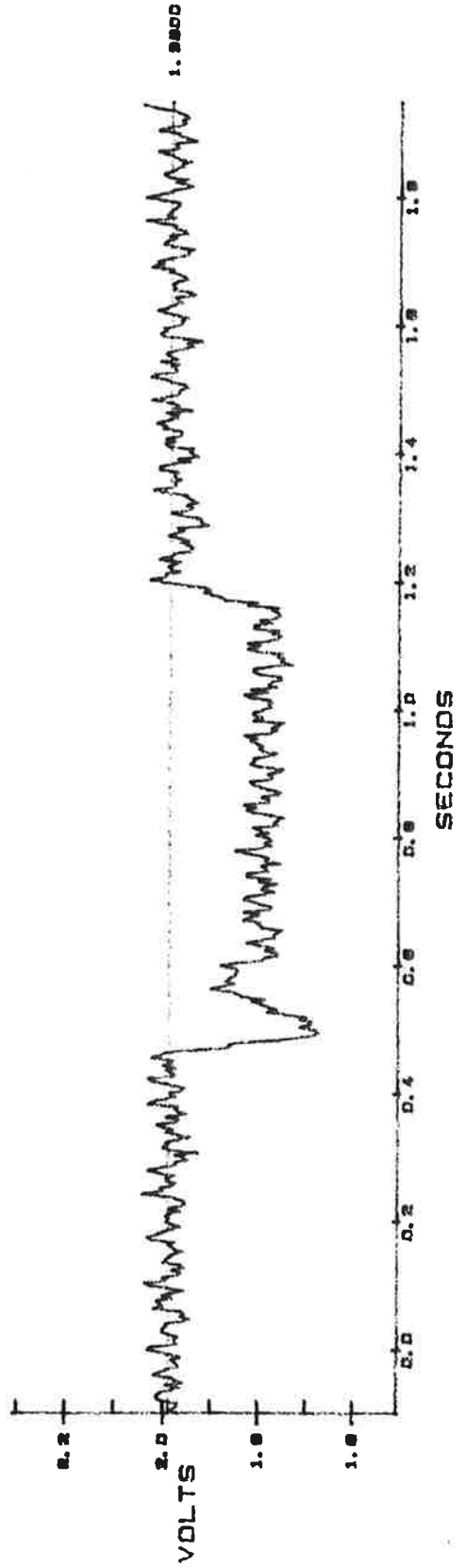


BUF. A4 Gamma

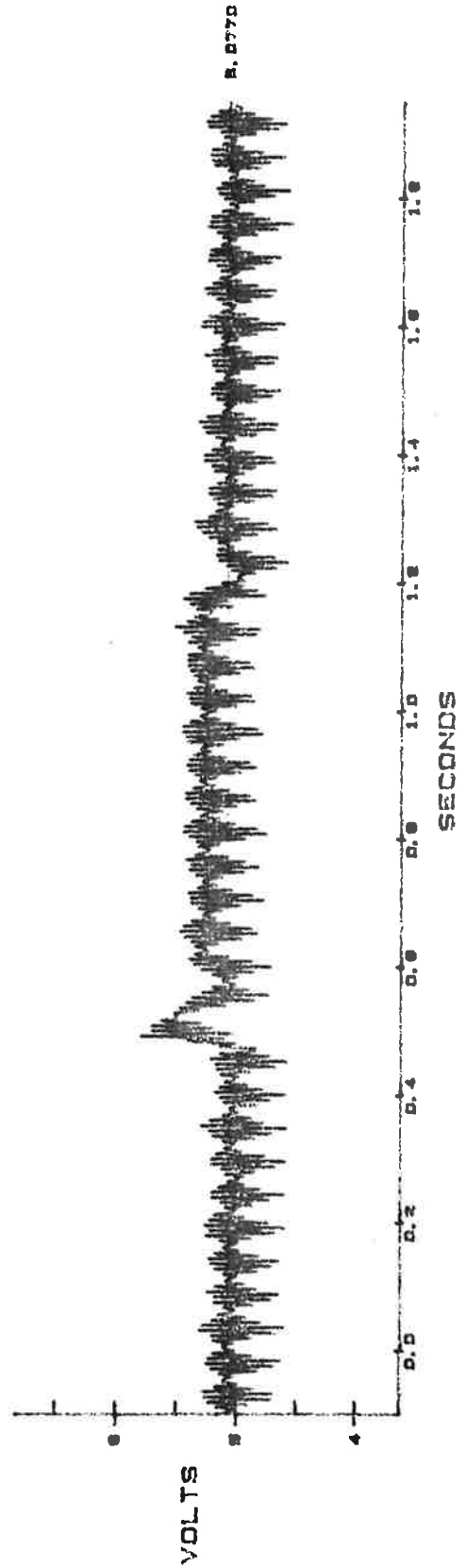


Ej modifierat kort
10 steg 100 → 90 %, 90 → 100 %
L_{nät} = 50 mH
dx = 6 %

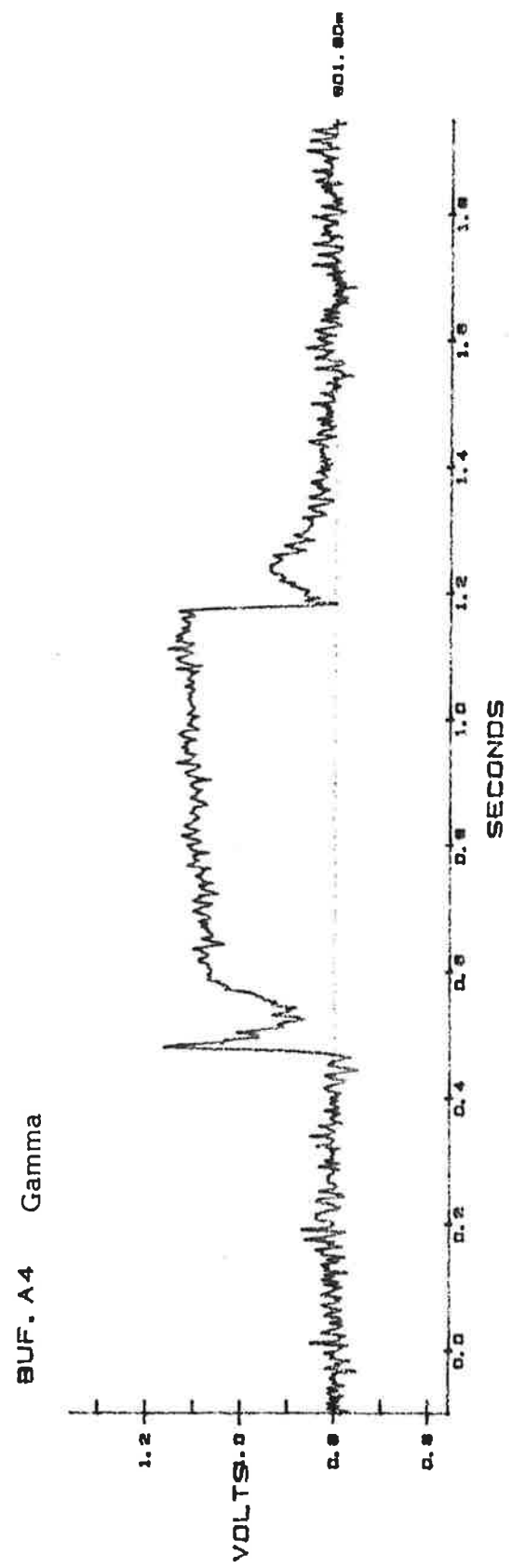
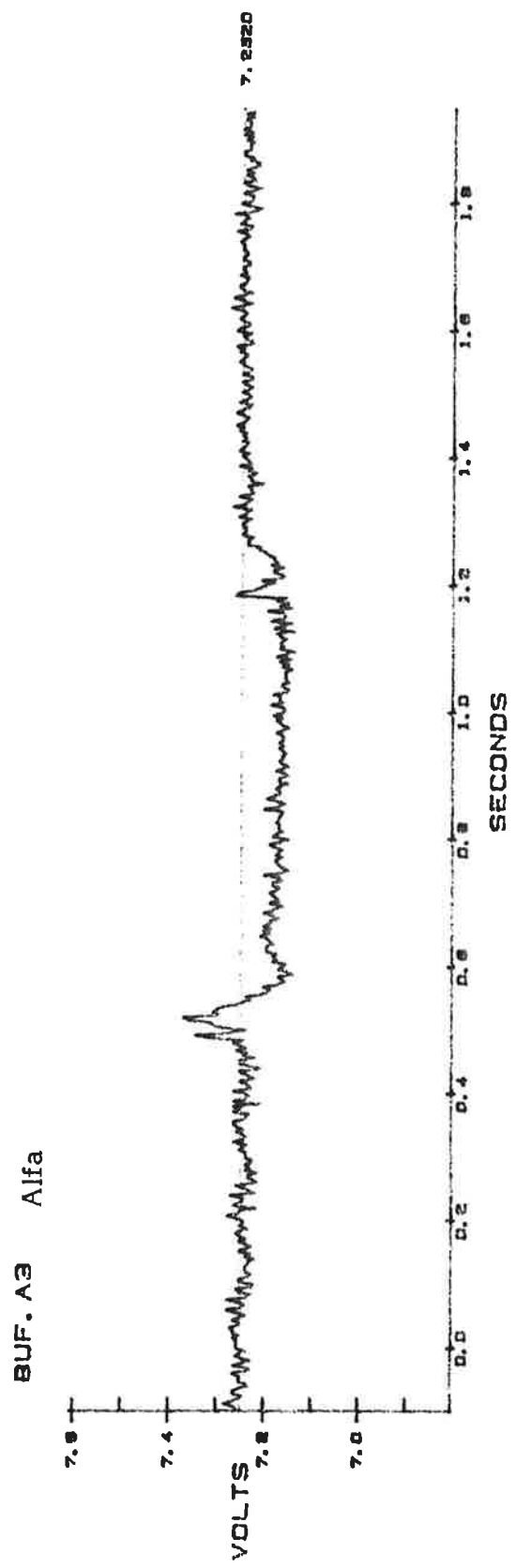
BUF. A1 Id pole



BUF. A2 UDIO

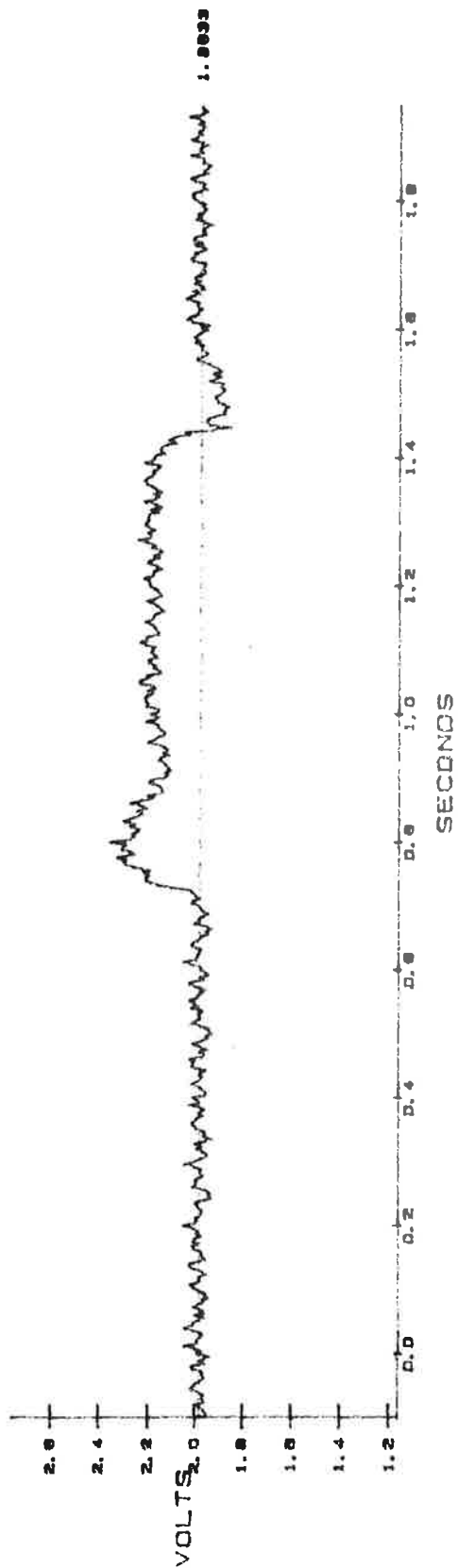


Ej modifierat kort
10 steg 100 → 90 %, 90 → 100 %
L_{nät} = 50 mH
dx = 6 %

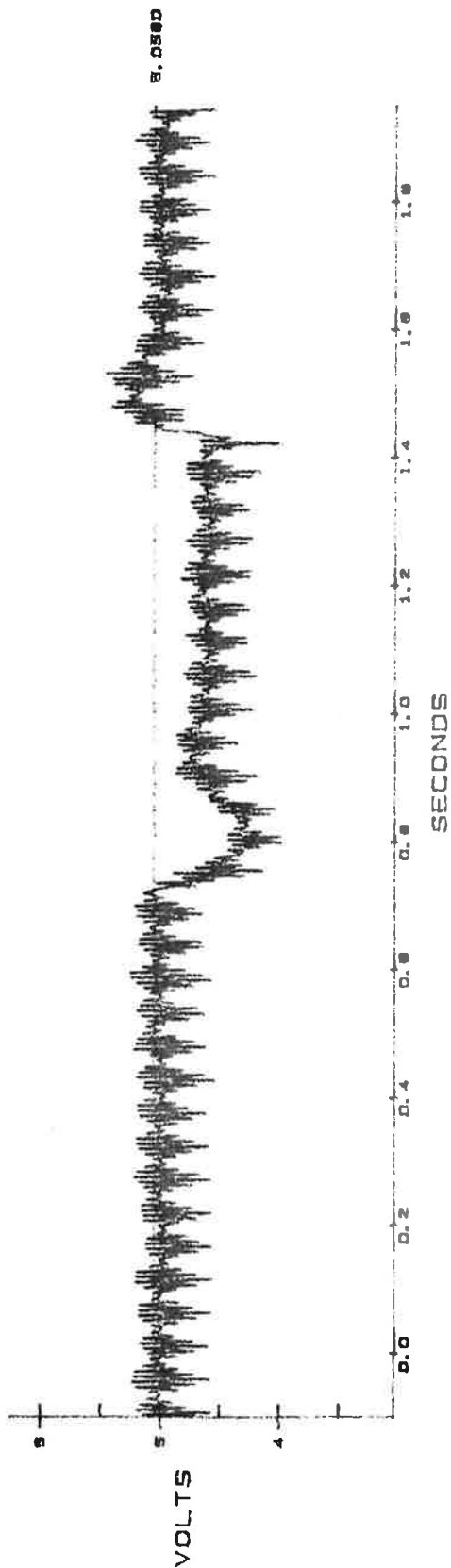


Modifiat kort
10 steg 100 → 110 %, 110 → 100 %
 $L_{nat} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$

BUF. A1 Id pole

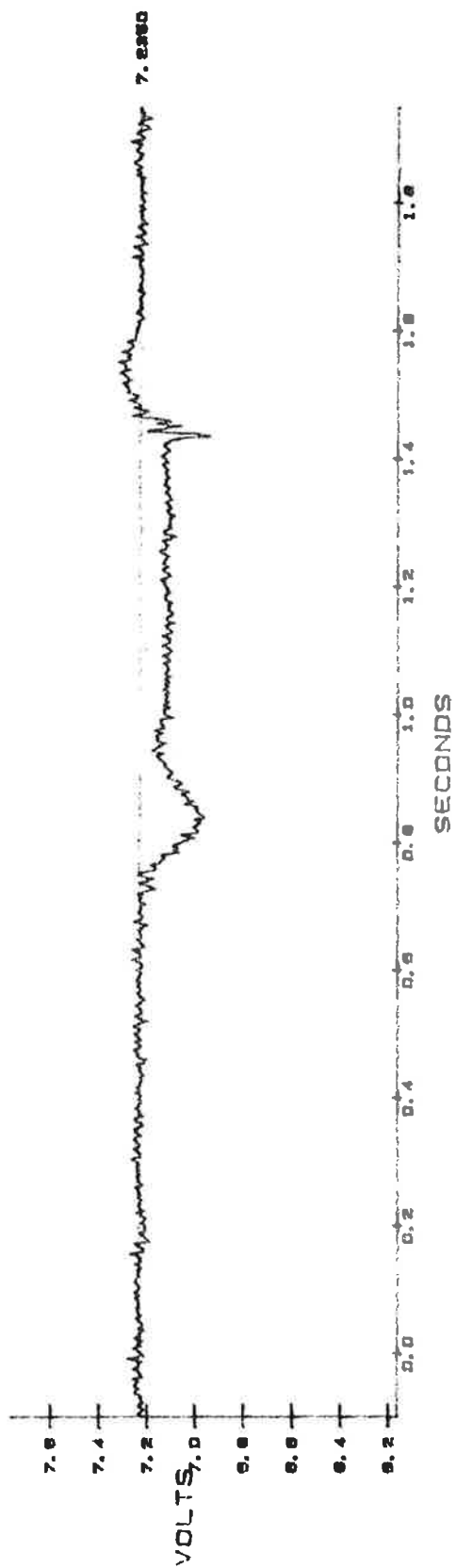


BUF. A2 UDIO

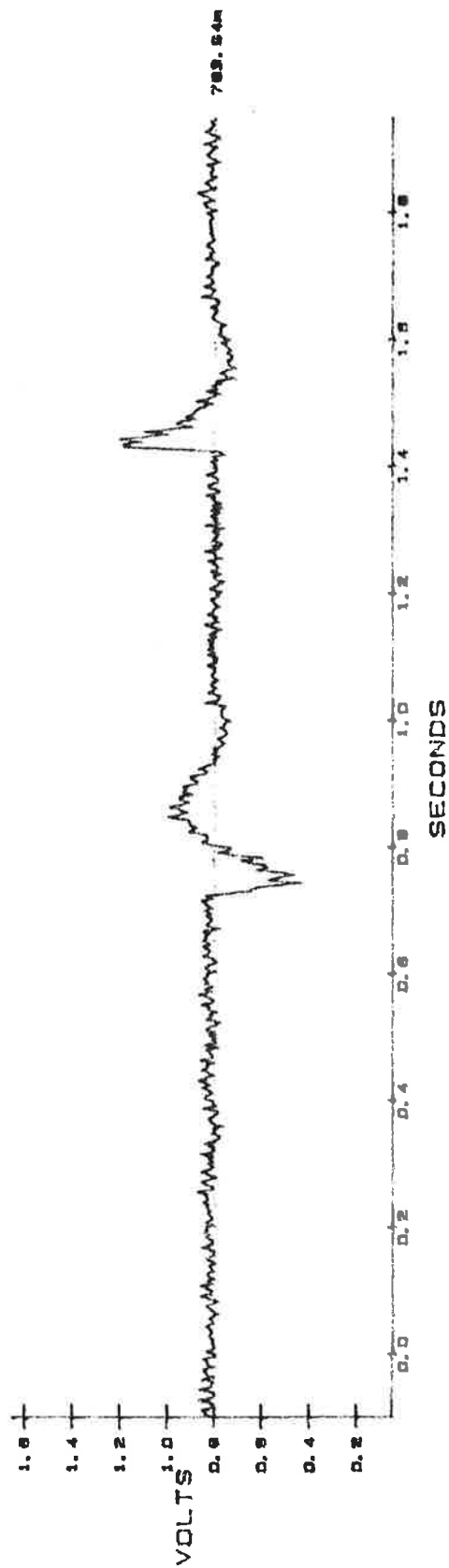


Modifiat kort
IO steg 100 → 110 %, 110 → 100 %
L_{nät} = 50 mH
dx = 6 %

BUF. A3 Alfa

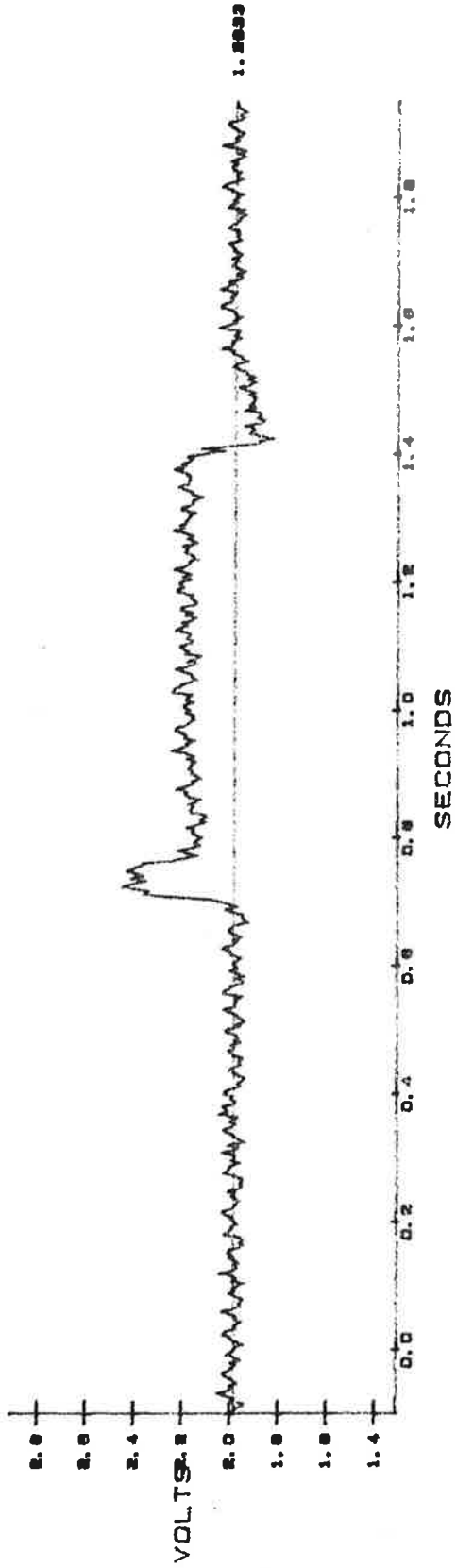


BUF. A4 Gamma

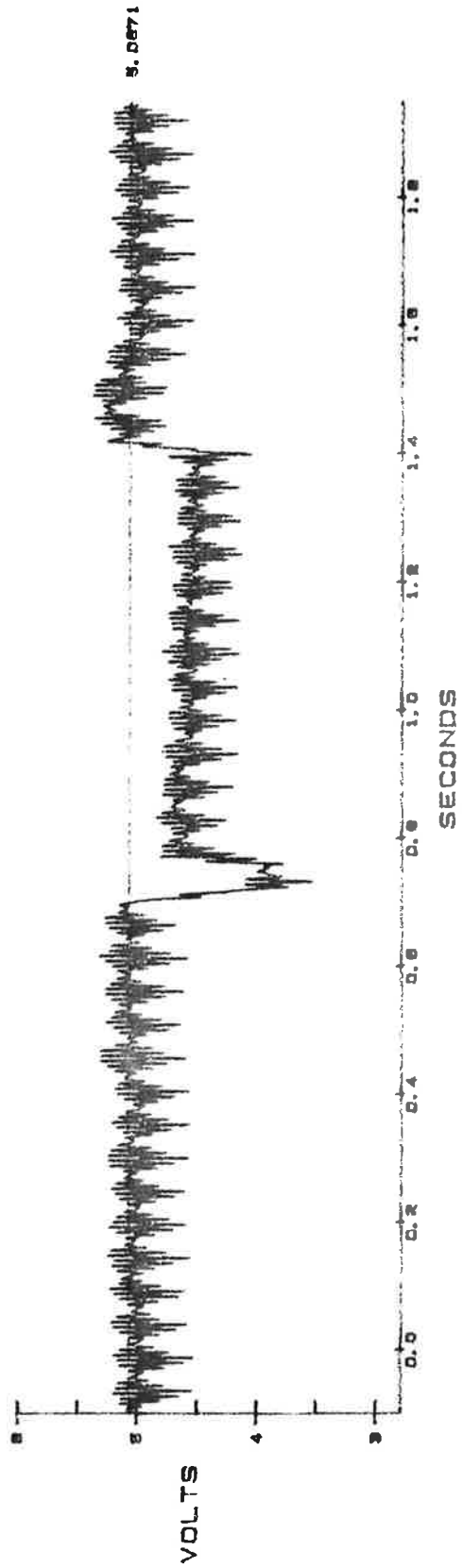


Ej modifierat kort
IO steg 100 → 110 %, 110 → 100 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$

BUF. A1 Id pole

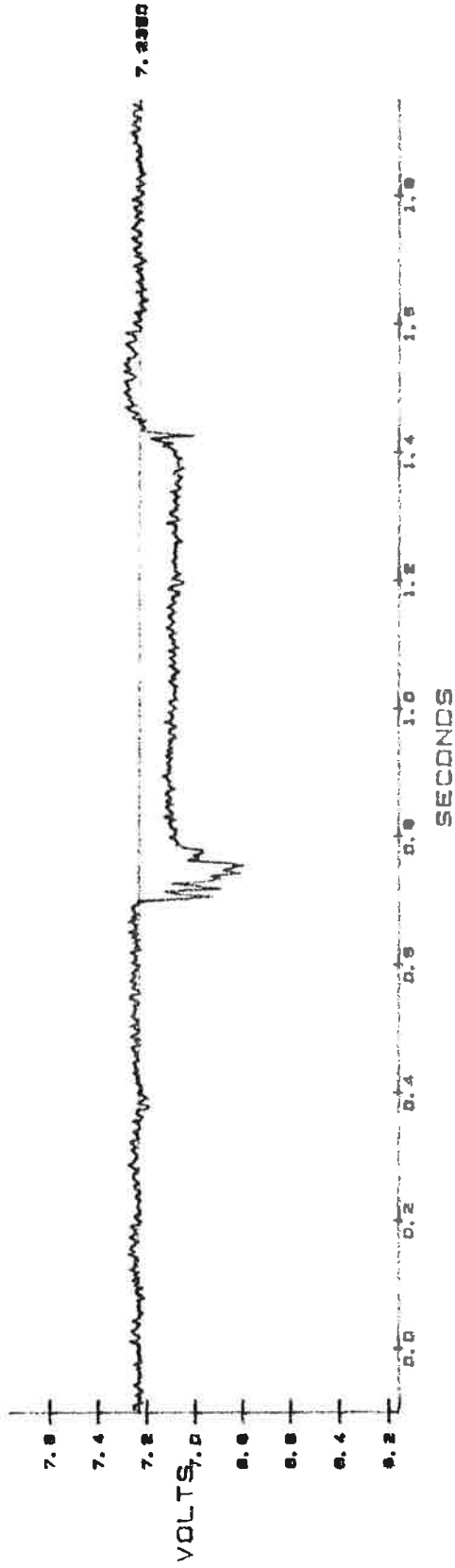


BUF. A2 UDIO

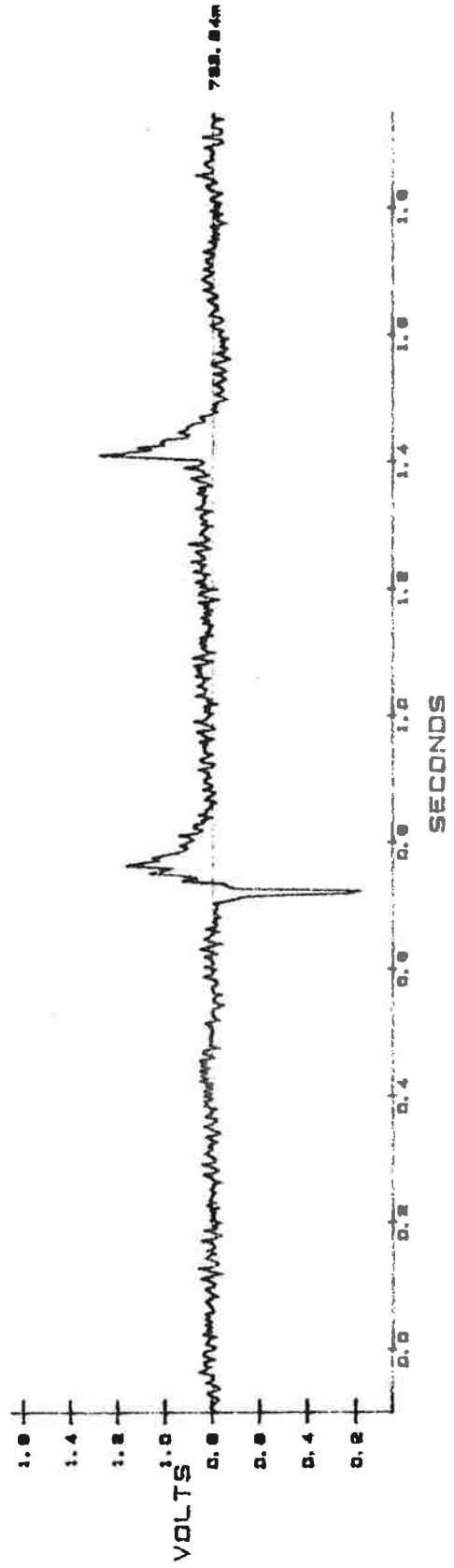


Ej modifierat kort
10 steg 100 → 110 %, 110 → 100 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$

BUF. A3 Alfa

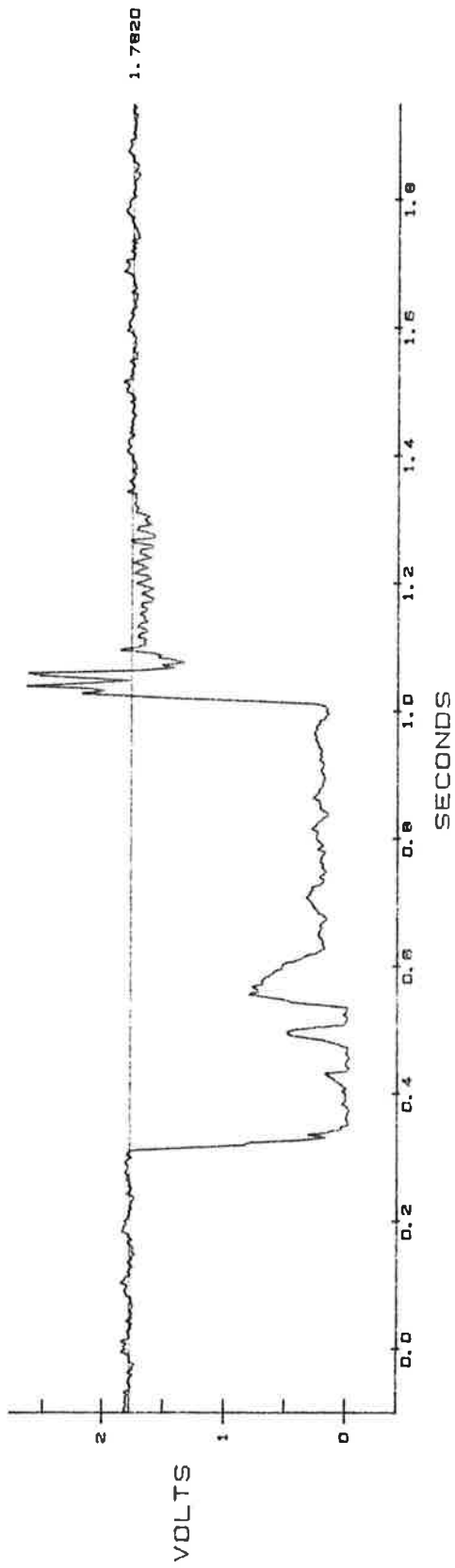


BUF. A4 Gamma

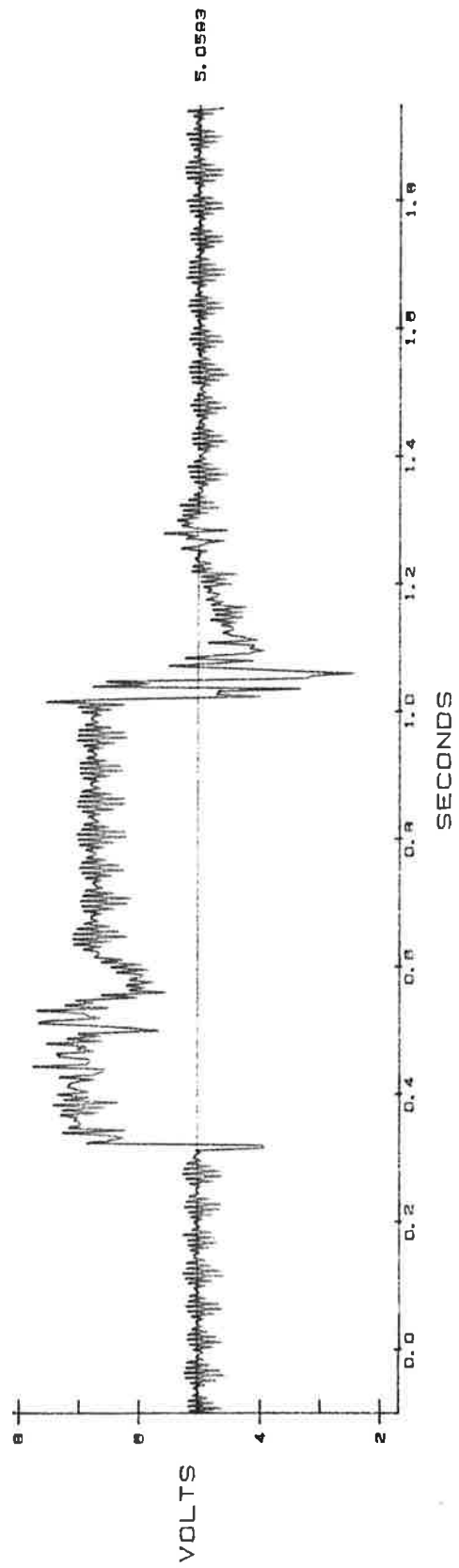


Modifierat kort
IO steg 90 → 0 %, 0 → 90 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$

BUF. A1 Id pole

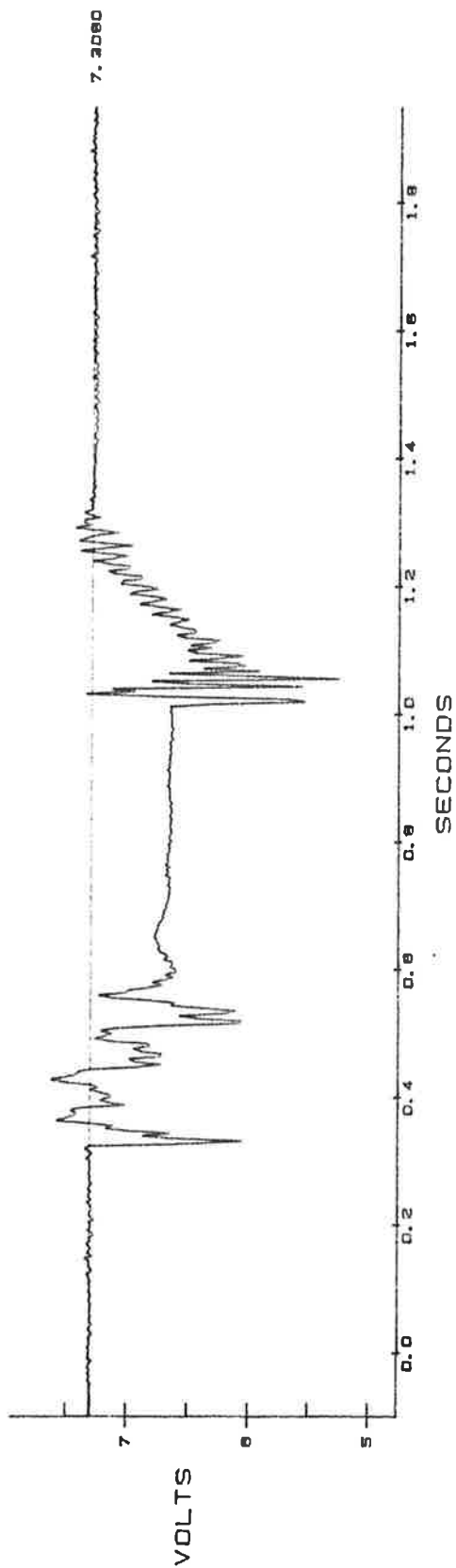


BUF. A2 UDIO

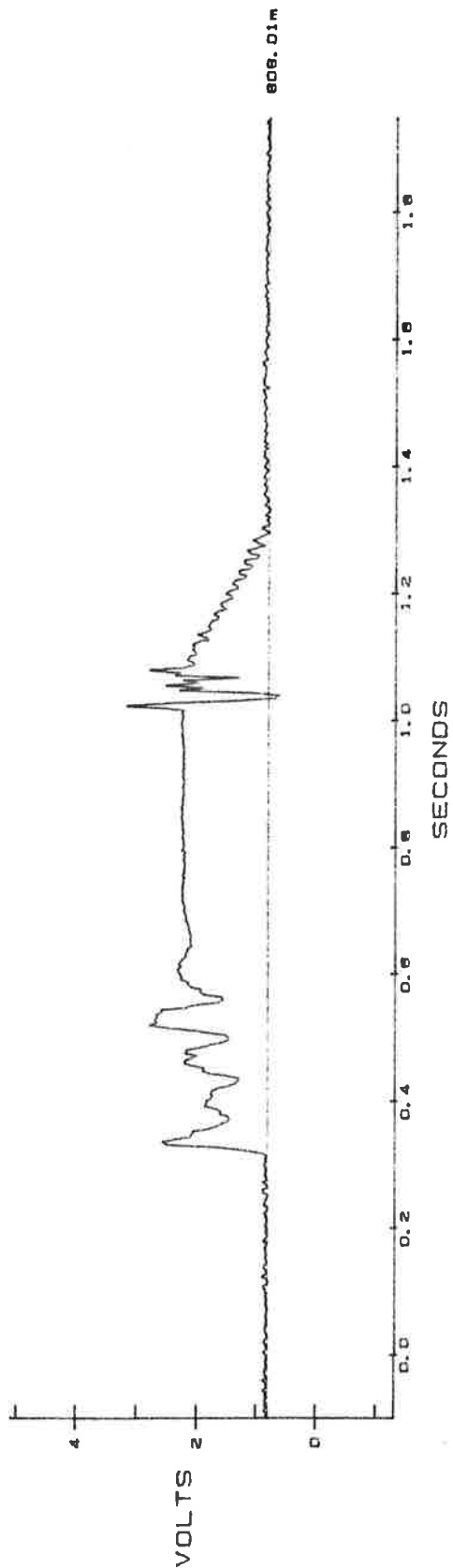


Modifiat kort
10 steg 90 → 0 %, 0 → 90 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$

BUF. A3 Alfa

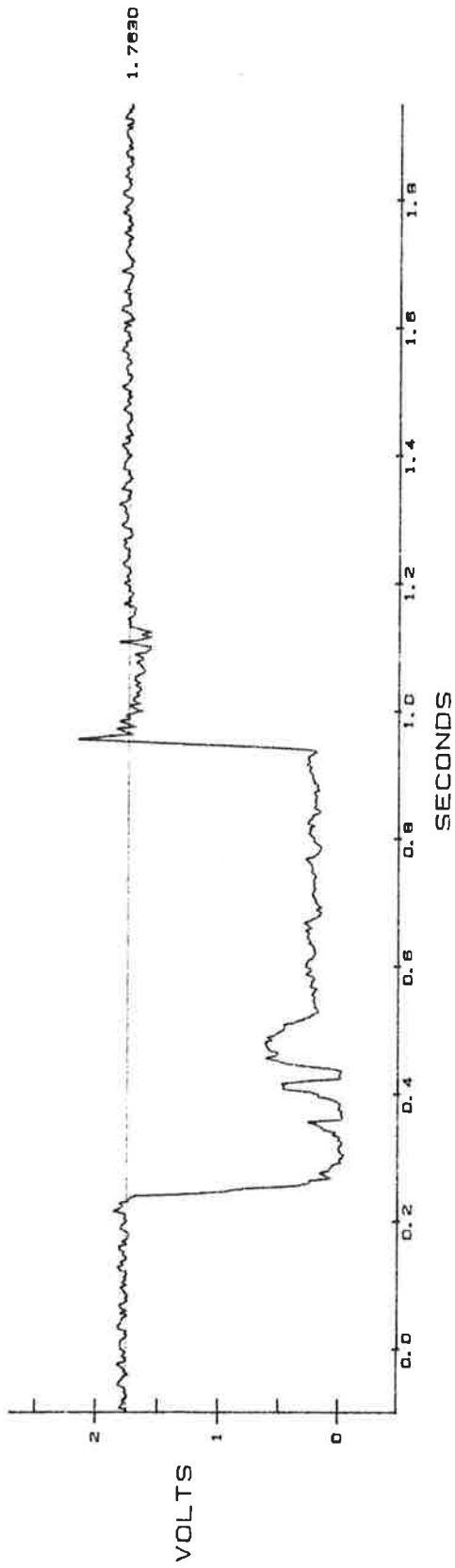


BUF. A4 Gamma

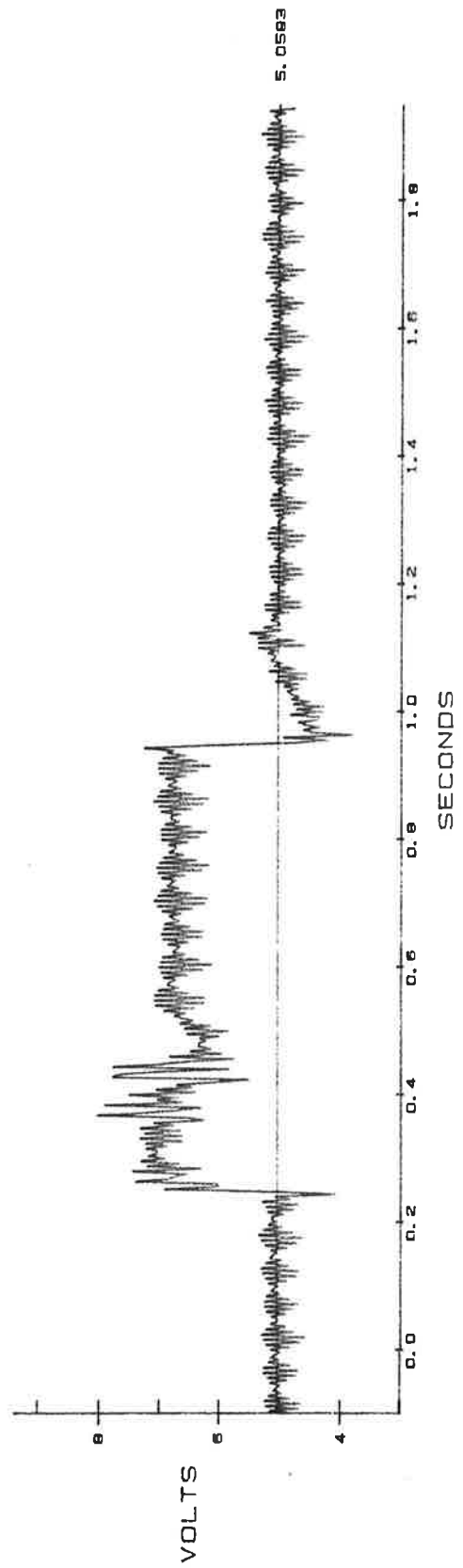


Ej modifierat kort
10 steg 90 → 0 %, 0 → 90 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$

BUF. A1 Id pole

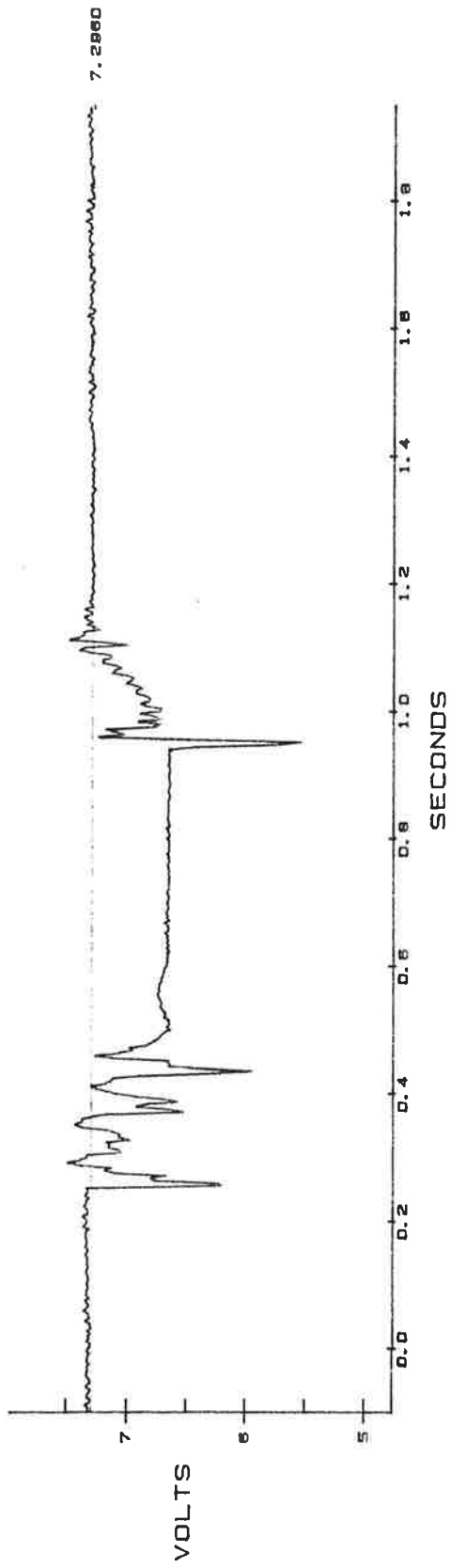


BUF. A2 UDIO



Ej modifierat kort
IO steg 90 → 0 %, 0 → 90 %
L_{nät} = 50 mH
dx = 6 %

BUF. A3 Alfa

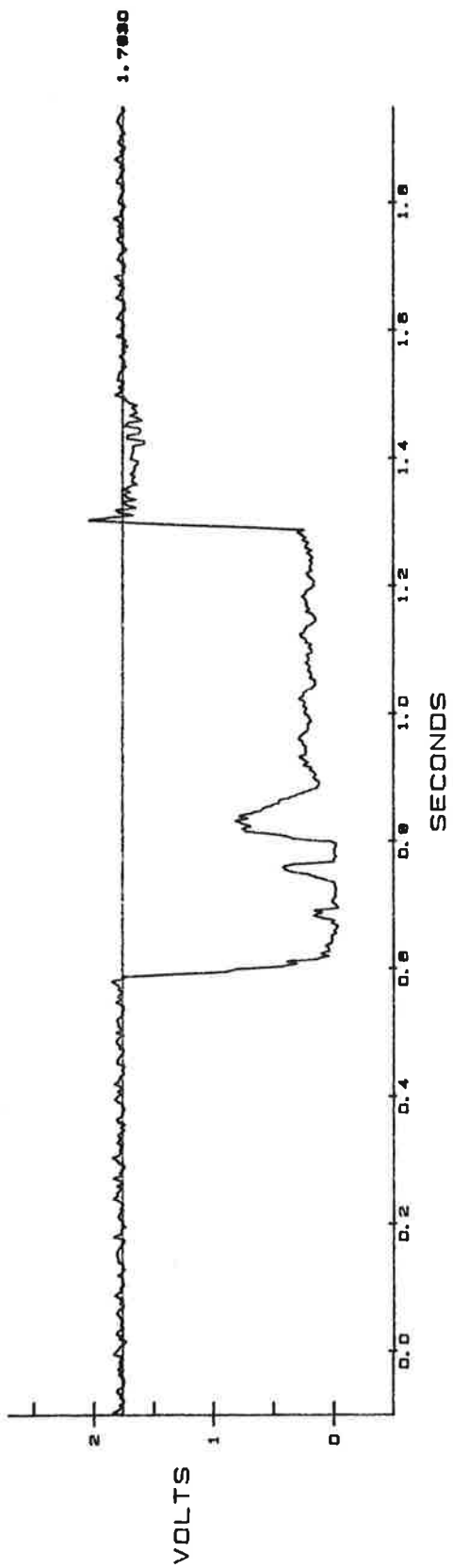


BUF. A4 Gamma

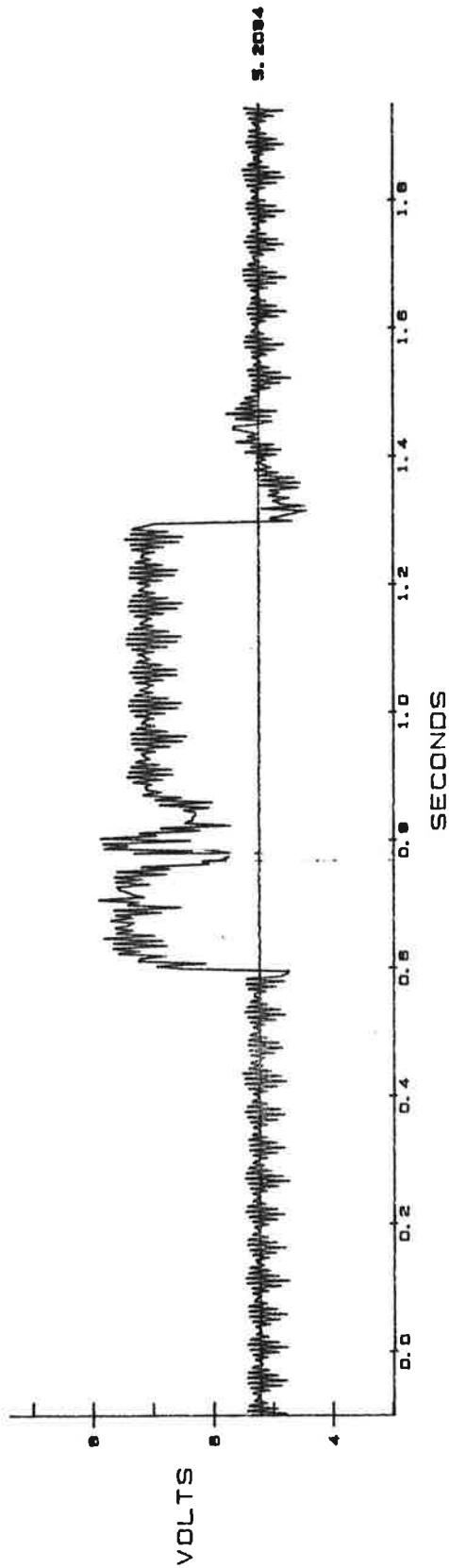


Modifierat kort
 IO steg 90 → 0 %, 0 → 90 %
 Spänning AC-nät ca 10,5 V
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$

BUF. A1 Id pole

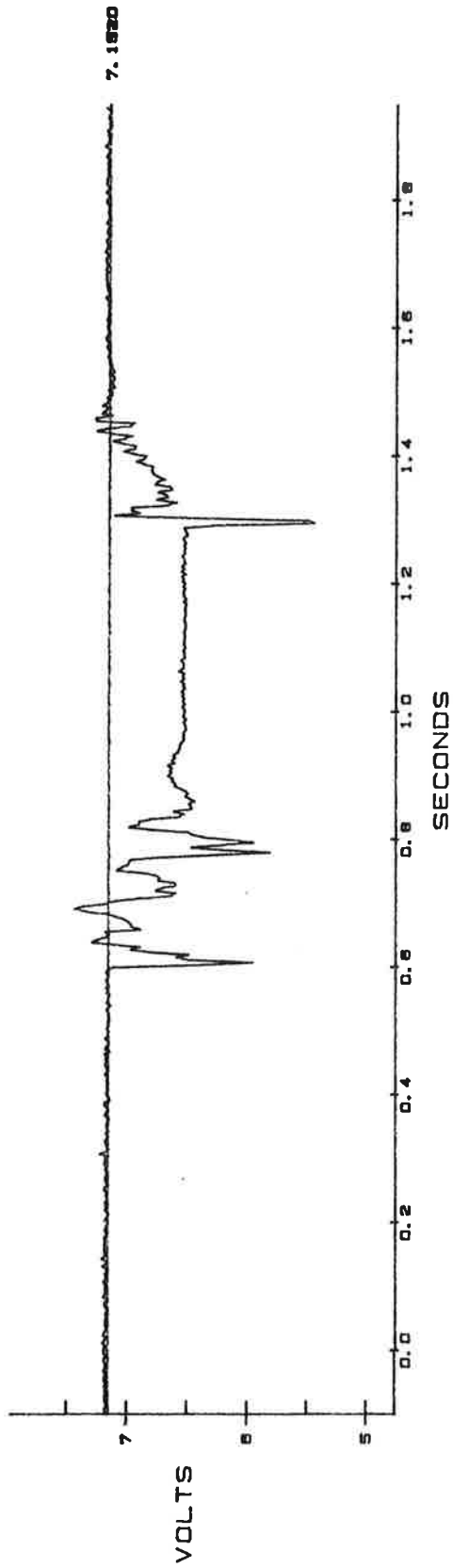


BUF. A2 UDIO

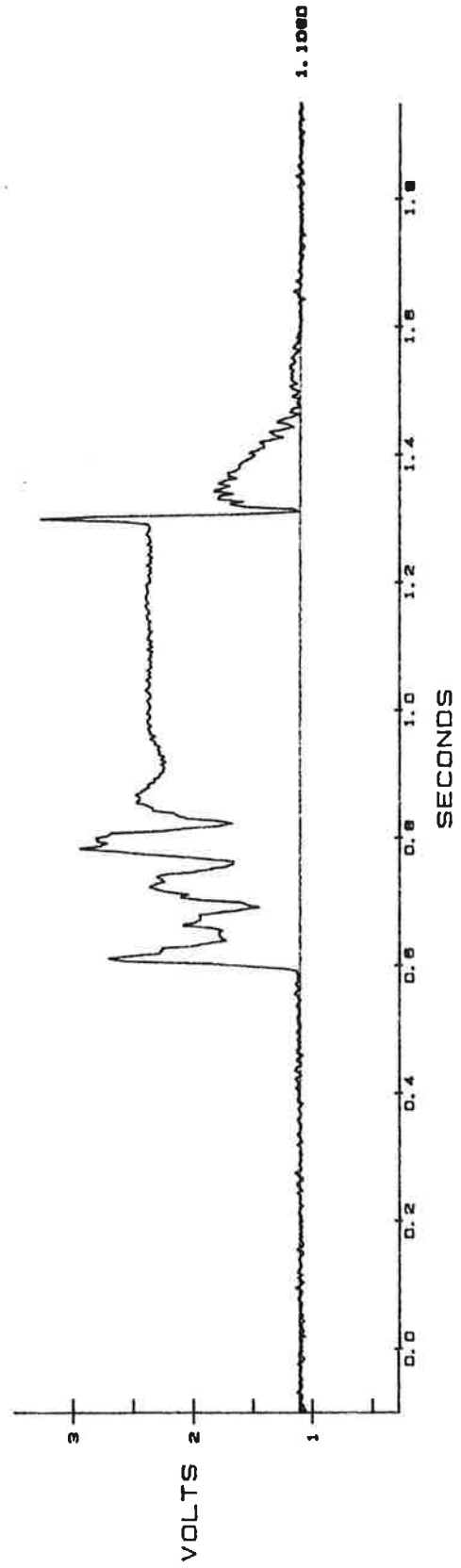


Modifierat kort
10 steg 90 → 0 %, 0 → 90 %
Spänning AC-nät ca 10,5 V
L_{nät} = 50 mH
dx = 6 %

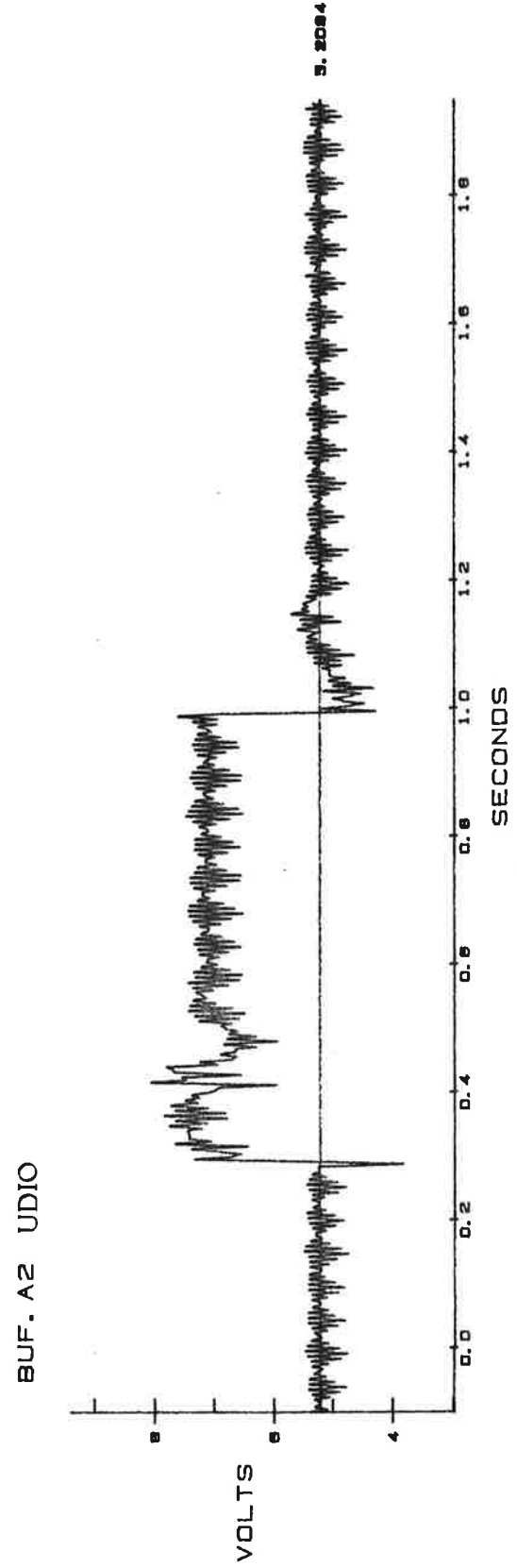
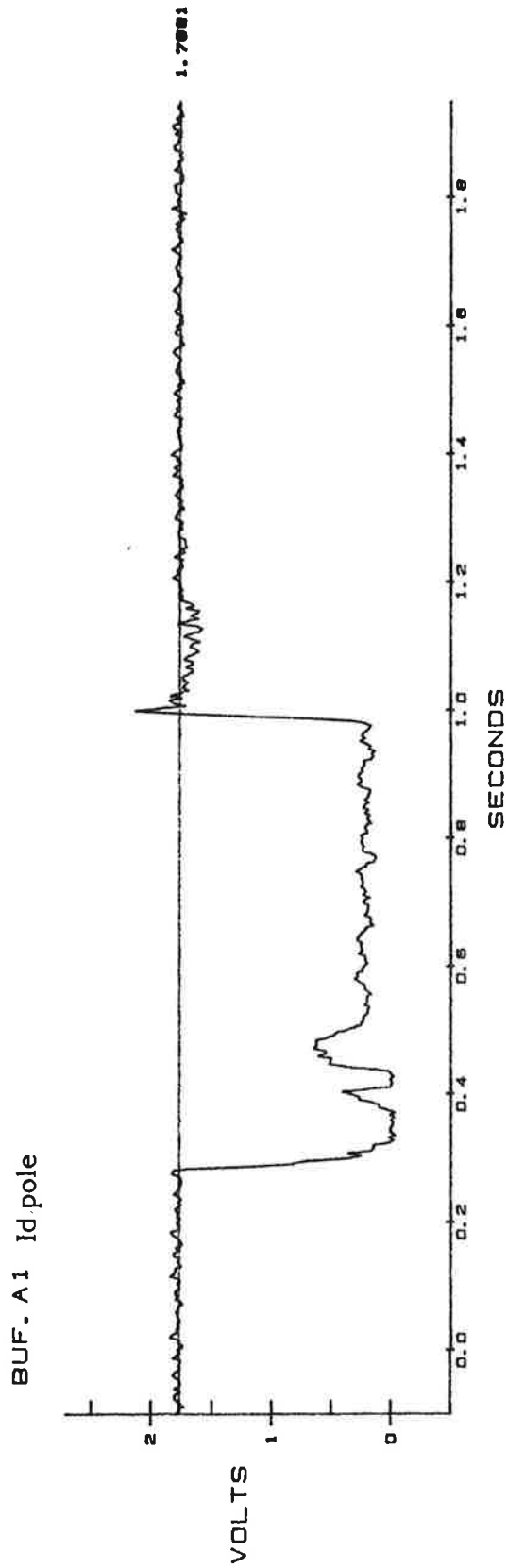
BUF. A3 Alfa



BUF. A4 Gamma

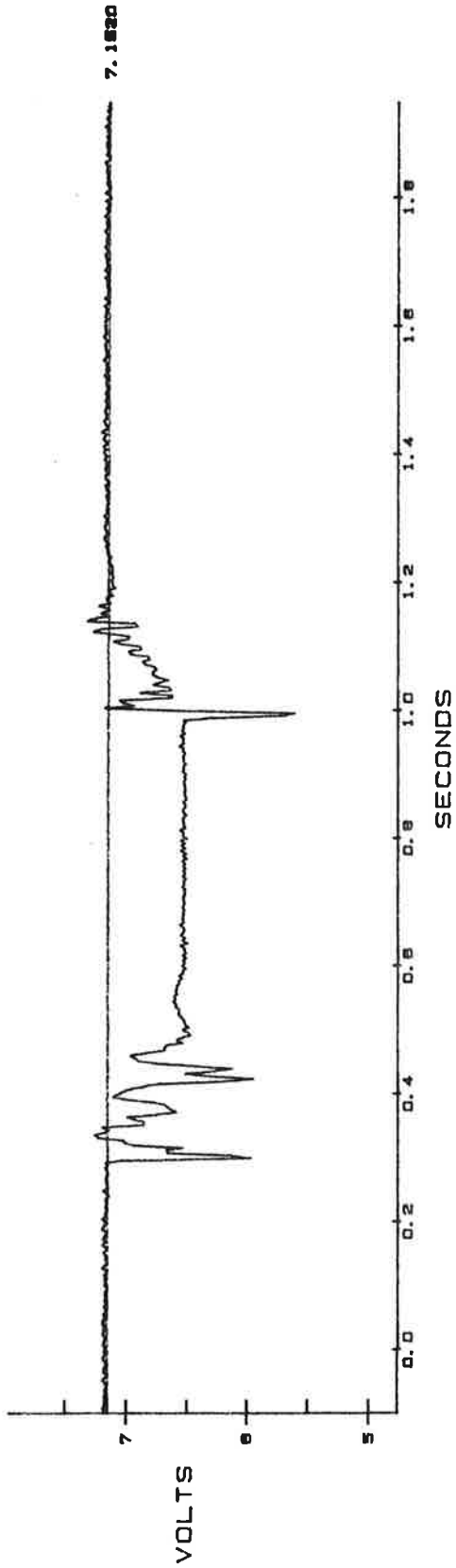


Ej modifierat kort
IO steg 90 → 0 %, 0 → 90 %
Spänning AC-nät ca 10,5 V
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$

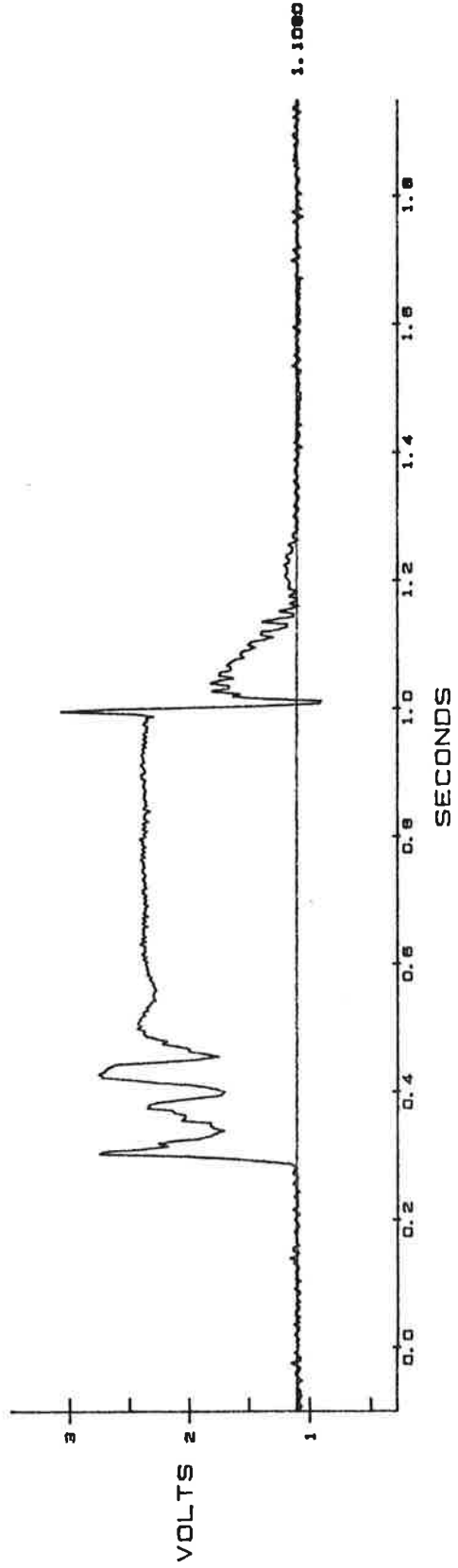


Ej modifierat kort
10 steg 90 → 0 %, 0 → 90 %
Spänning AC-nät ca 10,5 V
L_{nät} = 50 mH
dx = 6 %

BUF. A3 Alfa

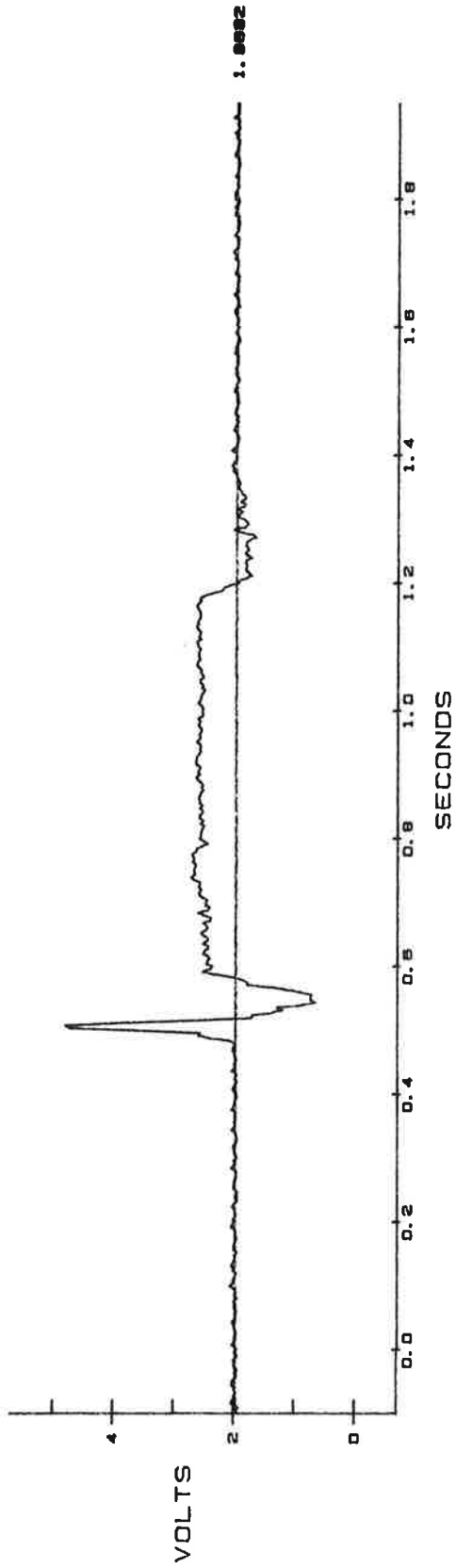


BUF. A4 Gamma

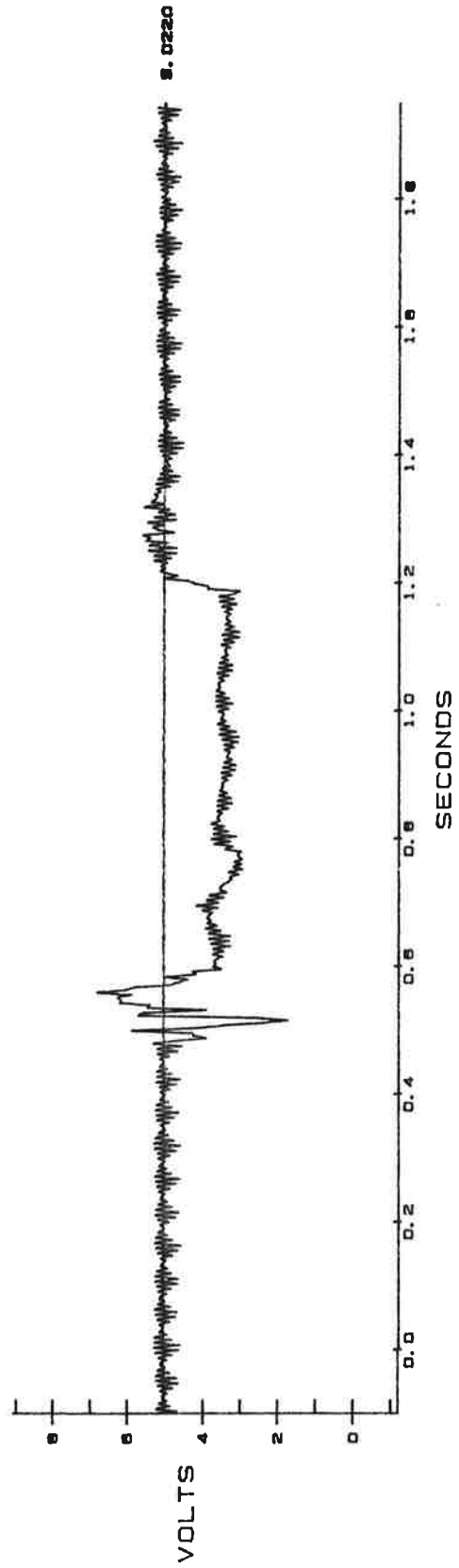


Modifierat kort
IO steg 100 → 130 %, 130 → 100 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$

BUF. A1 Id pole

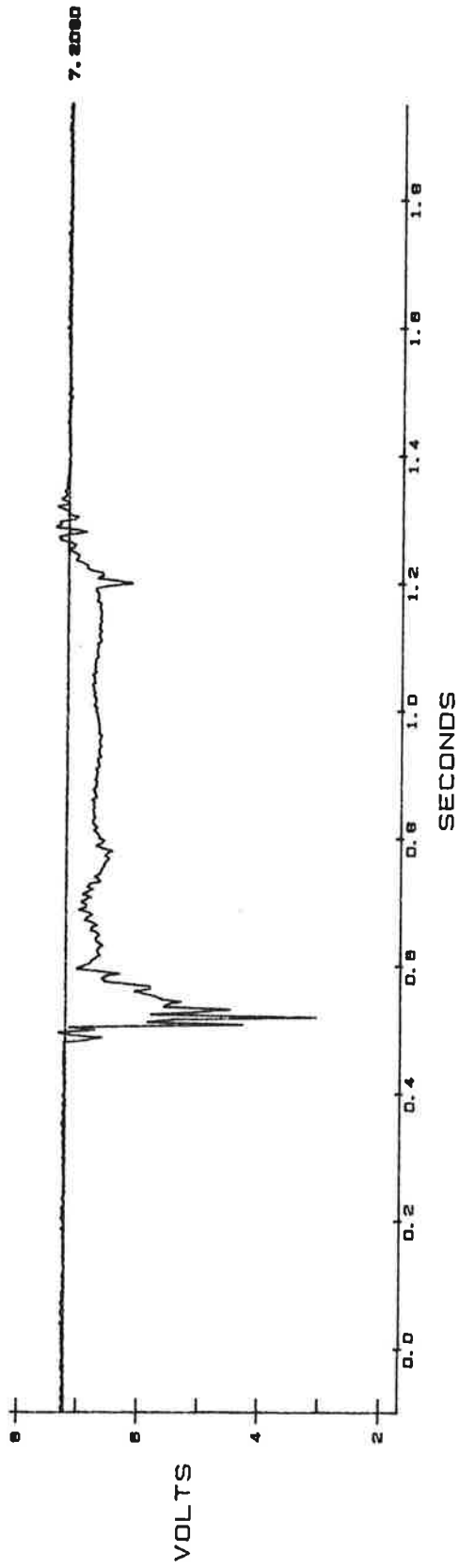


BUF. A2 UDIO

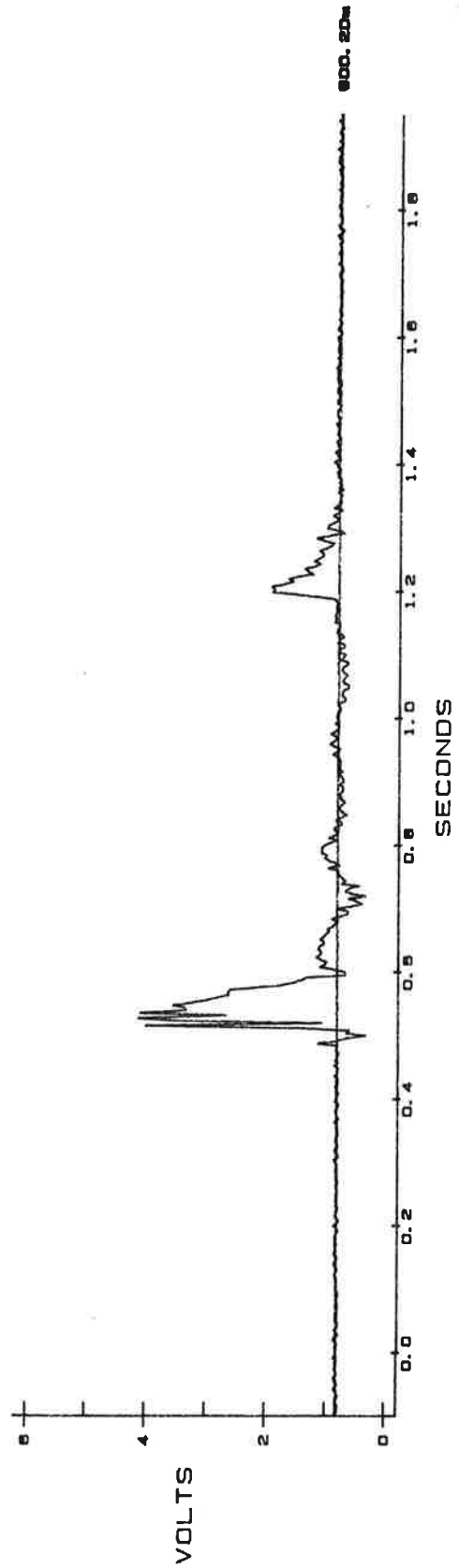


Modifierat kort
10 steg 100 → 130 %, 130 → 100 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$

BUF. A3 Alfa

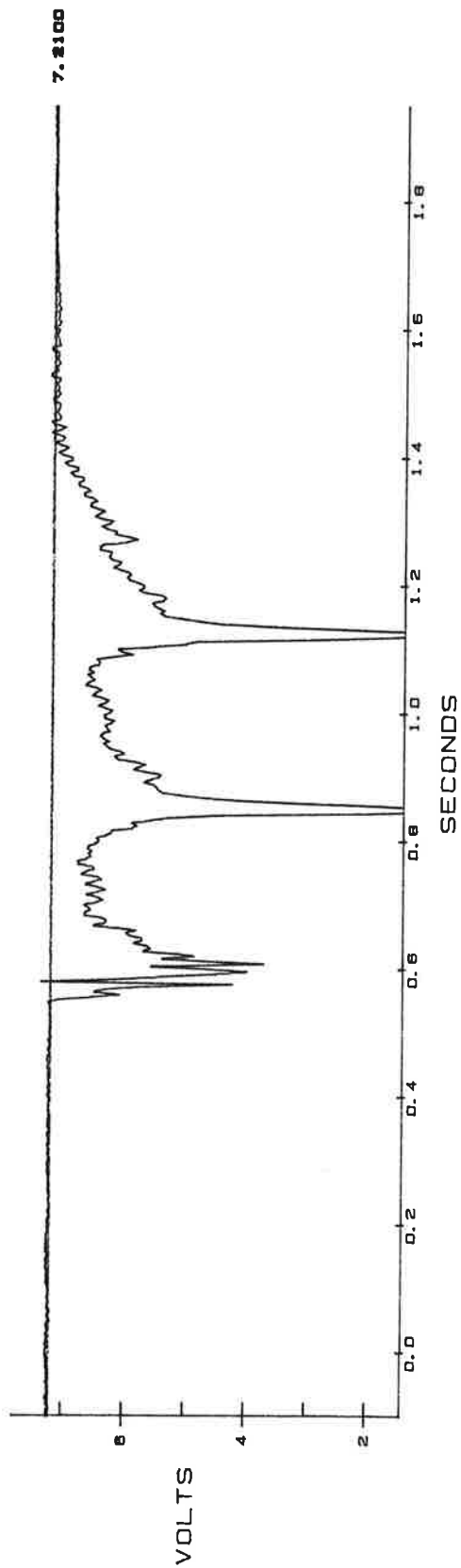


BUF. A4 Gamma

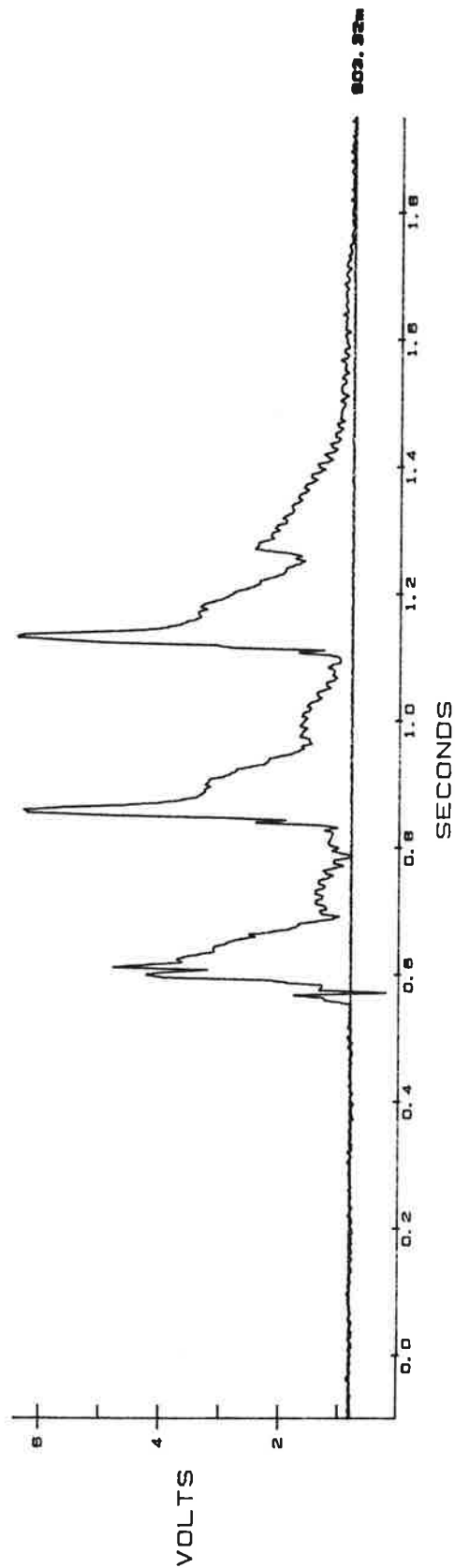


Ej modifierat kort
IO steg 100 → 130 %, 130 → 100 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$

BUF. A3 Alfa

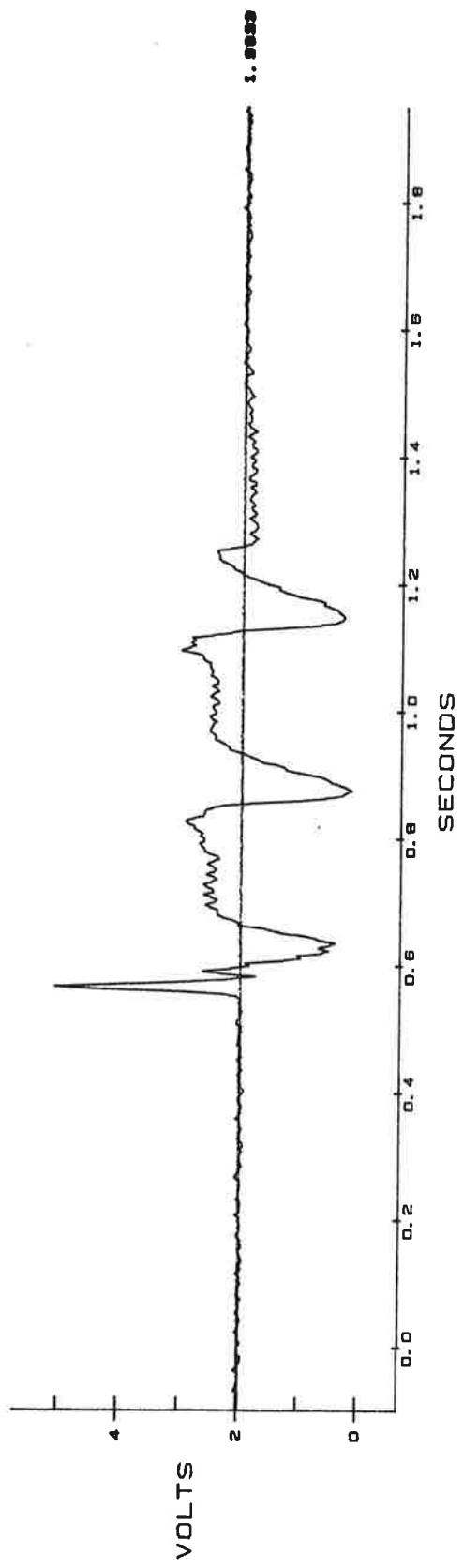


BUF. A4 Gamma



Ej modifierat kort
I0 steg 100 → 130 %, 130 → 100 %
 $L_{\text{nät}} = 50 \text{ mH}$
 $dx = 6 \%$

BUF. A1 Id pole



BUF. A2 Gamma

