

Drivenhet för satellitantenner

Mattias Holmberg
Erik Malmborg

Luleå tekniska universitet
Civilingenjörsprogrammet
Teknisk fysik
Institutionen för Systemteknik
Avdelningen för EISLAB

Förord

Detta examensarbete inom Civilingenjörsprogrammet – Teknisk fysik är utfört på institutionen för Systemteknik vid Luleå tekniska universitet. Det genomfördes under perioden september 2009 till maj 2010. Projektet utfördes på beställning av Satmission AB.

Det är många som har hjälpt oss under projektet med allt från granskning till att svara på frågor som dykt upp. Vi vill tacka alla dem som hjälpt oss och rikta ett extra stort tack till några av dem för den tid de lagt ner på att hjälpa oss är:

- Kalevi Hyypä, vår handledare som alltid haft värdefulla kommentarer om designen och varit till stor hjälp vid rapportskrivandet.
- Göran Risén och Conny Hedman, våra kontakter på Satmission som gjorde examensarbetet möjligt och för all den tid de lagt för att stödja oss så att arbetet kunnat fortskrida och utvecklas.
- Mikael Larsson, som hjälpt oss med layoutfrågor och mönsterkortstillverkning.

Vi har haft väldigt roligt under arbetets gång och känner att vi har lärt oss väldigt mycket. Trots all extra tid vi lagt på arbetet så önskar vi att vi hunnit längre så att ännu fler testet hade kunnat utföras.

Efter önskemål från Satmission så kommer inte komponentnamn eller fullständig layout att redovisas.

Abstract

The task in this master thesis was to design and construct a prototype of a satellite antenna driver unit. The unit is to be robust and work in cold weather down to -40°C , so that it can be mounted on the roof of a minibus. A microcontroller controls the H-bridges simultaneously, each connected to an electrical motor. Hardware and software protections were implemented to ensure that the antenna can not turn outside its allowed area and risk breaking. The unit can output voltages at many different levels and communicate at a multitude of signal standards.

Innehållsförteckning

1 Inledning	5
1.1 Bakgrund.....	5
1.2 Syfte	5
1.3 Mål	5
1.4 Avgränsningar.....	6
2 Metod	7
2.1 Övergripande metod.....	7
2.2 Design	7
2.3 Layout	8
2.4 Tester.....	8
3 Förstudie	9
3.1 Ingångsvärden	9
3.2 Komponentfunktioner	10
4 Resultat	14
4.1 Drivenhetens utformning	14
4.2 Testresultat från slutprototypen	19
5 Diskussion.....	24
5.1 Val av komponenter	24
5.2 Design	25
5.3 Layout	26
5.4 Programmering	27
5.5 Hårdvarustöd.....	27
5.6 Fortsatt arbete.....	27
Appendix.....	29
A1 Litteraturstudie	29
A2 Grundförslag från Satmission	30
A3 Anslutningar till kretskorten	32
A4 Förtydligande av anslutningspinnarna för H-bryggorna.....	34
A5 Elschema	35
A6 Logiktabell över hårdvaruskyddet	39
A7 Mätningar på H-brygga.....	40

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Satmission AB är ett företag som utrustar minibussar för att kunna sända radio och tv live. Produkten man säljer är ett färdigt system som innehåller allt i från parabolantenner för satellitkommunikation till studiomaterial och inredning av minibussen. Satmission vill bli konkurrenskraftigare genom att minska sina kostnader och bygga delar av systemet själva.

För att rikta in parabolantennen mot satelliten används en styrenhet som kopplas till en drivenhet. Styrenheten vet positionen som en förbestämd satellit befinner sig på och beräknar utifrån sin egen position hur parabolantennen ska ställas in för att kunna upprätta sändningskontakt. Drivenheten tar kommandon från styrenheten och vrider antennen.

1.2 Syfte

Satmission AB vill göra sin produkt konkurrenskraftigare på marknaden genom att minska tillverkningskostnaderna. De vill även minska utrymmet som utrustningen tar inne i bussen, genom att flytta delar av den till taket.

Examensarbetet syftar till att ta fram en prototyp av en drivenhet. Hög kostnadseffektivitet ska eftersträvas och drivenheten ska vara robust designad så att den tål både vibrationer och kraftig kyla. Prototypen ska kunna ersätta nuvarande drivenhet och kan då placeras på taket bredvid antennen istället för inuti bussen. Dessutom ska drivenheten vara flexibelt designad så att det lätt ska gå att uppgradera systemet med ytterligare sensorer om så önskas.

1.3 Mål

Att ta fram en drivenhet som:

- Klarar av att fungera ner till -40°C .
- Kräver minimalt med inställningar för varje tillverkad enhet (automatisk kalibrering).
- Snabbt hittar vald satellit.
- Har en robust design som tål vibrationerna som uppstår i en minibuss.
- Är enkel att uppgradera med fler sensorer.
- Är billigare än de som nu finns på marknaden.

1.4 Avgränsningar

- Samtliga komponenter ska från tillverkaren vara specificerade för -40°C eller kallare.
- Kostnadseffektivitet prioriteras framför enkelhet och tidsåtgång.
- De motorer som finns i Satmissions befintliga system ska användas. Som motordrivare används en färdig komponent.
- Satmission ansvarar för beräkningar av satelliternas positioner. Satellitens positionsangivelser fås från styrenheten som finns inne i bussen.
- I examensarbetet ingår endast den programmering som krävs för att verifiera hårdvaran. Satmission ansvarar för den slutliga programmeringen.
- Satmission ansvarar för inkapslingen av enheten.

2 Metod

2.1 Övergripande metod

Projektet har bedrivits efter den dominerande arbetsmodellen inom elektronikbranschen vilket innebär att grundförslaget från kunden granskas och kompletteras i samråd med kund. Hela elektronikdesignen byggs sedan upp i ett designprogram och de analoga delarna simuleras tills förväntade värden uppnåts.

Nästa steg är att lägga in designen i ett layoutprogram och skapa en layout. När denna är klar och dubbelkollad, detta på grund av att varje tillverkning är kostsam och tar mycket tid, skickas filerna iväg för tillverkning av kretskort.

När kortet är tillverkat löds först spänningsregulatorerna fast. Efter att ha mätt att alla spänningsnivåer är rätt så löds de analoga komponenterna fast och kontrolleras så att de ger de förväntade spänningsnivåerna. Efter kontrollen löds ytterligare komponenter fast och kontrolleras. På samma sätt fortsätter det tills alla komponenter är monterade.

För att se att de digitala delarna fungerar som de ska skrivs testprogram med specifika uppgifter, till exempel seriekommunikation. Genom dessa tester hittas eventuella fel vilka åtgärdas. När alla funktioner har testats uppdateras layouten så att nästa prototypkort blir felfritt. Proceduren upprepas med det nya kortet och när inga fel hittas så går man vidare med fälttester.

I den sista fasen testas produkten integrerad med resten av systemet. Här kommer det in mycket mera störningar och därför är det viktigt att designen är robust så att de yttre störningarna inte påverkar drivenhetens prestanda. Dessutom kan eventuella fel, på grund av defekter som inte hittats, göra stor skada på övriga enheter i systemet. Därför krävs stor försiktighet och noggranna metodiska tester. Tyvärr hann denna fas inte genomföras inom projektet.

2.2 Design

Kretsarna designades i OrCAD Capture. De analoga delarna simulerades i PSpice tills de uppfyllde ställda krav. Allt eftersom projektet fortskred så ändrades designen och de analoga delarna byttes ut mot digitala varpå inga simuleringsresultat redovisas. I ett hierarkiskt blockschema kopplades delarna ihop med mikrokontrollen vilket gjorde att det gick lätt att kontrollera att alla delar kunde få de signalerna som de behövde. Fördelen med det hierarkiska blockschemat var att varje del kunde isoleras och simuleras var för sig samt att det var lätt att få en bra överblick över designen.

Designen kopierades till Eagle Cadsoft där allt kopplades ihop till en stor layout vilken behövdes bearbetas då ingen hänsyn tidigare tagits till hur komponenterna egentligen såg ut. Målet med OrCAD var att få en design som kunde fungera, målet med Eagle är att ta denna design och få den att fungera.

2.3 Layout

Från början var tanken att bygga på ett kort (160*100mm²) men ganska snart blev det stora problem att dra ledningar mellan mikrokontrollern och de olika enheterna. Därför valdes istället två separata kort (80*100mm) som kan monteras ovanpå varandra och kopplas samman med sladdar. På detta sätt kunde även de analoga delarna smidigt och enkelt isoleras från den digitala elektroniken.

Tanken med layouten var att ha ett stort obrutet jordplan på undersidan och 10V delarna som bland annat används för den känsliga avläsning av azimutvinkeln så nära varandra som möjligt för att minska störningarna. För att göra kortet så flexibelt som möjligt drogs många av de lediga utgångarna från mikrokontrollern till stiftlistor vid kanten. De kommunikationsportar som man inte planerat att använda drogs till separata lister och kopplades så att de enkelt kan användas om behovet skulle uppstå.

För nästan alla komponenter som användes skapades egna eaglekomponenter. Detta för att vara säker på att få rätt utformning på footprints samt att det oftast går snabbare att skapa en ny eaglekomponent än att leta reda på en existerande modell.

2.4 Tester

De första testerna på ett kretskort är alltid att se så att spänningsregulatorerna ger rätt utspänning. När regulatorerna har ställts in kan övriga komponenter monteras och testas. Först testas de analoga delarna och jämförs mot de försimulerade resultaten. När justeringar gjorts för att få stabila signaler testas de digitala delarna. Små testprogram skrivs och inledningsvis testas varje komponent så isolerat som möjligt, dvs. allt som går att ha avstängt är av. När det säkerställts att alla delar fungerar separat kopplas större kedjor med komponenter på tills hela kortet är aktivt med alla sensorer inkopplade.

3 Förstudie

3.1 Ingångsvärden

Satmission AB vill ta fram en ny drivenhet som ska används för att vrida en satellitantenn avsedd för tv och radiokommunikation. Det system som användas idag är dyrt och Satmission hoppas kunna pressa priset för att bli konkurrenskraftigare genom att bygga fler delar själva. Drivenheten ska monteras tillsammans med antennen på taket av en minibuss vilket leder till att enheten utsätts för kyla och regn. Drivenheten ska seriellt kommunicera med en styrenhet som finns installerad inne i minibussen. Data från gps och kompass vidarebefordras till styrenheten som beräknar och skickar tillbaka vilken bäring och elevation som krävs för att antennen ska få kontakt med satelliten. Drivenheten bearbetar informationen och ställer in antennen mot satelliten med hjälp av en elevations- och en azimutmotor. För att mäta elevationsvinkeln används en tvåledsvinkelgivare, som ger antennens vinkel i förhållande till horisontalplanet, och för att mäta azimutvinkeln används en kompass i kombination med en potentiometer. Detta gör att man kan parkera bilen i alla riktningar och lutningar men ändå hitta satelliten. Slutligen ställs sändarens polarisation in med en tredje motor som övervakas av ytterligare en potentiometer.

För att skydda antennen från att vridas sönder vid ändlägena kommer Satmission att montera fyra induktiva givare som tillsammans med potentiometrarna används för övervakning. Dessa givare vill man i första hand implementera som ett hårdvaruskydd som stoppar motorerna och i andra hand övervaka via mjukvara för att se när en motor stoppats eller kunna stanna motorerna med mikrokontrollern. Alla de olika rörelsebegränsningarna i kombination med att antennen alltid ska gå att köra i någon riktning och att det ska gå att packa ihop antennen gör att implementationen blir komplex.

Nästan alla satelliter som används för vidarebefordring av data från fältet till markstation går i en geostationär bana. Det innebär att satelliten står still på samma plats över ekvatorn hela tiden. Man använder sådana banor eftersom det är absolut enklast att upprätthålla kontakten med satelliter som finns där. Ett fåtal satelliter rör sig i en 8:a kring ekvatorn och för att hålla kontakt med en sådan måste antennen vridas kontinuerligt. Satmission vill förstås kunna kommunicera via satelliter i båda sorters banor vilket gör att man helst ska kunna driva azimutmotorn samtidigt som elevationsmotorn.

På marknaden används idag några olika metoder för att hitta satelliterna. Den dominerande är enligt Satmission att man vet satellitens position och med hjälp av gps- och kompass-värden beräknar azimuth och elevationsvinkel till satelliten. När antennen vridits till rätt riktning söker man efter största signal och läser av vilken satellit man hittat. Denna metod kräver en bra riktningsangivelse för att man ska hitta rätt snabbt. En vanlig kompass störs lätt ut och kan visa flera grader fel beroende på järn eller stål i omgivningen som deformerar det jordmagnetiska fältet och går därför bara att använda som riktvärde. För att lösa problemet görs en svepning med ungefär ± 8 grader i azimuthplanet inom sökområdet där satelliten kan tänkas befinna sig. Detta är metoden som Satmission tänkt använda sig av.

Satmission lämnade ett förslag på design i form av ett blockschema, se Appendix 2. Detta låg som grund för förstudien men alternativa lösningar undersöktes för att komma fram till den bästa metoden. Nedan beskrivs några av de komponenter och lösningar som undersökts extra i projektet.

3.2 Komponentfunktioner

H-brygga

En H-brygga är en vanlig drivkrets för DC-motorer. H-bryggan består t.ex. av två effektMOStransistorpar där den översta transistorens drain är kopplad till matningsspänning, dess source är kopplad till den nedre transistorens drain och dess source är kopplad till jord. Motorn kopplas in mellan vardera paret, se M i Bild 1. För att inte få kortslutning får bara en transistor i vardera paret vara öppen (=ledande) samtidigt och för att driva motorn måste de vara diagonalt öppna. Detta gör att motorn kan drivas i båda riktningarna, se Bild 1 för det ena hållet och Bild 2 för det andra hållet. Om de båda undre alternativ båda övre transistorerna är öppna stannar motorn.

När en transistor går från öppet läge till stängt uppstår kraftiga transienter eftersom stora mängder magnetisk energi lagras i motorns spolar. Dessa transienter kan uppgå till flera kV och kan förstöra transistorerna. Som skydd mot dessa transienter kan schottkydioder i serie med effektmotstånd användas, som är parallellkopplade med vardera transistor.

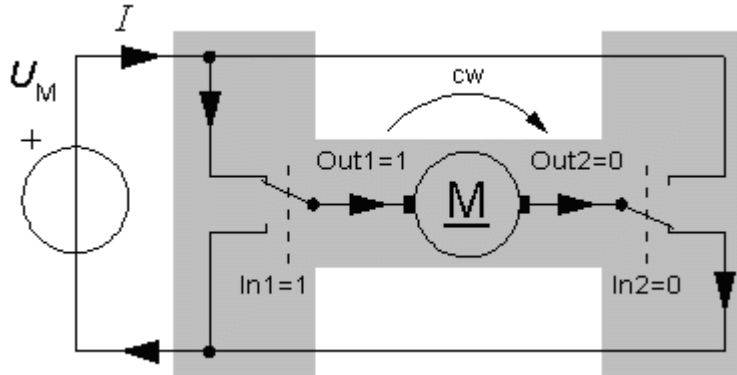


Bild 1 Koppling i en H-brygga för att driva motorn medurs. (www.ict.kth.se)

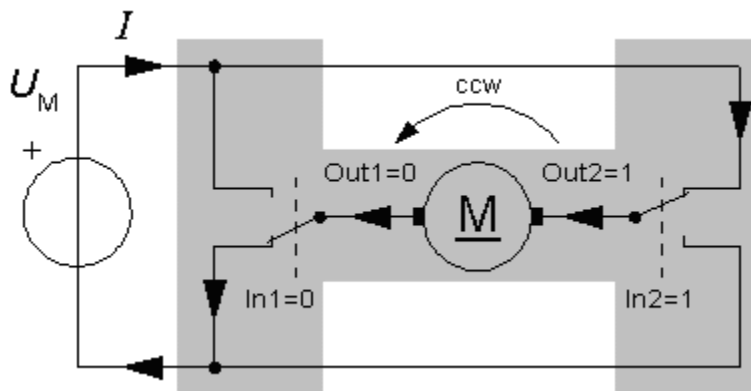


Bild 2 Koppling i en H-brygga för att driva motorn moturs. (www.ict.kth.se)

Reläer och transistorer

Eftersom det ska finnas tre motorer men bara en motordrivkrets är tänkt att användas så behövs en krets som styr vilken motor som ska vara aktiv. Detta går att göra med reläer genom att mikrokontrollen kontrollerar optokopplare som aktiverar reläerna och på så sätt kan bestämma vilken motor som ska användas. Optokopplarna ger en fullständig elektrisk isolation mellan motorerna och mikrokontrollern. Reläer är robusta, enkla att byta ut, men drar mycket ström i aktivt läge och kräver 12V drivspänning.

En annan lösning i stället för reläer är att använda transistorer. Med transientskydd skulle de bli robusta och de går att styra direkt från mikrokontrollen då drivspänningen är 5V. Detta vore en enklare, flexiblare och mindre utrymmeskrävande lösning än den med reläer. Nackdelen är dock att transistorerna måste lödas fast och därmed är krångligare att byta om någon gått sönder samt att isolationen till mikrokontrollern inte kan garanteras.

Komparator eller Schmitt trigger

En komparator får in två signaler och svarar efter förbestämda kriterier om vilken signal som är störst. Denna enkla funktion går att utnyttja om man vill jämföra en signal mot en referenssignal. När V_+ är större än V_- så ger komparatorn ut hög signal och när V_+ är mindre än V_- så ger den ut låg signal.

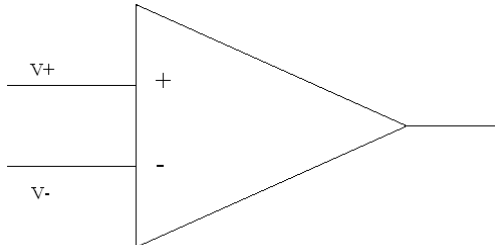


Bild 3 Komparator

En Schmitt-trigger är i grunden en komparator men skillnaden är att den har hysteres. Som Bild 4 visar så ändrar schmitt-trigger utvärde när V_{in} blir lika med V_2 men ändrar inte tillbaka värde innan V_{in} sjunkit till V'_2 . Detta är väldigt fördelaktigt om insignalen har störningar och svängar.

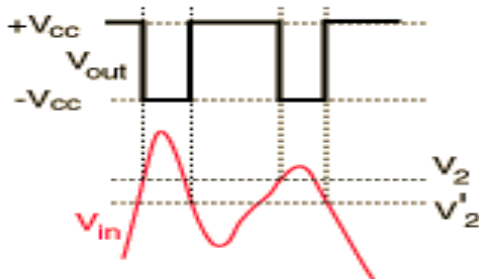


Bild 4 Schmitt-trigger (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>)

Riktningberäkning med kompass och gps

För att veta i vilken riktning bussen är parkerad och därigenom vart antennen är riktad kan man antingen använda en digital kompass, fluxgatekompass, eller två gps:er. En noggrann riktningangivelse är viktig för att snabbt kunna ställa in antennen. Större fel medför att antennen måste göra ett större svep för att säkerställa att satelliten hittas.

Kompassen är enkel att använda men kan ha en deviation på flera grader beroende på omgivningen kring bussen. Deviationen från själva bussen kan man enkelt kompensera för genom kalibrering.

Ett alternativt sätt är att beräkna riktningen med två gps:er. De ger varsin position som används för att räkna ut riktningen mellan dem. Gps:erna ska placeras så långt ifrån varandra som möjligt på antennen för att få en hög noggrannhet. Eftersom antennen bara är ca en meter bred så skulle det ändå krävas väldigt hög noggrannhet på gps:erna för att mätningen ska bli tillförlitlig.

Multiplexer

Satmission vill kunna koppla in fler enheter än det finns seriekommunikationsportar på mikrokontrollen. Detta går att lösa genom att byta till en annan mikrokontroller eller använda en multiplexer. Om man använder en multiplexer finns det teoretiskt ingen begränsning för hur många enheter som man kan kommunicera med, så länge man bara kommunicerar med en i taget. Dessutom är det enkelt att lämna utrymme för att ansluta fler enheter om man senare vill kunna uppgradera systemet med mer hårdvara.

Multiplexern tar in flera insignaler och sänder ut en av dem på utgången. Vilken ingång som används styrs genom en serie av kontrollsignaler. Det finns även multiplexerar som tar parade insignaler och ger ut signalen på två utgångar. Den vanligaste typen fungerar åt båda hållen och heter då multiplexer/demultiplexer, oftast förkortat till mux.

DAC

För att skapa en analog spänning från en digital krets krävs en digital till analog omvandlare. Mikrokontrollern som används, Atmega2560, saknar en inbyggd DAC och därför behövs en yttre krets för att skapa den analoga signalen. En variant är att använda en pulsbreddsmodulerad signal och ett aktivt lågpasfilter med förstärkning. Det ger en DC-signal vars värde beror på pulsbreddens relation till perioden. Detta gör i teorin att vilken spänningsnivå som helst kan genereras inom op-ampens arbetsområde. I Bild 5 nedan visas kopplingen för ett aktivt lågpasfilter som tillsammans med en pulsbreddsmodulerad signal fungerar som en DAC (www.edn.com).

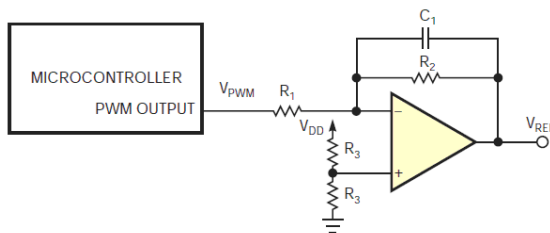


Bild 5 Aktivt lågpasfilter som DAC. (www.edn.com)

4 Resultat

4.1 Drivenhetens utformning

Drivenhetens layout är gjord på två PCB-kort som är tänkta att monteras ovanpå varandra. Det gör att enheten blir mindre utrymmeskrävande och lätt går att montera i en låda som sedan kan placeras på antennenheten. En översiktlig layout över korten med alla dess portar finns i Appendix 3 Bild 12 och 13. Ett blockschema över drivenheten med dess uppbyggnad ses i Bild 6 och 7 nedan och förklaras i texten som följer.

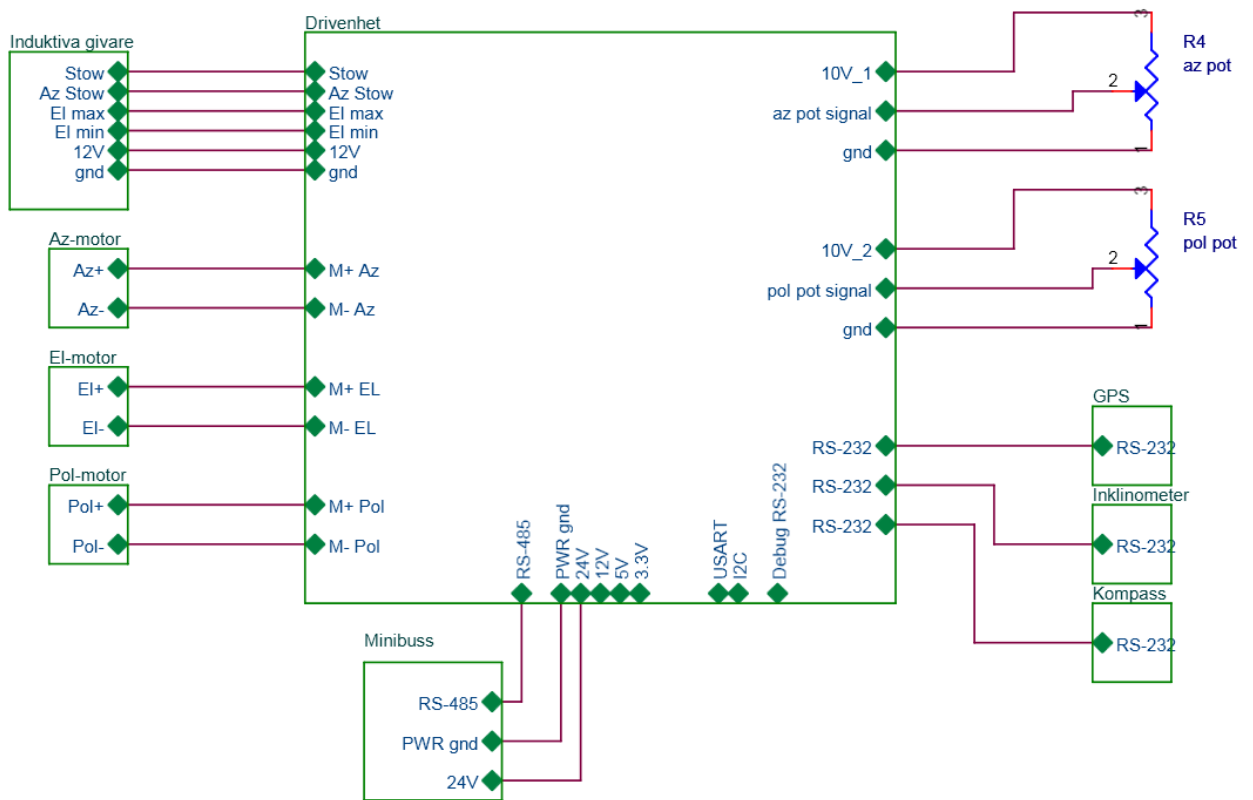


Bild 6 Blockschema över drivenhetens uppbyggnad.

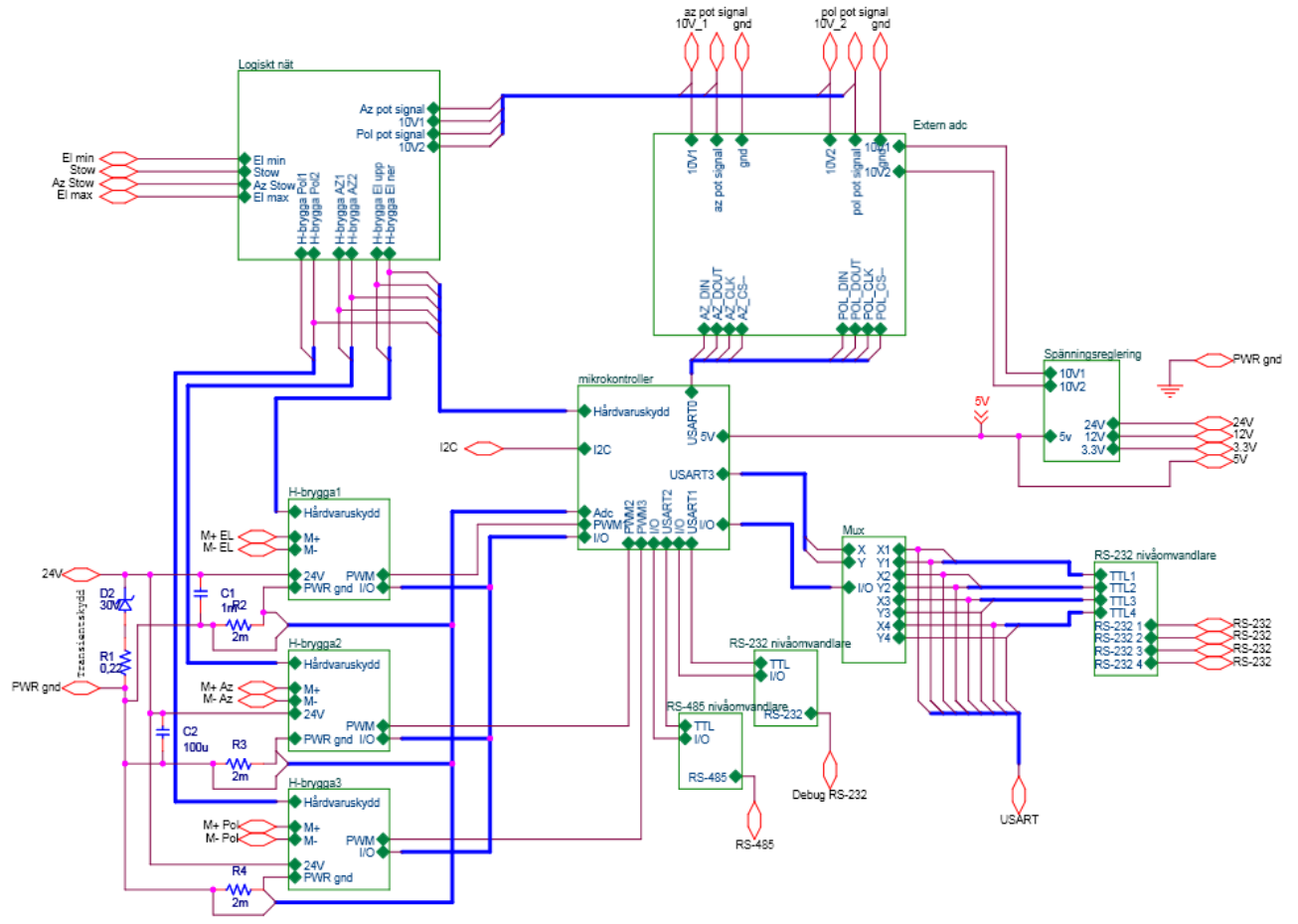


Bild 7

Endast tre sladdar behöver kopplas mellan minibussen och drivenheten, matning på ca 24V, jord samt en sladd för kommunikationen med styrenheten som sker via RS-485. Kommunikationen består i att mikrokontrollern vidarebefordrar sensorernas värden och beräkningsenheten svarar med data om hur motorerna ska röra sig.

De tre motorerna kan styras individuellt eftersom de är kopplade till varsin H-brygga. Anslutningschema för en H-brygga finns i Bild 8 och förtydligande av pinnarnas namn finns i Appendix 4. Hastigheten regleras steglöst med en pulsbreddsmodulerad signal från mikrokontrollern och strömmen genom motorn mäts med mikrokontrollerns interna adc. Mätningen ger en god återkoppling vilket gör att snabba accelerationsförlopp är möjliga utan ryck samt att mätningen går att använda som mjukvaruskydd för att inte få strömrusning om antennen fastnar. För att styra H-bryggans drivriktning används INa och INb, dessutom måste både ENa och ENb vara höga för att tillåta drivning. Hur H-bryggan reagerar på dessa signaler framgår av Tabell 1.

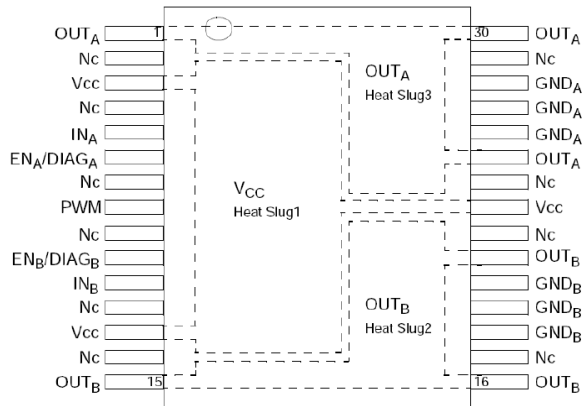


Bild 8 Anslutningsschema för H-brygga.

Tabell 1 H-bryggans riktningstabell.

IN _A	IN _B	DIAG _A /EN _A	DIAG _B /EN _B	OUT _A	OUT _B	Operating mode
1	1	1	1	H	H	Brake to V _{CC}
	L				Clockwise (CW)	
0	1			L	H	Counterclockwise (CCW)
	0				L	Brake to GND

Antennens vridning begränsas av ett hårdvaruskydd för att förhindra att den vrids sönder. Två potentiometrar är monterade på antennen och avläses av komparatorerna för att övervaka ändlägena för polarisations- och azimut motorerna. Elevationsmotorn använder induktiva givare för att indikera maximal- och minimal elevation.

Utöver dessa givare används ytterligare två för att på ett säkert sätt kunna packa ihop antennen när man vill köra med bussen. Den ena av dessa aktiveras när antennen står i läge för att kunna fällas ner. När villkoret är uppfyllt kan antennen alltså fällas djupare än det normala för elevationen. Då antennen sedan nått fullt nerfällt läge aktiveras den sista givaren och antennen kan inte fällas djupare. Ett elschema över hårdvaruskyddet finns i Appendix 5 Bild 18-20 och en logiktabell finns i Appendix 6.

Drivenheten använder sig av ett flertal sensorer för att få information om bussens position och riktning samt antennens vridning i alla led. För att ställa in antennen åt rätt håll används en gps för att få bussens position och en kompass för att ge riktning bussen är parkerad i. För att sedan veta hur antennen är vriden i förhållande till bussen används samma potentiometer som till hårdvaruskyddet. Signalen avläses av en av de externa adc:erna och räknas om till antal grader antennen vridit sig från nollläget. På samma sätt övervakas polarisationsmotorn. Elevationsriktningen övervakas av en tvåledsinklinometer som ger ett värde på antennens lutning i förhållande till det horisontala planet. Det innebär att beräkningarna inte påverkas av att minibussen parkeras i lutning.

Eftersom kompassen har en betydande missvisning kommer den inte gå att ställa in antennen exakt. Det leder till att man behöver svepa ett rymdvinkelområde i närheten av den riktning man förväntas hitta satelliten.

Hårdvaruskydd och mjukvaruskydd

Hårdvaruskyddet är uppbyggt av induktiva givare som ger utslag så att hårdvaruskyddet ger en hög alternativt låg utsignal. De induktiva givarna sitter på antennen och indikerar när antennen vrider sig för långt. När den kommer till ett ändläge aktiveras en givare som via logiska kretsar är kopplad till H-bryggorna. InA eller InB på en eller flera H-bryggor tvingas då låg och den kan inte fortsätta att vrida antennen åt det hållet. Hårdvaruskyddet fungerar utan att mikrokontrollen är inblandad och är alltid aktivt även om mikrokontrollen skulle sluta fungera. Kopplingsschema för hårdvaruskyddet finns i Appendix 5 Bild 17-20.

Mjukvaruskyddet fungerar direkt med mikrokontrollen. Induktiva givare är kopplade direkt till avbrottsingångar på mikrokontrollen. När ett avbrott sker så utför mikrokontrollen något av de inmatade valen beroende på vilken givare som är aktiv. Detta sätt är enkelt att implementera och senare förändra. Till skillnad från hårdvaruskyddet så krävs det inga logiska kretsar utan allt sker i mikrokontrollen. Nackdelen med mjukvaruskyddet är att man inte vet vad som händer om mikrokontrollen går sönder.

Båda varianterna styr H-bryggorna på samma ingångar via en och-grind, vilket leder till att båda systemen måste ge en hög signal för att motorn ska gå att köra. När något av skydden är aktivt tolkar H-bryggan det som ett kommando att bromsa, vilket leder till att antennen stannar tvärt.

Kommunikationsgränssnitt

Korten har stöd för kommunikation via I2C, JTAG, USART, RS-232 och RS-485.

Spänningsnivåer

Korten har utgångar för att driva externa komponenter på 12V, 10V, 5V och 3,3V samt att det ger ut den spänning korten matas med till motorerna. Hur spänningsreguleringen är uppbyggd visas i Appendix 5, Bild 21.

4.2 Testresultat från slutprototypen

H-bryggor

Det gjordes ett flertal tester på H-bryggorna. Hastigheten på motorn beror på pulsbredden i förhållande till perioden på pwm-signalen från mikrokontrollen. Vid olika pulsbredder, 24V inspanning och 5A genom motorn så uppstod inga nämnvärda transienter.

Mätningarna är gjorda på H-bryggans låga ingång och det medför att drivningen är på när spänningen i grafen är på den lägsta nivån, se Bild 9. När transistorparet slås av kommer spolen i motorn fortsätta att driva strömmen och därför går spänningen upp till maxvärdet. Efter hand som strömmen avtar sjunker spänningen och motorn börjar istället fungera som en generator vilket medför att spänningen stabiliserar sig. När sen H-bryggan slås på igen sjunker spänningen och motorn drivs. Bruset i mitten på den första vågformen kan förklaras som brus från borsten i motorn. Varje gång borsten vänder polariteten i motorlindningarna frikopplas lindningen en kort stund. Detta kan ge upphov till en induktiv spik när kopplingen återupprättas (www.mcmanis.com).

Hur långt det här förloppet hinner gå beror naturligtvis på tiden som H-bryggan är av och därför syns bara delar av förloppet om pulsbredden är låg. Fler mätningar finns redovisade i Appendix 7, Bild 22-25.

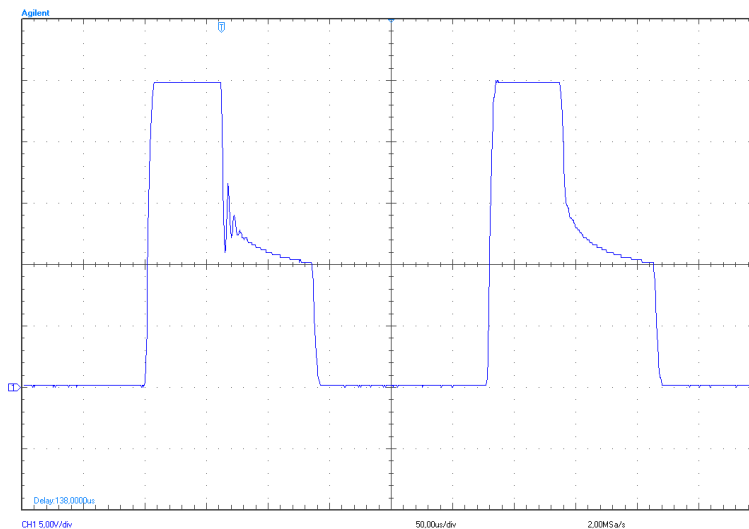


Bild 9 Mätning på H-bryggans låga sida då pulsbredden är 50%

Avsaknaden av transienter är förvånande men tyder på att avkopplingarna är mer än tillräckligt väl tilltagna. Transientskyddsdioden som monterats in visade sig inte behövas vid dessa belastningar.

H-bryggan uppvisar ingen skillnad i funktion och transienter vid genomförande av samma tester som ovan även vid temperaturer ner mot -40°C .

H-bryggorna har värmeledande ytor på undersidan vilket gör att de fördelar värmen ut i kortet. Efter att ha drivit motorn med 8A i 30 sekunder så var H-bryggorna knappt ljumna. Det är främst i uppackningen av antennen som stora strömmarna krävs. Maximalt har Satmission angivit att motorerna drar 12A under en kort stund, hela vridningen tar ca 30 sekunder. Detta enkla test påvisar att värmeavledningsförmågan är tillräcklig.

Hårdvaruskydd

Genom tester verifierades att hårdvaruskyddet fungerar enligt logiktabellen som finns i Appendix 6. Alla möjliga varianter testades och signalnivån mättes vid H-bryggornas ingångar. Dessutom testades funktionen mot en driven motor för att se att det fungerade i systemet. Stoppet kommer momentant efter att en låg signal introducerats på korrekt insignal och motorn tvärstannar.

Spänningsnivåer

Matningsspänningsnivåerna mättes både när motorn var belastad och när den inte hade någon last. Belastningen bestod av en rembroms som stundom drogs åt så hårt att motorn stannade. När motorn var tungt belastad orkade det externa nätaggregatet inte ge den utlovade spänningen men så länge som spänningen fortfarande höll sig över 10,5V fungerade systemet som det skulle. Detta beror på att 12V-regulatorn bara matar andra spänningsregulatorer och att den släpper igenom spänningar under 12V nästan helt opåverkade. Däremot behöver 10V-referensen ha minst 10.2V matning för att hålla sin utspänning stabil och dess stabilitet är kritisk för systemet. För att skydda regulatorerna och H-bryggorna från överspänningar kopplades en zenerdiod med zenerspänningen 30V i serie med en effektoresistor in mellan matning och jord. Samma koppling används också på 5V-nätet där en 5,6V-zenerdiod används.

De logiska grindarna är väldigt känsliga för överspänning och eftersom en högre spänning än 5V oavsiktligt introducerats till nätet under testerna insågs nyttan med ett överspänningsskydd. Detta finns inte på prototyp2 men är inlagt i layouten för nästa kort.

Extern adc

Den externa adc:n visade sig vara väldigt stabil. Insignalen till adc:n kom från den potentiometer som kommer att användas i slutprodukten, se Appendix 5, Bild 16. Den gav en stabil spänningsnivå och mätningarna utfördes med adc:n. Ett program skrevs som samplade adc:ns värde och sedan skrev ut antalet mätningar som givit respektive värde. Testserien bestod av fem mätningar á 10 000 gånger på tre olika inspänningsnivåer, totalt 150 000 mätningar, och resultatet blev tre avvikande värden, se Tabell 2. Avvikelsen var en LSB (9.73mV) vilket motsvarar en missvisning av antennens riktning på 1/3 grad. Även vid kylning ner mot -40 grader bibehålls samma stabilitet.

Tabell 2 Tabell över stabilitetsmätningarna på den externa adc:n.

Inspänning	Mätningar med extern adc	Antal avvikande värden
1.53V	5*10 000	1
5.04V	5*10 000	2
8.95V	5*10 000	0

Den externa adc:n har en mycket god linjäritet. Liknande mätningar som för stabiliteten gjordes på flera olika inspänningsnivåer och resultatet redovisas i Tabell 3 nedan. Maximalt avvek det teoretiska värdet från det uppmätta värdet med en LSB. Dock slutar systemet att vara linjärt när inspänningen i op-ampbuffern överstiger 9.53V. Det beror på att även om op-ampen är rail to rail så gällde det inte för dess ingång som inte kan ta in spänningar högre än 9.53V.

Tabell 3 Tabell över linjäritetsmätningarna.

Potentiometerens utsignal (V)	Op-ampens utsignal (V)	Adc:ns uppmätta värde (bit)	Teoretisk värde (bit)
0,00 (gnd)	0	0	0
1.00	1.00	102	103
2.01	2.01	206	207
2.99	2.99	307	307
4.00	4.00	411	411
4.99	4.99	512	513
6.00	6.00	616	617
7.01	7.01	720	721
8.01	8.01	824	824
9.01	9.01	927	926
9.96 (V max)	9.56	992	1023

Intern adc

Den interna adc:n arbetar med 10 bits upplösning men är inte lika stabil som den externa. Insignalen till adc:n kom från den potentiometer som kommer att användas i slutprodukten. Den gav en stabil spänningsnivå och 10 000 mätningar utfördes med adc:n. Testserien bestod av fem mätningar á 10 000 gånger på tre olika inspänningsnivåer, totalt 150 000 mätningar. Resultatet visar på att en noggrannhet på 9 bit kan förväntas istället för 10 bit. Felmätningarna avvek med en eller två LSB (4.58mV). I varje serie har vi tappat 40 mätvärden då adc:n inte gett något svar tillbaka. Varför vi inte fått svar på dessa mätningar vet vi dock inte. Tabell 4-6 visar svaren från adc:n vid respektive mätserie.

Adc:n kan även användas med intern förstärkning men då minskar stabiliteten avsevärt. Vid 10 gångers förstärkning bör man räkna med att bara de åtta högre bitarna är tillförlitliga. (www.atmel.com)

Tabell 4 Stabilitetsmätningar med 0,50V signal.

Uppmätt värde (bit) Antal värden	99	100	101
Mätning1	9937	0	23
Mätning2	9489	448	23
Mätning3	6403	2614	943
Mätning4	8015	1370	575
Mätning5	8573	697	690

Tabell 5 Stabilitetsmätningar med 2,50V signal.

Uppmätt värde (bit) Antal värden	515	516	517
mätning1	5175	2738	2047
mätning2	6133	1964	1863
mätning3	3630	3708	2622
mätning4	8124	1169	667
mätning5	6468	1790	1702

Tabell 6 Stabilitetsmätningar med 4,51V signal.

Uppmätt värde (bit) Antal värden	933	934	935
mätning1	3769	3852	2231
mätning2	9222	324	414
mätning3	9041	597	322
mätning4	9623	199	138
mätning5	9646	199	155

Den interna adc:ns linjäritet är bra. Liknande mätningar som för stabiliteten gjordes på flera olika inspänningsnivåer och det vanligaste av värdena är det som används som resultatet i Tabell 7 nedan. Maximalt avvek det uppmätta värdet från det teoretiska värdet med tre LSB.

Tabell 7 Tabell över linjäritetsmätningarna.

Signal V	Uppmätt värde	Teoretiskt värde
0 (gnd)	0	0
0,49	100	102
0,99	203	206
1,49	308	310
2,00	414	416
2,50	518	520
3,00	622	624
3,49	724	726
4,00	830	832
4,51	936	938
4,93 (V max)	1024	1024

5 Diskussion

5.1 Val av komponenter

Motorstyrning

Tanken var från början att köpa en servoförstärkare som klarar -40°C . För detta krävs MIL-standard vilket innebär väldigt robust elektronik. Detta visade sig begränsa utbudet av servoförstärkare kraftigt och de som klarade kraven kostade alldeles för mycket för att projektet skulle minska några kostnader. Alternativet var att använda H-bryggor, vilka mikrokontrollen får styra. Förutom aktiverings- och riktningssignaler så används pulsbreddsmodulerade signaler för att styra hastigheter. Tillsammans med transientskydd, återkoppling via strömmätning och hårdvaruskydd visade det sig att denna konstruktion gav en mer flexibel design. Servoförstärkaren kunde bara driva en motor i taget till skillnad mot att använda tre H-bryggor som kan driva var sin motor. H-bryggekonstruktionen är dessutom enklare att använda och väsentligt mycket billigare.

Hårdvaruskydd eller mjukvaruskydd

Valet blev både och. Ett hårdvaruskydd skapades och mikrokontrollen kan kopplas in för att övervaka hårdvaruskyddet. På så sätt går det att, på ett enkelt sätt, kalibrera in hårdvaruskyddet samt få ett effektivt sätt att felsöka. Både hårdvaruskyddet och mikrokontrollen är kopplade till ett logiskt nät som bestämmer om motorn ska gå eller inte. Dessutom måste hårdvaruskyddet och mikrokontrollen ge hög signal till en av riktningsspinnarna för att H-bryggan ska leda ström åt det önskade hållet.

Mikrokontroller och kristall

Satmission har tidigare använt sig av ATmega2560 och den uppfyllde våra grundkrav, därför ansågs det enklast att fortsatt använda sig av den. När komponenterna skulle beställas så visade det sig att 16MHz varianten var slut hos leverantörerna. Kravet på hastighet kom från att RS485 ska arbeta på så hög baud rate som möjligt utan att riskera dataförluster. Om en extern kristall med frekvensen 7,3728 MHz används går det att uppnå baud rate upp till 230,4k och fortfarande ha 0 % fel. Detta är en mer än tillräckligt hög arbetshastighet vilket innebär att en ATmega2560, 8MHz kan användas.

Komparator eller Schmitt-trigger

När antennen vrider på sig, i azimut- och polarisationsriktningen, så vrider sig en potentiometer. Denna vill man använda som referens för hur långt antennen har rört sig och för att stoppa antennen när den nått ändläget. Potentiometern går att avläsa på olika sätt men vid ett hårdvaruskydd är komparator eller schmitt-trigger att föredra då risken för fel blir mindre än vid en mjukvaruavläsning.

Valet föll på en komparator eftersom de utökade funktionerna i en schmitt-trigger inte var önskvärda enligt Satmission. Antennen ska gå att vrida fram och tillbaka i närheten av gränslägen men stanna direkt när den går över.

Ett problem som uppstod var att insignalen måste spänningsdelas från 10 till 5V. Detta skulle göras med så stor resistans att det inte påverkade adc-avläsningen men samtidigt med så små resistanser att signalen in i komparatorn blir stabil. För att säkerställa dessa båda motstridiga fall används en op-ampbuffer mellan potentiometersignalen och komparatoringången.

5.2 Design

Hårdvaruskyddets funktion

En av de svårare delarna att designa var hårdvaruskyddet på grund av dess komplexitet. Signaler från de induktiva givarna är kopplade till ett logiskt nät, se Appendix 5 Bild 17, som i sin tur är kopplat till H-bryggorna. Det logiska nätet består av och- och inverterings-grindar. När någon av givarna aktiveras bearbetas signalen i det logiska nätet och om nätet svarar med låg signal går inte motorn att vrida mer åt det hållet. Hårdvaruskyddet håller koll på om antennen vridit sig för långt åt sidorna, för högt upp eller ner och ifall antennen får falla ihop sig för packning. Övervakning av skyddet går att koppla till mikrokontrollen vilket gör eventuella felsökningar väldigt enkla. En och-grind med en ingång från hårdvaruskyddet och en från mikrokontrollern är kopplad till varje IN-pinne på H-bryggorna. Det gör att båda signalerna måste vara höga för att H-bryggan ska få en hög riktningssignal. Om något av skydden ger en låg signal kommer rörelsefriheten att begränsas.

Transientskydd och överspänningsskydd

Matningsspänningen är kopplad till H-bryggorna och 12V-regulatorn vilka har maximal inspänning på 36V respektive 32V. För att skydda dessa mot transienter monterades en zenerdiod med backspänning 30V i serie med ett effektmotstånd in mellan matningsspänningen och jord.

För att skydda mikrokontrollen mot överspänningar så kopplades en zenerdiod in vid 5V-regulatorn med zenerspänning på 5,6V. I serie med zenerdioden kopplades ett effektmotstånd. Även det logiska nätet visade sig vara känsligt mot högre spänningar så även där kopplades en likadan zenerdiod och resistor in.

10V referens

En referensspänning är byggd för att hålla en mycket noggrann utspänning. Detta gör att den bara kan hantera små strömmar (10mA). Efter beräkningar av hur mycket ström som referensspänningsregulatorerna behöver klara av att ge ut så visade det sig att det krävdes två regulatorer.

För att referenserna inte ska störa varandra driver de varsin separat men likadan krets. Potentiometrarna som drivs av regulatorerna bör vara på minst 5kOhm för att inte riskera systemets stabilitet.

Strömförbrukningen för en av 10V-referenserna ser ut enligt följande:

Tabell 8. Strömberäkning för ett av 10V näten.

komponent	strömförbrukning	Beräkning
Extern adc	3,5mA	datablad
potentiometer	1mA	$\frac{10V}{10kOhm}$
Spänningsdelning	1,5mA	$\frac{10V}{2 \cdot 3,3kOhm}$
2 op-amp	å 20uA	datablad
Totalt	6mA	<10mA

5.3 Layout

De första prototypkorten (prototyp1) gjordes i en kretskortsfräs på LTU. Resultatet blir inte lika bra som om ett företag gör mönsterkorten men det sparar mycket tid. Att göra ett prototypkort gav oss mycket idéer på hur layouten kunde förbättras till den slutgiltiga versionen.

De andra prototypkorten (prototyp2) tillverkades av en professionell mönsterkorts-tillverkare. Eftersom layouten vuxit sedan den första prototypen var det att föredra då möjligheten att få kortet med genompläterade hål fanns, se Appendix 3 Bild 12-13.

Slutligen skapades en prototyp3 som överlämnades till Satmission som CAD-filer med förbättringar av de brister vi funnit på prototyp2. Denna rapport bygger dock på prototyp2.

Den största strömmen som krävs är ungefär 12A och det är när elevationsmotorn arbetar. Banorna till H-bryggan som driver elevationsmotorn placerades nära matningsspänningen och jord för att banorna ska bli så korta som möjligt. Dessa banor gjordes väldigt breda då djupet på banorna på prototypkorten endast kunde vara 35 μ m. För att banorna inte skulle smälta löddes extra koppartråd på banorna för att öka på dess tvärsnittsarea.

5.4 Programmering

Programmeringen utfördes i avr studio (www.atmel.com), där det går att simulera och stega genom händelseförloppet och se alla portars och registers värden. Små testprogram skrevs som hade specifika uppgifter att testa hårdvaran. Det gjorde det enkelt och effektivt att testa varje del och se till att den fungerade. Som debughjälpmedel användes lysdioder inkopplade på lämpliga ställen och utskrifter till datorn via rs-232. Ett flödesschema gjordes i programmet Dia (<http://projects.gnome.org>). Med utgång från det kan det övergripande programmet som kopplar ihop alla delar skrivas.

5.5 Hårdvarustöd

Eftersom kraven på hårdvaran var så höga och kostnadseffektivitet eftersträvats har det fått som följd att flera av de komponenter som valts kommunicerar med olika signalstandard. Detta leder förstås till att man måste skriva mer kod men det gör också att den färdiga produkten kommer vara förberedd för de flesta sensorerna men skulle kunna tänkas uppgradera systemet med.

Prototypkortet har hårdvarustöd för USART, SPI, PWM, I2C, intern och extern ADC, RS232, RS485.

5.6 Fortsatt arbete

Tillverkandet av prototyp 3 kommer att ge ett något mer lättarbetat och robust kort.

Att utföra noggranna tester på det fullständiga systemet är förstås ett måste innan drivenheten kan börja masstillverkas. Tyvärr tillät inte tiden att vi utförde dessa tester.

Referenser

- <http://projects.gnome.org/dia> (2009-11-14)
- www.atmel.com/dyn/Products/tools_card.asp?tool_id=2725 (2009-09-25)
- www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2549.pdf (2009-09-25)
- www.cadsoft.de (2009-10-05)
- www.edn.com/article/CA6372821.html (2009-09-28) (Text)
- www.edn.com/contents/images/6372821f1.pdf (2010-05-17) (Bild)
- www.eecs.tufts.edu/~dsculley/tutorial/opamps/opamps5.html (2009-09-21)
- www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/elessonsHTML/Interfaces/ConvComp.html (2010-03-04)
- www.mcmanis.com/chuck/robotics/tutorial/h-bridge/bjt_analysis.html (2010-05-31)
- www.ne.se, schmitt-trigger (2009-09-27)

Appendix

A1 Litteraturstudie

Nedan listas de viktigaste litteraturerna vi läst för att förbereda oss inför projektet.

- C for the microprocessor engineer
 - S.J.Cahill, 1994, ISBN 0131158252
- Electronically Steerable Antenna Stand Tracking UAV Using GPS
 - ISSN 1402-1617 / ISRN LTU-EX--04/259--SE / NR 2004:259
- Introduction to Mechatronics and measurement systems
 - Alciatore, Histrand. ISBN 9780071254076
- Utveckling av motoriserad antenn för satellitkommunikation
 - ISSN 1402-1617 / ISRN LTU-EX--07/033--SE / NR 2007:033
- Vägen till c, Jan Skansholm
 - Ulf Bilting, 2000, ISBN 9144014686

- http://www.mcmanis.com/chuck/robotics/tutorial/h-bridge/bjt_analysis.html
(100527)
 - förtydliga H-brygge mätningarna.

A2 Grundförslag från Satmission

Bild 10-11 visar utkastet från Satmission som presenterades vid arbetets början. Detta har legat till grund för vår design.

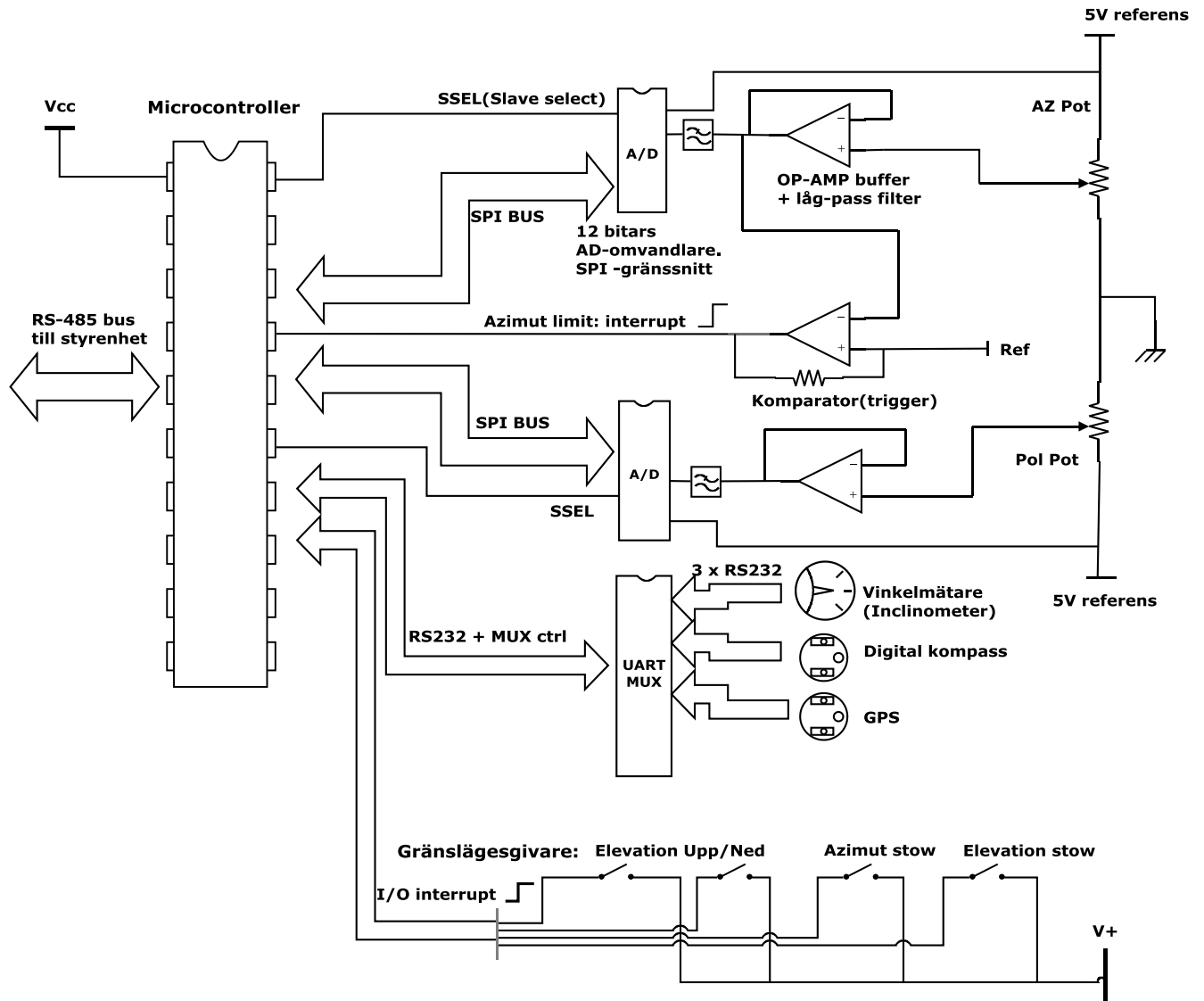


Bild 10 Grundförslaget från Satmission.

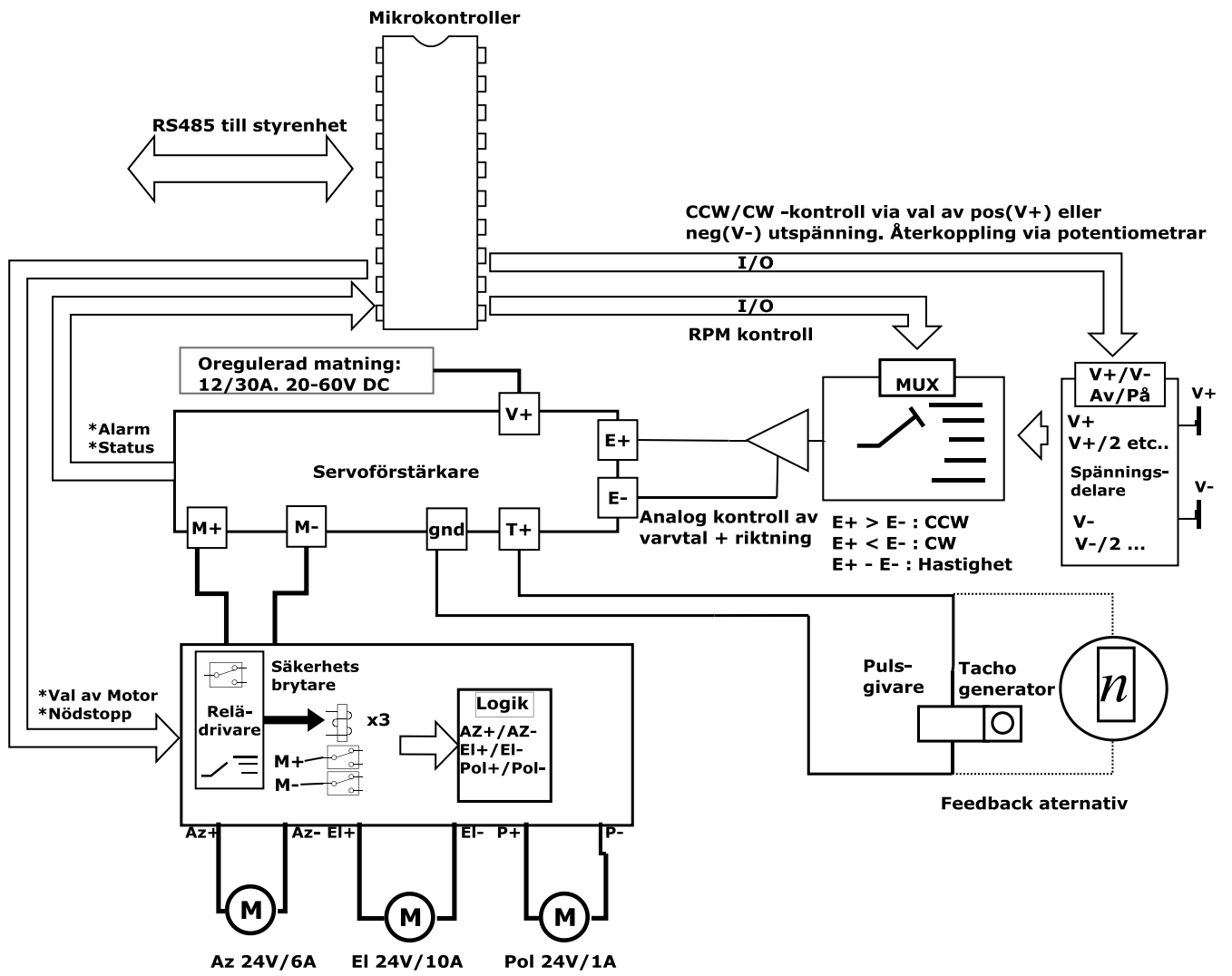


Bild 11 Grundförslaget från Satmission.

A3 Anslutningar till kretskorten

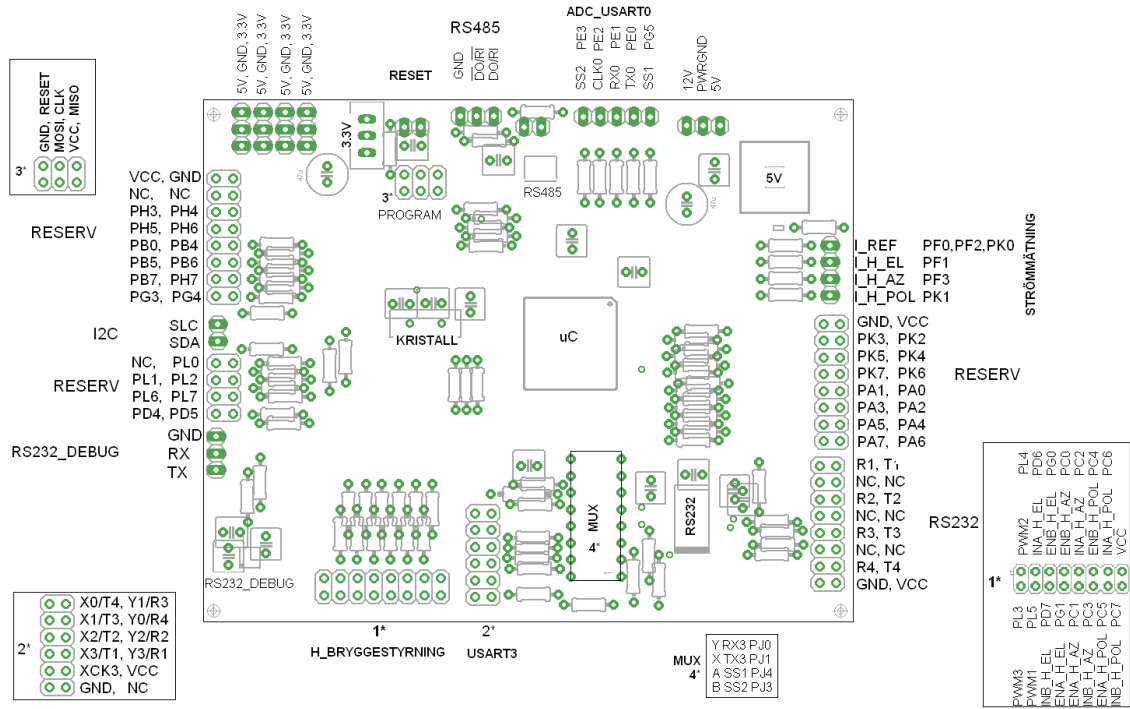


Bild 12 Anslutningar till mikrokontrollkoret

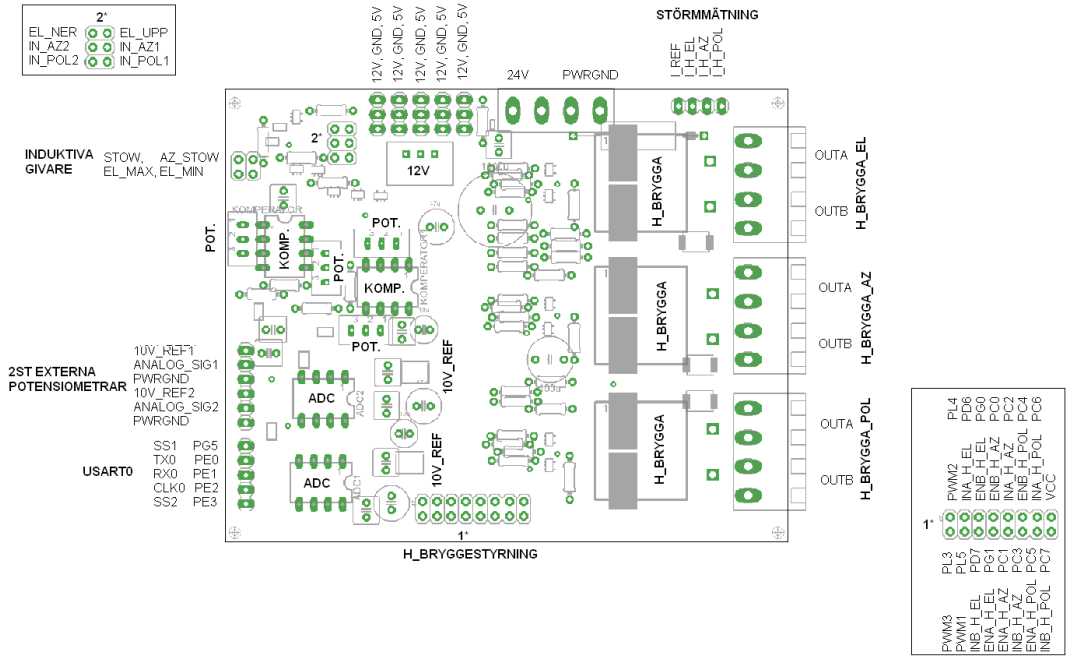


Bild 13 Anslutningar till kraftkortet

Tabell 9 är en sammanställning av portarna från Bild 12-13.

Tabell 9

Utgångar från korten

Mikrokontroll			Mikrokontroll		
PORT	Funktion	Beskrivning	PORT	Funktion	Beskrivning
PC0	ENB_H_AZ	Enable-pinne på h-brygga	PH3	Reserv	
PC1	ENA_H_AZ	Enable-pinne på h-brygga	PH4	Reserv	
PC2	INA_H_AZ	styrpinne på h-brygga	PH5	Reserv	
PC3	INB_H_AZ	styrpinne på h-brygga	PH6	Reserv	
PC4	ENB_H_POL	Enable-pinne på h-brygga	PH7	Reserv	
PC5	ENA_H_POL	Enable-pinne på h-brygga			
PC6	INA_H_POL	styrpinne på h-brygga	PJ0	RX3	Recive USART3, koppling Y till m
					Transmit USART3, koppling X till
PC7	INB_H_POL	styrpinne på h-brygga	PJ1	TX3	multiplexern
PD4	Reserv		PJ4	slave select	A, val av kanal i multiplexern
PD5	Reserv		PJ5	slave select	B, val av kanal i multiplexern
PD6	INA_H_EL	styrpinne på h-brygga			
PD7	INB_H_EL	styrpinne på h-brygga	PK0	I_REF	referensspänning
PE0	TX0	Transmit USART0	PK1	I_H_POL	strömmätning
PE1	RX0	Recive USART0	PK2	Reserv	
PE2	CLK0	Clocka USART0	PK3	Reserv	
PE3	slave select		PK4	Reserv	
			PK5	Reserv	
PF0	I_REF	referensspänning	PK6	Reserv	
PF1	I_H_EL	strömmätning	PK7	Reserv	
PF2	I_REF	referensspänning	PL0	Reserv	
PF3	I_H_AZ	strömmätning	PL1	Reserv	
			PL2	Reserv	
PG0	ENB_H_EL		PL3	PWM3	
PG1	ENA_H_EL		PL4	PWM2	
			PL5	PWM1	
PG3	Reserv		PL6	Reserv	
PG4	Reserv		PL7	Reserv	
PG5	slave select				

Multiplexern	RS232	Beskrivning
X0	T4	Kanal X0 (multiplexern), T4 (RS232)
X1	T3	Kanal X1 (multiplexern), T3 (RS232)
X2	T2	Kanal X2 (multiplexern), T2 (RS232)
X3	T1	Kanal X3 (multiplexern), T1 (RS232)
Y0	R4	Kanal Y0 (multiplexern), R4 (RS232)
Y1	R3	Kanal Y1 (multiplexern), R3 (RS232)
Y2	R2	Kanal Y2 (multiplexern), R2 (RS232)
Y3	R1	Kanal Y3 (multiplexern), R1 (RS232)

A4 Förtydligande av anslutningspinnarna för H-bryggorna

Tabell 10

Pin No	Symbol	Function
1, 25, 30	OUT _A , Heat Slug3	Source of high side switch A / Drain of low side switch A
2, 4, 7, 9, 12, 14, 17, 22, 24, 29	NC	Not connected
3, 13, 23	V _{CC} , Heat Slug1	Drain of high side switches and power supply voltage
6	EN _A /DIAG _A	Status of high side and low side switches A; open drain output
5	IN _A	Clockwise input
8	PWM	PWM input
11	IN _B	Counter clockwise input
10	EN _B /DIAG _B	Status of high side and low side switches B; open drain output
15, 16, 21	OUT _B , Heat Slug2	Source of high side switch B / Drain of low side switch B
26, 27, 28	GND _A	Source of low side switch A ⁽¹⁾
18, 19, 20	GND _B	Source of low side switch B ⁽¹⁾

A5 Elschema

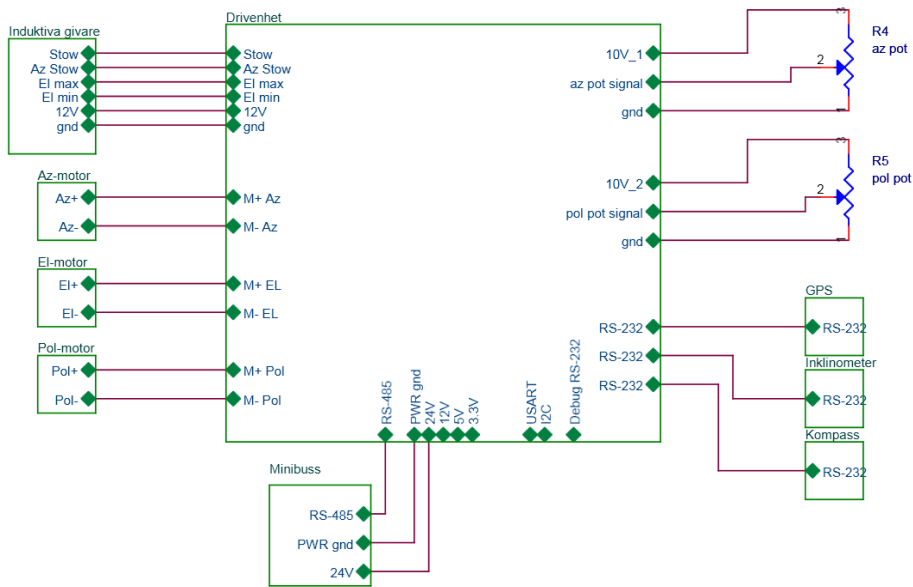


Bild 14 Blockschema över drivenhetens uppbyggnad med externa inkopplingar.

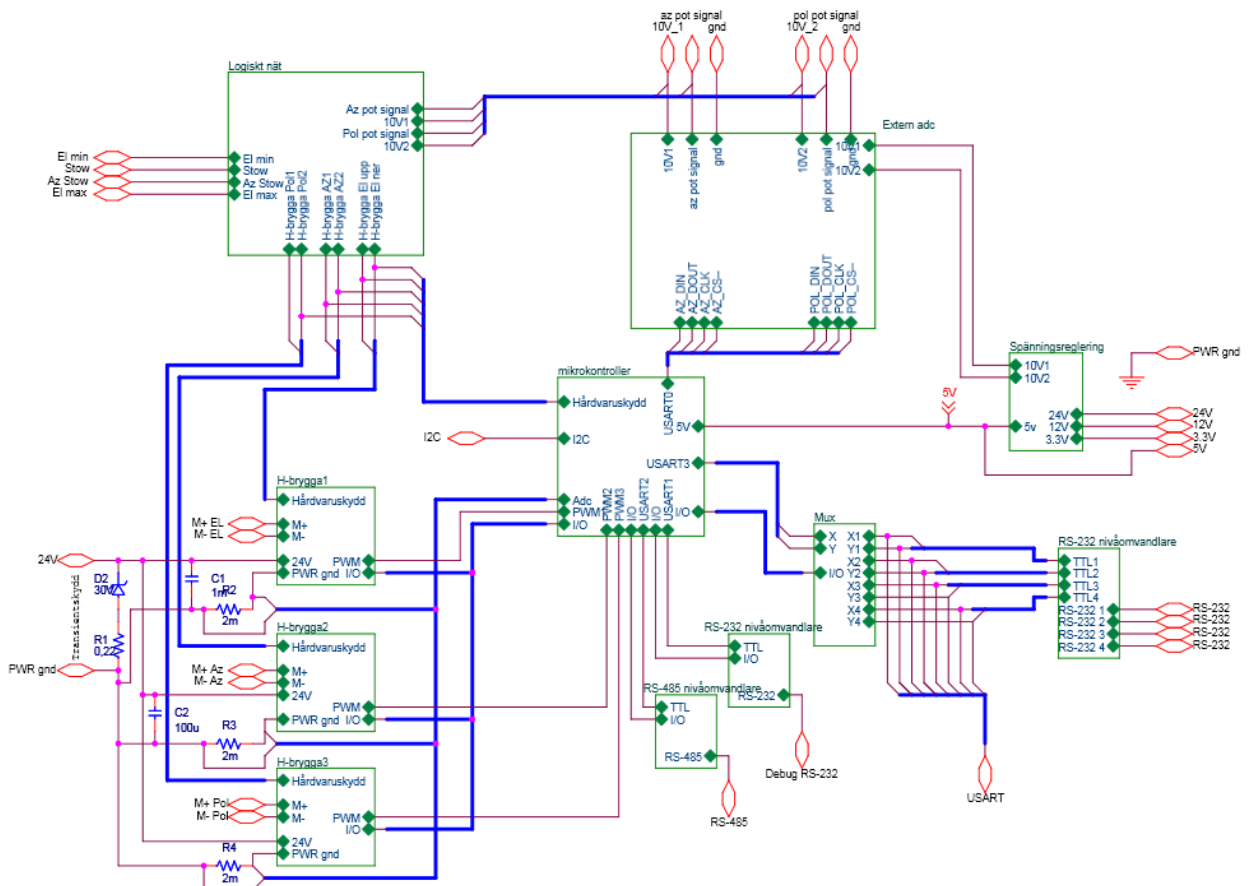


Bild 15 Blockschema över drivenheten.

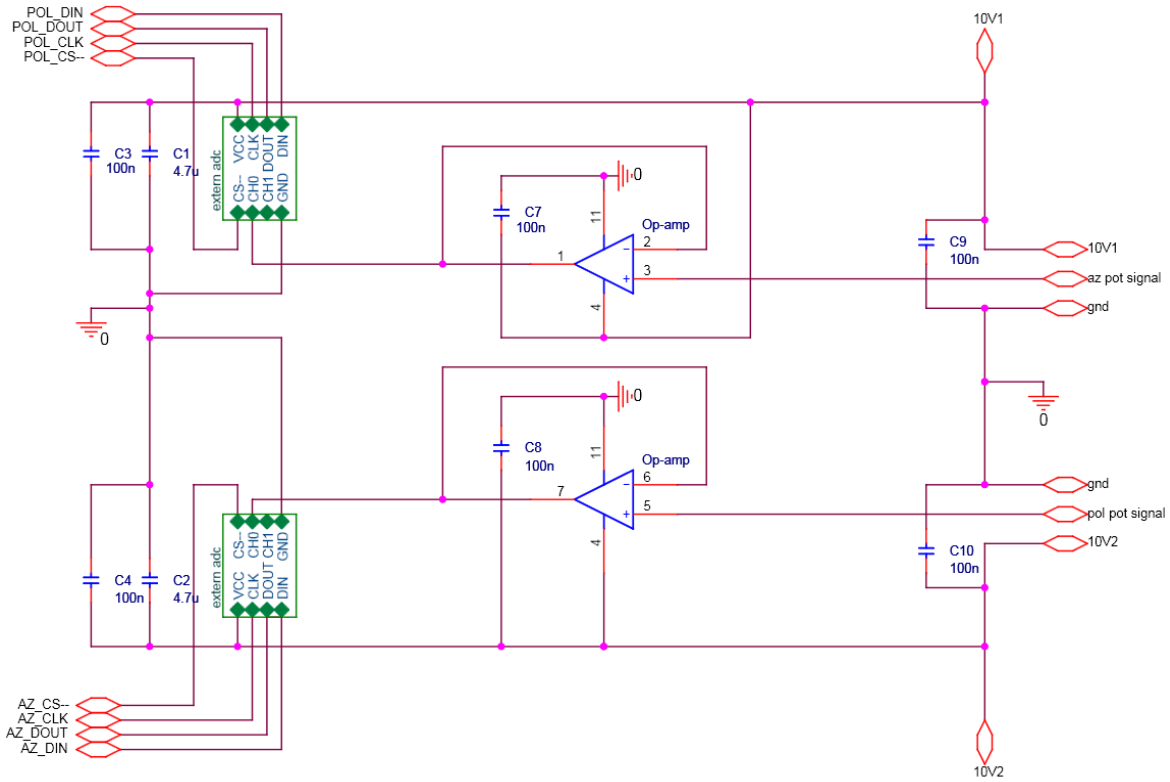


Bild 16 Potentiometersignalernas inkoppling till de externa adc:erna.

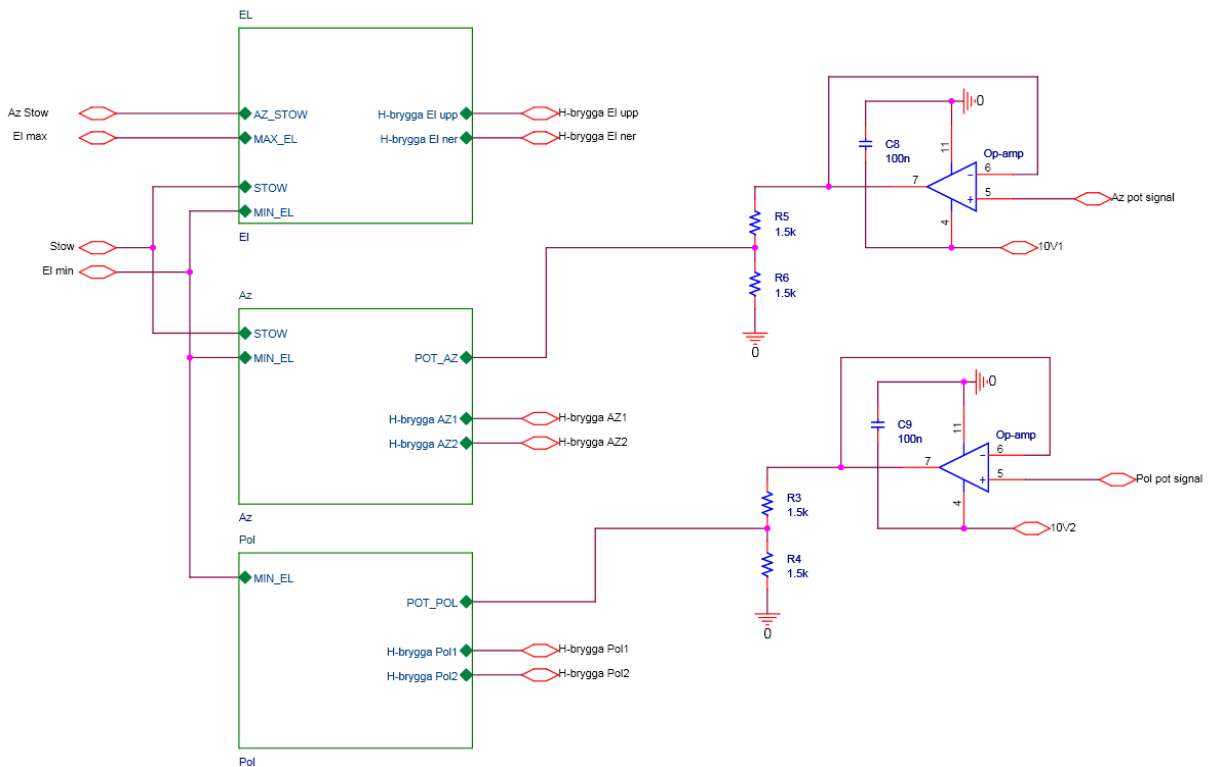


Bild 17 Övergripande schema över logiska nätet.

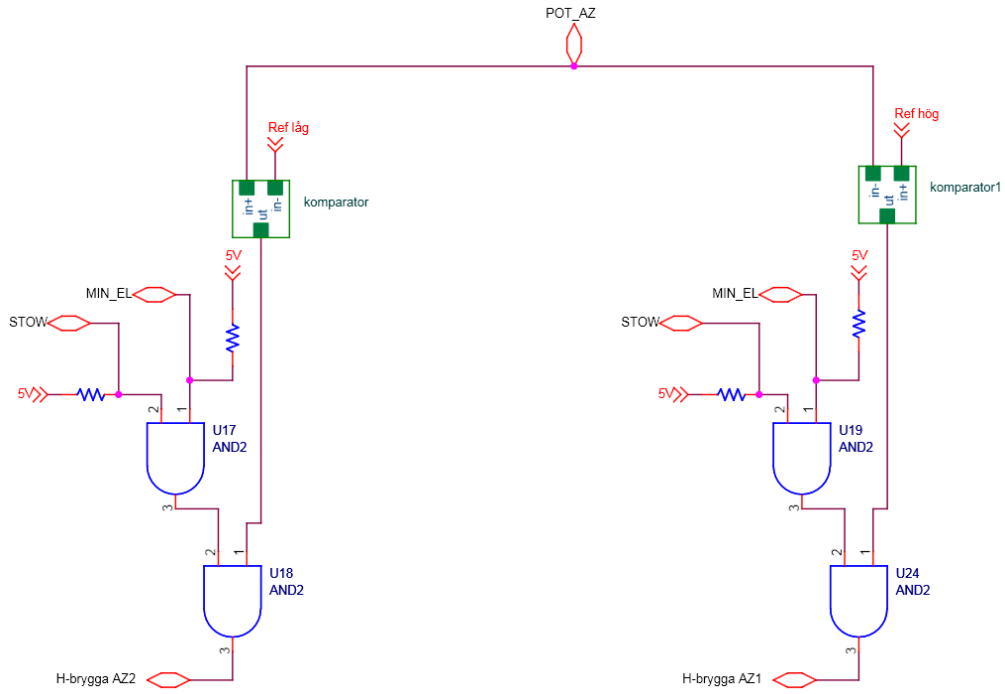


Bild 18 Schema över azimutdelen i det logiska nätet

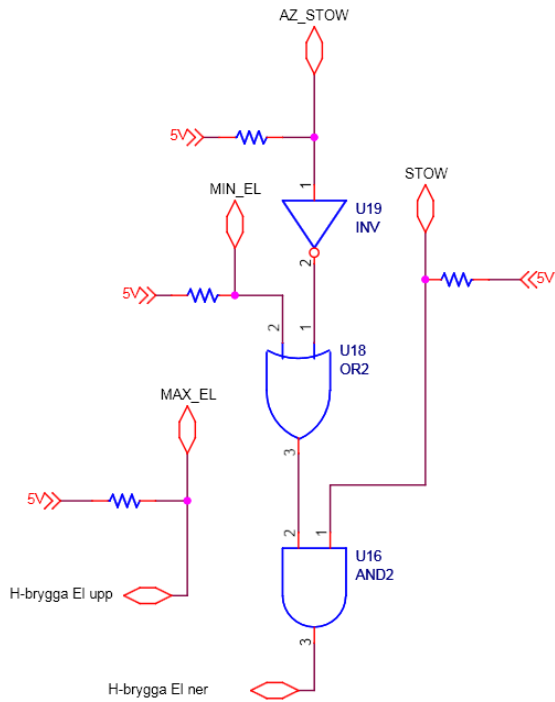


Bild 19 Schema över elevationsdelen i det logiska nätet

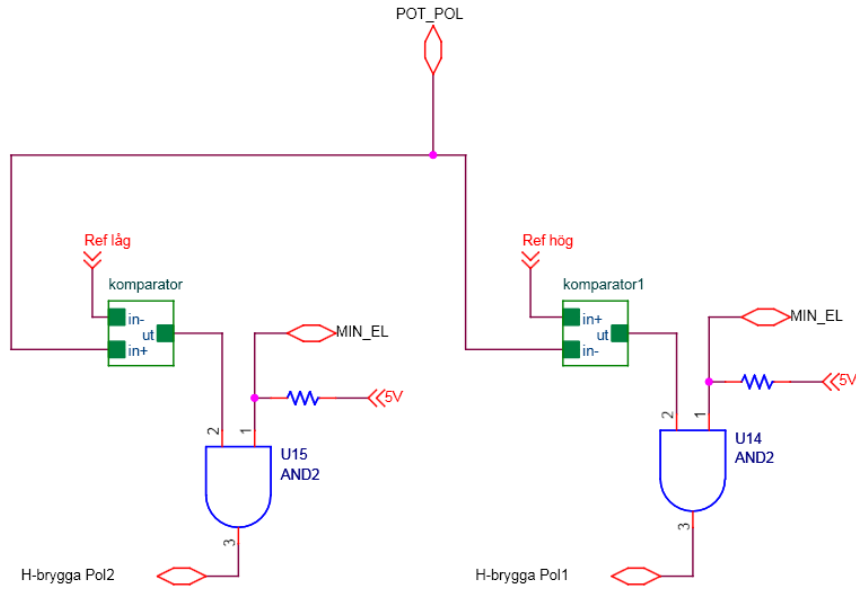


Bild 20 Schema över polarisationsdelen i det logiska nätet

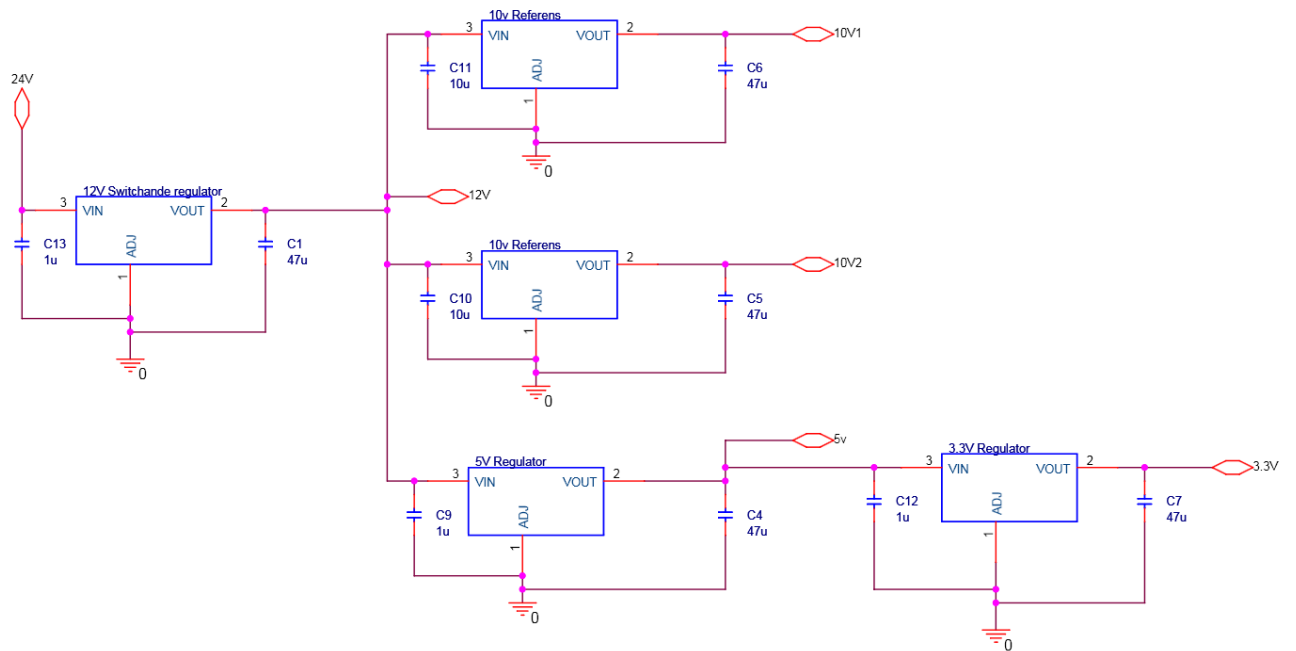


Bild 21 Schema över spänningsreguleringen.

A6 Logiktabell över hårdvaruskyddet

Tabell 9 nedan visar resultatet av hårdvaruskyddets logiska nät. ”x” betyder att motorn inte kan driva åt det hållet. ”Redo att fällas ihop” är ett läge då antennen står i position så att ”minimal elevation”-givarens signal överskrider och antennen får fortsätta neråt.
polarisation

Givare	Motor					
	Elevation upp	Elevation ner	Azimut höger	Azimut vänster	Polarisation höger	Polarisation vänster
Maximal elevation	x					
Minimal elevation		x				
Höger azimut			x			
Vänster azimut				x		
Höger polarisation					x	
Vänster polarisation						x
Ihopfälld		x	x	x	x	x
Redo att fällas ihop			x	x	x	x

Tabell 11 Logiktabell över induktiva givare och motorerna

A7 Mätningar på H-brygga

Följande mätningar har gjorts H-bryggans låga utgång. Matningsspänningen har varit 24V och pulsbredden har varierats. En DC-motor av samma typ som den som ska användas i antennen drevs av H-bryggan och som last bromsades motorn med en rembroms.

Mätningarna är gjorda på H-bryggans låga ingång och det medför att drivningen är på när spänningen i grafen är på den lägsta nivån, se Bild 22. När transistorparet slås av kommer spolen i motorn fortsätta att driva strömmen och därför går spänningen upp till maxvärdet. Efter hand som strömmen avtar sjunker spänningen och motorn börjar istället fungera som en generator. Hur långt det här förloppet hinner gå beror naturligtvis på tiden som H-bryggan är av och därför syns bara delar av förloppet om pulsbredden är låg som i bild 23-24.

I Bild 25 är pulsbredden 100% och därför slås aldrig transistorparet av vilket medför att inga pulser syns.

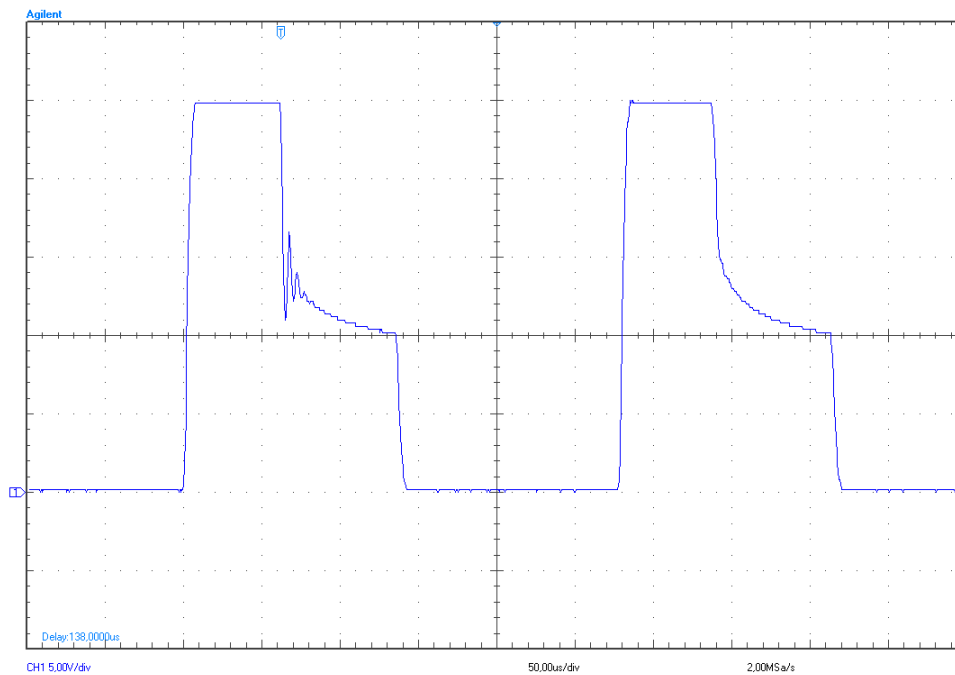


Bild 22 Pulsbredd 50 %

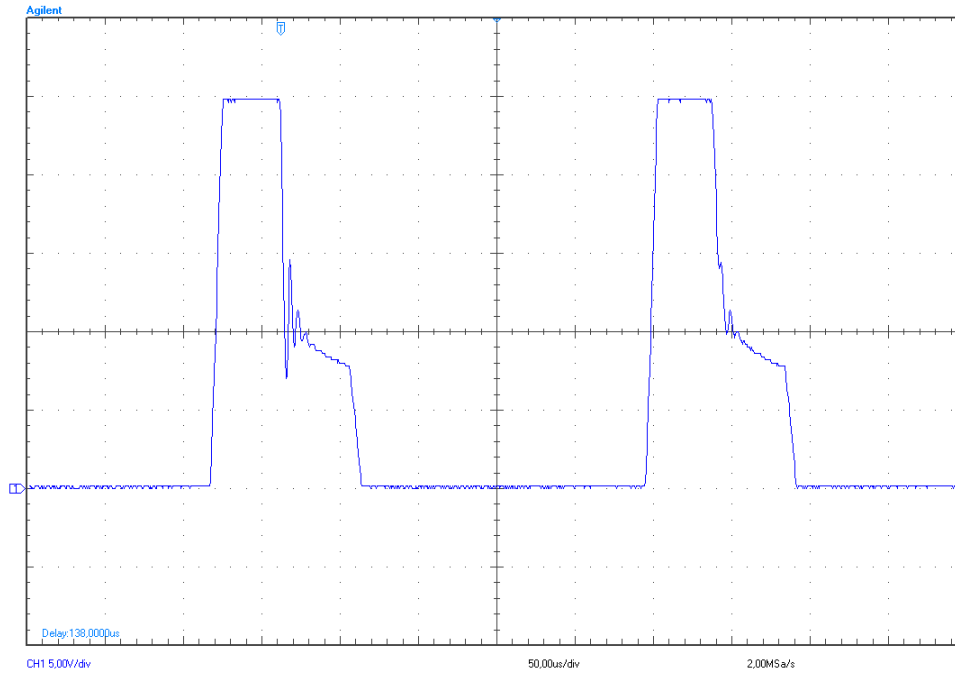


Bild 23 Pulsbredd 66 %

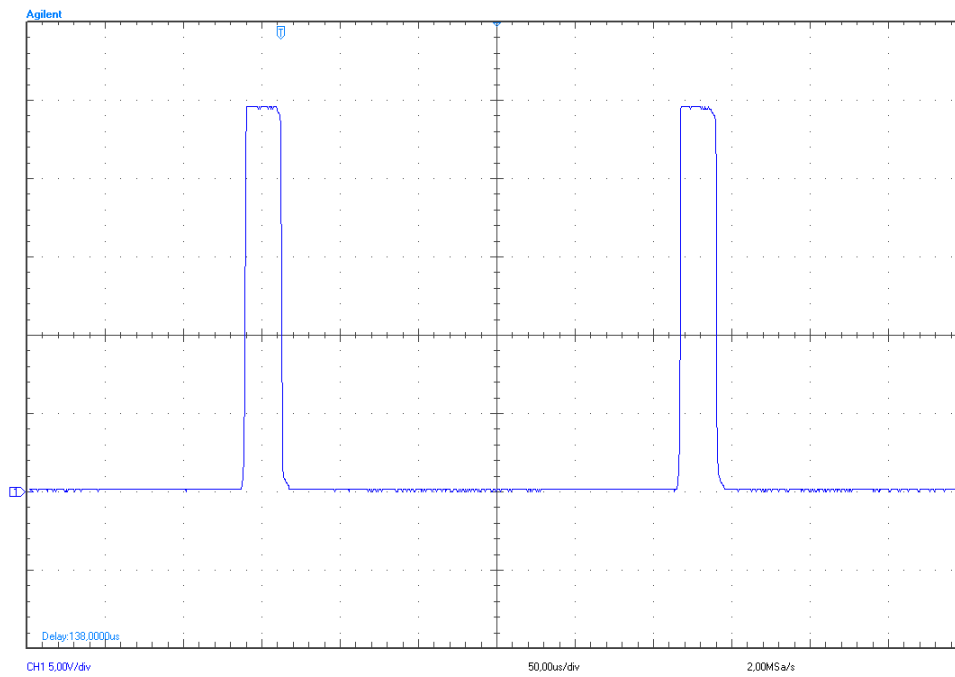


Bild 24 Pulsbredd 90 %

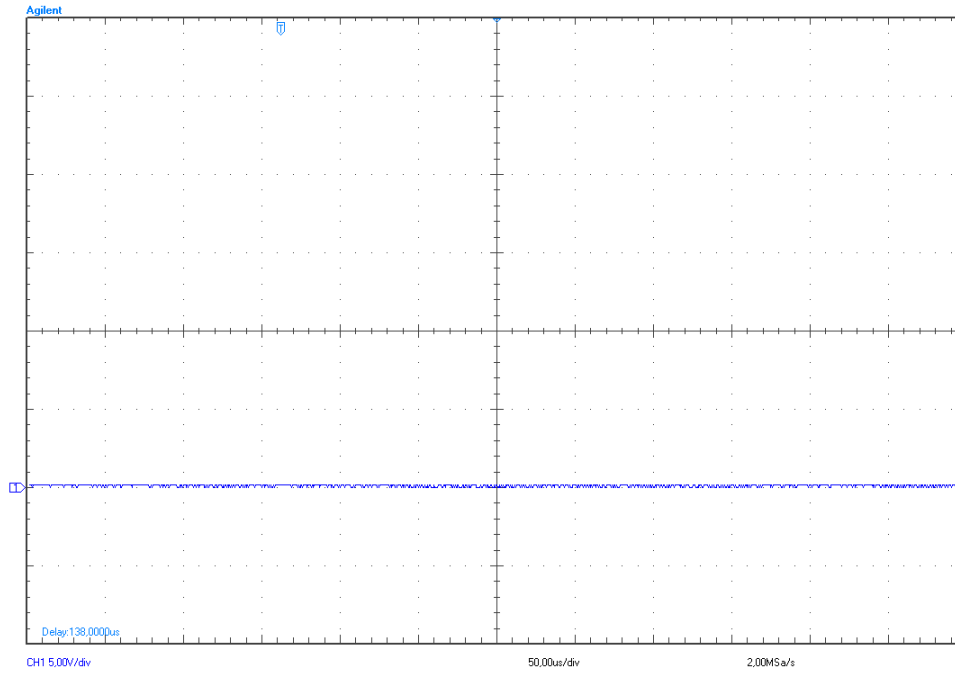


Bild 25 Pulsbredd 100 %