

Prestandautvärdering och analys av tre elnätskommunicerande AMR-system

DANIEL ASPLUND



KTH Electrical Engineering

Master of Science Thesis
Stockholm, Sweden

XR-EE-SB 2006:016

Examensarbete

Prestandautvärdering och analys av tre elnätskommunicerande AMR-system

Performance evaluation and analysis of three
powerline communicating AMR-systems

Daniel Asplund

dasplund@kth.se

Kungl. Tekniska Högskolan

April 2006

Examinator

Mats Bengtsson

mats.bengtsson@s3.kth.se

Handledare

Niklas Jaldén

niklasj@s3.kth.se

Industrihandledare

Krister Wilhelmsson

krister.wilhelmsson@fev.se

Abstract

The Swedish energy market is facing some extensive changes, since a decision from the government says that all owners of power distribution networks have to implement *AMR-systems* (*Automatic Meter Reading*) to collect energy consumption data from their customers. At the power distribution company Falu Elnät AB, three different power line communicating AMR-systems are being used to transmit energy consumption data from individual electricity meters. This thesis project is a case study of Falu Elnät's implementation of these systems named *Turtle*, *Seneca CustCom* and *Avalon X-base* from *Enermet*. The systems are evaluated separately to give a statistical view of their performance and to analyse what causes performance variety in different areas within the individual systems. Power distribution networks show up to be badly suited for communication purposes, and the analysed systems are clearly affected by this. The systems are experiencing big variations in their communication performance. Signal attenuation and noise interfering with the communication frequency bands are the biggest issues for the systems to challenge. These issues can be partly prevented by careful placing of the power line communicating devices, identification and filtering of noise sources and the use of signal amplification in repeater terminals.

Sammanfattning

Svensk energimarknad står inför en stor förändring, då ett riksdagsbeslut innebär att alla nätägare måste kunna avläsa sina kunders elförbrukning med hjälp av fjärravläsande system, s.k. *AMR-system* efter engelskans *Automatic Meter Reading*. Hos nätbolaget Falu Elnät AB har man driftsatt tre olika system som utnyttjar elnätet som kommunikationsmedium för att avläsa enskilda anläggningars mätarställning eller elkonsumtion varje timme. Detta examensarbete omfattar en fallstudie av Falu Elnäts implementation av de tre systemen som benämns *Turtle*, *Seneca CustCom* och *Avalon X-base* från *Enermet*. De tre systemen utvärderas var och ett för sig, för att ge en statistisk bild av deras prestanda och för att analysera vad som orsakar prestandavariationer vid olika områden inom ett och samma system. Det visar sig att elnätet erbjuder ett dåligt anpassat medium för överföring av informationsbärande signaler, och de olika systemen påverkas i olika omfattning av detta. Kvalitén hos elnätskommunikationen uppvisar stora variationer inom de olika systemen. Faktorer som uppvisar störst störande effekt är signaldämpning till följd av elledningarnas impedans- och lastförhållanden, samt brusstörningar i de frekvensband där systemen signalerar. Dessa problem kan i viss mån avhjälpas genom omsorgsfulla val av de elnätskommunicerande terminalernas placering, identifiering och filtrering av brusstörningar samt nyttjande av signalförstärkande repeater-terminaler.

Förord

Detta examensarbete har genomförts vid Kungl Tekniska Högskolan på uppdrag av nätbolaget Falu Elnät AB i Falun. Projektet genomfördes under vintern 2005–2006 av Daniel Asplund. Handledare under projektet var Niklas Jaldén vid Institutionen för Signaler, Sensorer och System, samt Krister Wilhelmsson på Falu Elnät.

Rapporten riktar sig i första hand till uppdragsgivaren, Falu Elnät AB, och syftet är att redogöra för de erhållna resultaten och vägen dit. Även andra svenska nätägare som står inför utbyggnad och driftunderhåll av elnätskommunicerande system för fjärravläsning av elmätare, kan dra lärdom av de erhållna resultaten i detta projekt.

För att inte på något sätt gynna eller missgynna något av de tre olika systemen som jämförs i detta examensarbete, har projektet genomförts helt objektivt, utan att förespråka eller avråda Falu Elnät eller övriga nätbolag något av systemen. Resultaten av de studier och jämförelser som gjorts mellan systemen vilar på vetenskaplig grund.

Jag skulle vilja rikta ett stort tack till all personal på mätar- och driftavdelningen vid Falu Elnät för ett hjälpsamt och vänligt bemötande under mitt projekt. Krister Wilhelmsson, mätningsschef på Falu Elnät, som handlett projektet på från företagets sida, förtjänar ett extra tack för all hjälp.

Dessutom vill jag tacka Sven-Erik Berglund vid SEB Konsult, Gunnar Englund vid GEK Elektronik AB och Anders Hjort vid HM Power AB för all hjälp med mina mätningar i fält, samt Bertil Moritz vid HM Power AB och Björn Sördin vid Senea AB för hjälp med att få en teknisk förståelse för deras system.

Jag vill även rikta ett varmt tack till min handledare vid skolan, Niklas Jaldén, för all hjälp under arbetets gång.

Daniel Asplund

Stockholm
April 2006

Innehållsförteckning

1 Inledning	7
1.1 Bakgrund	7
1.2 Syfte	7
2 Problemdefinition	9
2.1 Elnätskommunikation	9
2.1.1 Elnätet som kommunikationsmedium	9
2.1.1.1 Spänningsnivåer	9
2.1.1.2 Nätuppbyggnad / begrepp	10
2.1.1.2.1 Högspänningsnätet	11
2.1.1.2.2 Mellan- och lågspänningsnätet	11
2.1.1.3 Kraftkablar och ledningar	12
2.1.1.3.1 Kabelmaterial	12
2.1.1.3.2 Kabeltyper	12
2.1.1.3.3 Kabelns uppbyggnad	13
2.1.1.3.4 Kabelns fysikaliska egenskaper	14
2.1.1.4 Impedansvariationer	16
2.1.2 Standarder	17
2.1.2.1 CENELEC	18
2.1.2.2 EN 50 065-1	18
2.1.2.3 EN 50 160	18
2.1.2.4 EMC	19
2.1.3 Störningar i elnätet	19
2.1.3.1 Brus	20
2.1.3.1.1 Färgat bakgrundsbrus	21
2.1.3.1.2 Smalbandigt bakgrundsbrus	21
2.1.3.1.3 Synkront impulsbrus	22
2.1.3.1.4 Asynkront impulsbrus	22
2.1.3.2 Övertoner	23
2.1.3.3 Frekvensomriktare	26
2.1.3.4 Signaldämpning	27
2.1.4 Kanalmodeller	29
2.1.4.1 Förgrenad signalpropagering	30
2.1.5 Modulering	32
2.1.5.1 Amplitudmodulering	33
2.1.5.2 Frekvensmodulering	34
2.1.5.3 Fasmodulering	35
2.1.5.4 Spread Spectrum-modulering	36
2.1.5.4.1 Direct Sequence Spread Spectrum	37
2.1.5.4.2 Frequency Hopping Spread Spectrum	40
2.2 Beskrivning av de olika systemen	42

2.2.1	Generell beskrivning av elnätkommunicerande AMR-system	42
2.2.2	Turtle	44
2.2.2.1	Ultra Narrow Bandwidth-teknologi	44
2.2.2.2	Turtle-transmittern	44
2.2.2.3	Turtle-koncentratoren	46
2.2.2.4	Informationspaket	48
2.2.3	Senea CustCom	49
2.2.3.1	ICSS-teknologi	49
2.2.3.2	Senea-transmittern	50
2.2.3.3	Senea-koncentratoren	51
2.2.3.4	Felhantering	52
2.2.3.5	Repeater	52
2.2.4	Avalon X-Base från Enermet	53
2.2.4.1	Echelonmodemet i Enermet-terminalerna	54
2.2.4.1.1	PLT-22-modem	54
2.2.4.1.2	PLT-30-modem	55
2.2.4.2	Enermet-transmittern	56
2.2.4.3	Enermet-koncentratoren	56
2.2.4.4	Felhantering	58
3	Lösningsmetod	59
3.1	Modell för urval av mätpunkter	59
3.1.1	Prestandautvärdering av Turtle-systemet	59
3.1.2	Prestandautvärdering av Senea-systemet	61
3.1.3	Prestandautvärdering av Enermet-systemet	63
3.2	Mätmetodik	64
3.2.1	Metodik för mätning av signalmiljön hos Turtle-systemet	64
3.2.2	Metodik för mätning av signalmiljön hos Senea-systemet	65
3.2.3	Metodik för mätning av signalmiljön hos Enermet-systemet	65
3.3	Mätutrustning	65
3.3.1	Mätutrustning för mätning i Turtle-systemet	66
3.3.2	Mätutrustning för mätning i Senea- och Enermet-systemen	67
4	Genomförande	68
4.1	Inhämtande av statistiska data	68
4.1.1	Inhämtande av statistiska data hos Turtle	68
4.1.2	Inhämtande av statistiska data hos Senea CustCom	69
4.1.3	Inhämtande av statistiska data hos Avalon X-Base från Enermet	69
4.2	Val av mätpunkter	69
4.2.1	Mätpunkter hos Turtle	70
4.2.2	Mätpunkter hos Senea CustCom	70
4.2.3	Mätpunkter hos Avalon X-Base från Enermet	71
4.3	Mätningar av signalmiljön i de olika systemen	72
4.3.1	Mätningar i Turtle-systemet	72
4.3.2	Mätningar i Senea-systemet	73
4.3.3	Mätningar i Enermet-systemet	73
5	Resultat	74
5.1	Statistisk prestanda hos de olika systemen	74
5.1.1	Statistisk prestanda hos Turtle	74
5.1.2	Statistisk prestanda hos Senea CustCom	78

5.1.3	Statistisk prestanda hos Avalon X-Base från Enermet	81
5.2	Resultat från mätningar av signalmiljön	82
5.2.1	Resultat från mätningar i Turtle-systemet	82
5.2.2	Resultat från mätningar i Senea-systemet	90
5.2.3	Resultat från mätningar i Enermet-systemet	96
5.3	Jämförelser med tidigare arbeten	102
6	Slutsatser	104
6.1	Allmänna slutsatser	104
6.2	Slutsatser kring Turtle	104
6.2.1	Slutsatser kring Turtle-statistik	104
6.2.2	Slutsatser kring mätningar i Turtle-systemet	106
6.3	Slutsatser kring Senea CustCom	108
6.3.1	Slutsatser kring Senea-statistik	108
6.3.2	Slutsatser kring mätningar i Senea-systemet	109
6.4	Slutsatser kring Avalon X-Base från Enermet	111
6.4.1	Slutsatser kring Enermet-statistik	111
6.4.2	Slutsatser kring mätningar i Enermet-systemet	111
7	Referenser	113
	Appendix	117

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Falu Elnät AB äger den största delen av allt elnät inom Falu kommun. Som nätägare ansvarar Falu Elnät för att alla anslutna kunder ska kunna få sin elektricitet levererad, oavsett vilket elbolag kunden väljer som elleverantör. Falu Elnät AB äger och ansvarar alltså för den utrustning som krävs för att distribuera elektrisk energi inom ett geografiskt område i Falu kommun (se *Appendix, fig. A1*).

I och med ett riksdagsbeslut ska alla svenska ägare av elnät från och med 1 juli 2009 kunna avläsa elkonsumtionen 12 gånger per år hos sina kunder med säkring upp till 63 A, medan större kunder ska ha timvisregistrering av elkonsumtionen. Med detta kan nätägare och elleverantörer sluta med sin preliminärdebitering för elförbrukningen och kan istället ta betalt för den faktiska förbrukningen varje månad.

De tekniska system som används för fjärravläsning går under samlingsbegreppet *AMR-system*, efter engelskans *Automatic Meter Reading*. Dagens AMR-system erbjuder ett antal olika tillvägagångssätt för nätbolagen att samla in elförbrukningsdata från sina kunder. Falu Elnät har valt att prova olika elnätskommunicerande system, som utnyttjar elnätet som överföringsmedium för informationsbärande signaler i olika frekvensband. Det system som Falu Elnät valt att installera hos sina hushållskunder på landsbygden i Falu kommun heter *Turtle*, och omfattar vid slutförandet av detta examensarbete drygt 10000 mätpunkter. Detta system signalerar med väldigt smalbandiga signaler innehållande mätarställningsdata i ett frekvensband kring 100 Hz. Dessutom använder Falu Elnät två olika system som signalerar i CENELEC's A-band (9–95 kHz). Dessa system heter *Senea CustCom* och *Avalon X-Base* från *Enermet* och de kan tack vare sina högre överföringshastigheter användas för insamling av storkunders timvärda elkonsumtion. Vid slutförandet av detta examensarbete omfattades Falu Elnäts implementation dessa system av ca 1100 respektive 200 mätpunkter. Gemensamt för de tre olika systemen är alltså att de är elnätskommunicerande och utnyttjar bärfrekvenser i elnätet för att överföra mätarställningsdata från elkonsumenter till så kallade koncentratorer i Falu Elnäts fördelningsstationer.

1.2 Syfte

De tre AMR-systemen som utvärderas i detta examensarbete har, trots att de inte är fullt utbyggda ännu, varit installerade vid ett antal mätpunkter hos Falu Elnät i några år. Under de inledande testerna av *Turtle*-, *Senea*- och *Enermet*-systemen har man från Falu Elnäts sida stött på vissa problem med elnätskommunikationen i olika områden av elnätet.

Turtle-systemet tycks i det stora hela fungera stabilt, men inom vissa områden uppvisar systemet märkbart sämre prestanda än i andra. Falu Elnät är intresserade av att identifiera orsaken till dessa prestandaskillnader, och man misstänker brusstörningar i de punkter där systemet fungerar dåligt.

Erfarenheterna av Falu Elnäts implementation av Senea-systemet är ganska dåliga. Systemet, som uteslutande används inom ett bostadsområde i centrala Falun, uppvisar en förhållandevis dålig prestanda och förefaller känsligt för brusstörningar.

Enermet-systemets terminaler används vid elabonnenter med stora mätarsäkringar, i och i utkanten av Falun. Systemet uppvisar bra prestanda vid de anläggningar man en gång lyckats installera dess terminaler, men vid ett antal punkter i nätet har störningar på elnätet förhindrat Falu Elnät från att lyckas driftsätta systemet.

Falu Elnät är nu intresserade av en jämförande analys mellan de olika elnätskommunicerande AMR-systemen man hittills valt att satsa på. Man vill se fördelar och nackdelar med respektive system, samt möjliga orsaker och eventuella lösningar på de problem som systemen uppvisar idag. Falu Elnät önskar få en bredare förståelse för elnätskommunikation, med tyngdpunkt på det egna elnätets egenskaper för informationsöverföring.

Detta examensarbete kommer således att omfatta en fallstudie av Falu Elnäts implementation av de tre elnätskommunicerande AMR-systemen Turtle, Senea CustCom och Avalon X-Base från Enermet. Tekniska egenskaper hos varje system kommer att analyseras, varpå dess upplevda prestanda kommer granskas i en statistisk analys. Denna statistik kommer att utgöra underlag för val av punkter i elnätet där fysiska mätningar av signalmiljön kan göras, och dessa mätningar kommer förhoppningsvis att resultera i slutsatser kring faktorer som påverkar systemens prestanda negativt.

2 Problemdefinition

2.1 Elnätskommunikation

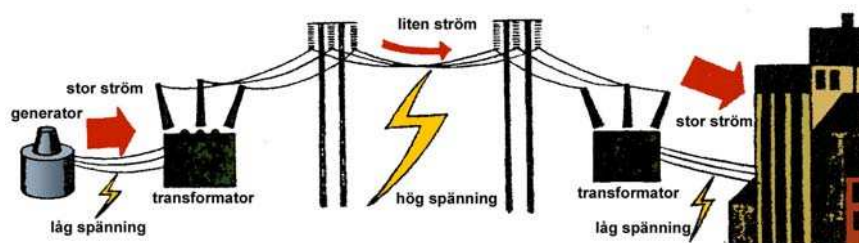
Detta avsnitt syftar till att ge en generell förståelse för möjligheterna att överföra information via elnätet. De tekniker och principer som är relevanta för detta examensarbete kommer att beskrivas mer ingående, och tillbakablickar till detta avsnitt kan vara lämpliga när man läser senare avsnitt.

2.1.1 Elnätet som kommunikationsmedium

I detta avsnitt beskrivs elnätets uppbyggnad och egenskaper. Relevanta begrepp förklaras och teoretiska egenskaper för elnätet som kommunikationsmedium härleds.

2.1.1.1 Spänningsnivåer

Ett typiskt nät för distribution av elektrisk energi är indelat i delar med olika spänningsnivåer. I Sverige delar vi in dessa spänningar i tre olika nivåer: *högspänning (HSP)* som ligger i intervallet 110–380 kV, *mellanspänning (MSP)* i intervallet 10–30 kV och *lågspänning (LSP)* som är 0,4 kV. De olika spänningsnivåerna används för att transportera den elektriska energin över olika distanser. Högspänningsledningar används för att överföra elektriciteten över långa sträckor eftersom, i enlighet med Ohms lag (se ekvation 2.19), hög spänning medför lägre ström och reducerade effektförluster. Lågspänningsnätet utgörs av de ledningar som elkonsumenterna är anslutna till [11]. Figur 2-1 nedan illustrerar detta.



Figur 2-1. Eldistributionens spännings- och strömnivåer [11].

Inom den svenska energibranschen skiljer man vanligtvis bara mellan lågspänning vid 400 V och högspänning från 10 kV och uppåt. Men i detta examensarbete kommer det att visa sig nödvändigt att indela nätspänningarna i tre intervall, dvs. att även räkna med en mellanspänningsnivå.

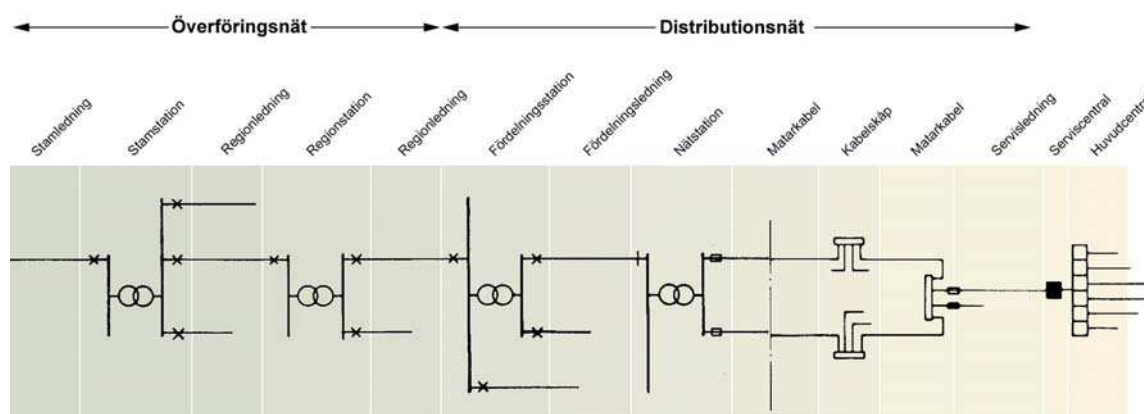
Hög-, mellan- och lågspänningsnäten är åtskilda genom *transformatorer*, som konverterar ner spänningen till den ände som är utgående mot elkonsumenter, dvs. i effektriktningen. Transformatorerna är designade för att ge så låga effektförluster som möjligt vid *nätfrekvensen* (50 Hz). Ingen hänsyn är emellertid tagen till strömmar med högre frekvenser såsom bärfrekvenser hos elnätssammanbindningssystem, vilket gör att en transformator utgör ett närmast ogenomträngligt hinder för högfrekventa bärfrekvensvågor. Detta leder till att olika lågspänningsnät kan vara helt separerade och tillämpa elnätssammanbindning i samma frekvensband utan att interferera med varandra, då de högfrekventa informationsbärande signalerna inte kan tränga upp i nathierarkin och ut i mellanspännings- och högspänningsnäten [7][11].

2.1.1.2 Nätuppbyggnad / begrepp

Detta avsnitt syftar framförallt till att i kortfattad textform beskriva de svenska elnätens uppbyggnad och förklara de viktigaste begreppen inom distributionshierarkin, för att ge konsekvens hos terminologin i senare avsnitt. Figur 2-2 nedan illustrerar nättopologin och olika begrepp som är relevanta för detta examensarbete.

Ryggraden i det svenska elnätet är det så kallade *stamlinjenätet* som är uppbyggt av sammanlagt drygt 1500 mil 400- och 220 kV-ledningar från norr till söder. Dess enda uppgift är att sammanbinda kraftverken och kraftblocken i landet, samt stå för råkrafttransporten. Från *stamstationer* längs stamlinjenätet fördelas kraften inom olika regioner till så kallade *regionstationer*. Stamlinjenätet och regionnäten samlas under begreppet *överföringsnät* och utgörs av luftburna högspänningsledningar.

Kraften från regionnäten fördelas till mindre lokala områden vid *fördelningsstationer*, som normalt transformerar ner spänningen till 10 kV. Det lokala mellanspänningsnätet kallas *distributionsnät* och har till uppgift att fördela den elektriska energin till lägsta totalkostnad. Nedtransformeringen från fördelningsnätet på mellanspänningsnivå, till den nominella lågspänningen 0,4 kV, äger rum i *nätstationer*. Lågspänningsnätet har till uppgift att distribuera elkraft till elkonsumenter, och utgörs av *matarkablar* som förbinder nätstationen med ett *kabelskåp*. Elkunden är ansluten till lågspänningsnätet med en så kallad *servisledning*, som utgår från kabelskåpet [11].



Figur 2-2. Elnätets nätdelar och stationer [11].

2.1.1.2.1 Högspänningsnätet

Högspänningsnätets funktion är att transportera elektrisk energi över långa avstånd, från kraftstationen till elkonsumenten. Majoriteten av högspänningsnätet utgörs av trefasiga luftburna ledningar. För att uppnå så god symmetri mellan faserna som möjligt så är det viktigt att:

- använda samma spänning i de olika faserna men med 120° fasskillnad
- montera ledningarna symmetriskt och med samma avstånd till jord
- korskoppla faserna med regelbundna intervall för att undvika obalans genom induktion mellan faserna
- använda samma material i alla tre ledningarna.

Genom att anta att det föreligger symmetri mellan de tre faserna, kan man använda ett enfassystem som modell vid beräkningar av trefassystemet.

Högspänningsnätet är framförallt designat för optimal energiöverföring, dvs. för att minimera energiförlusterna. Dessa energiförluster utgörs framförallt av den värme som bildas p.g.a. resistans hos materialet i elledningen. Eftersom en högre ström medför större värmeutveckling i elledningen, är det önskvärt att överföra den elektriska energin med så låg ström som möjligt. I gengäld måste nätspänningen öka, vilket följer av Ohms lag (se ekvation 2.19). Detta motiverar alltså varför elektrisk energi överförs med hög spänning över stora avstånd. För förflyttning av elektrisk energi har högspänningsnätet dessutom fördelar gentemot mellanspänningsledningar när det gäller markintrång. Med hjälp av 400 kV-ledningar minimerar vi behovet av skogsskövling för ledningsgator, då dess överföringskapacitet motsvarar 7 st 130 kV-ledningar eller drygt 200 st 10 kV-ledningar [11].

De stora spänningarna och effekterna i högspänningsnätet kräver ledningar med grov tvärsnittsarea och de blir därmed väldigt tunga. För att undvika risken för elektriska urladdningar till intilliggande föremål krävs dessutom att ledningarna monteras högt upp i luften, vilket medför att ledningarna är mer exponerade för vind och nederbörd. Dessa förhållanden ställer stora krav på utrustningen som bär högspänningsledningarna.

Längs högspänningsledningarna finns större transformatorstationer, så kallade stamstationer och fördelningsstationer, som distribuerar den elektriska energin vidare till det regionala mellanspänningsnätet. Dessa *ställverk* är viktiga knutpunkter i elnätet, och har förutom själva transformatorutrustningen även utrustning för att bryta och frångilja strömmen i olika nätdelar [11].

2.1.1.2.2 Mellan- och lågspänningsnätet

Mellanspänningsnätet utgörs av såväl luftledningar som nedgrävda kablar, där luftledningar framförallt används i glesbebyggda områden och kabel används i stadsmiljöer. Den nominella spänningen hos mellanspänningsnätet ligger vanligtvis i intervallet 10–20 kV, och till skillnad från högspänningsledningarna så täcker mellanspänningsnätet betydligt mindre avstånd. Generellt kan man säga att luftledningar i mellanspänningsnätet är mellan 5–25 km långa, men i glesbebyggda områden kan avstånden vara ännu längre [13].

Mellanspänningsnätet slutar vid mindre transformatorstationer, så kallade nätstationer, som transformerar ner spänningen till lågspänningsnivå. Lågspänningsnätet utgörs av de ledningar som elkonsumenterna är anslutna till och de är vanligtvis nedgrävda, förutom i glesbebyggda områden där luftledningar är mer fördelaktigt rent praktiskt och ekonomiskt. En elkund är oftast ansluten till alla tre faser, med 400 V nominell spänning mellan faserna och 230 V mellan en fas och den spänningslösa nollan.

2.1.1.3 Kraftkablar och ledningar

Elnätet är uppbyggt av kablar och ledningar vars uppgift är att med så lågt motstånd som möjligt förflytta elektrisk energi från en punkt till en annan. Designen av dessa elektriska ledare är viktig att känna till vid analys av ett elnäts signalöverförande egenskaper. Man måste ta hänsyn till såväl ledningarnas mekaniska som elektriska parametrar. Naturligtvis är skillnaderna stora mellan ledningar avsedda för högspänning och ledare för lågspänningsnätet, samt mellan luftledningar och kablar som grävs ner under jord. Eftersom elnätskommunikationen i detta examensarbete inte berör högspänningsnätet, kommer detta avsnitt fokusera på att bara beskriva kablar och ledningar i låg- och mellanspänningsnätet [13].

2.1.1.3.1 Kabelmaterial

För att leda elektricitet med så lågt motstånd som möjligt används ledarmaterial av metall. De vanligaste metallerna för detta ändamål är ren koppar, förtent koppar eller ren aluminium. Kopparledare har mycket god ledningsförmåga, men blir på grund av sin höga densitet väldigt tunga och på grund av sitt pris för kostsamma. Aluminium har däremot endast en tredjedel av den densitet koppar besitter, men också knappt två tredjedelar av koppars ledningsförmåga. Aluminiumledarna ses trots sin sämre ledningsförmåga som ett kostnadseffektivt och bra alternativ och används i störst utsträckning. Vid förtening av kopparledare blir materialet mer motståndskraftigt mot oxidering och korrosion.

Som isoler- och mantelmateriell används olika plaster. Dessa plaster kan delas in i två typer, termoplaster och hårdplaster. Någon närmare beskrivning av plasttyperna är i detta arbete mindre relevant, men man kan säga att plasternas egenskaper är olika beroende på vilka krav som ställs och kabelns användningsområde [13].

2.1.1.3.2 Kabeltyper

Majoriteten av elnäten består av oisolerad luftledning. Ledarmaterialet i dessa ledningar är vanligtvis koppar eller aluminium. Aluminiumledarna kan även omsluta en stålkärna, som ökar ledningens bärkraft. En luftledning består vanligtvis av tre ledare, där varje ledare motsvarar en fas. En stor nackdel med den oisolerade luftledningen är det markintrång som krävs längs elledningen för att göra den träsäker. Träd och kvistar som faller ner över ledningen kan orsaka kortslutning eller jordslutning, vilket medför strömavbrott.

I mellanspänningsnäten används även isolerad luftledning, med den viktiga skillnaden gentemot den oisolerade varianten som beskrevs ovan, att aluminiumledarna är besprutade med ett isolerande skikt av t.ex. PEX-plast. Denna ledningstyp kallas BLX eller BLL.

Fördelarna hos den isolerade luftledningen gentemot blanktråden är framförallt att nedfallande träd och kvistar normalt inte orsakar kortslutnings- eller jordslutningsavbrott.

En tredje typ av luftledningar är luftburen kabel, s.k. hängkabel. Hängkabeln som är isolerad används framförallt i mellanspänningsnätet och vanliga beteckningar för kabeltyper som används i luftledningar är AXCEH, EXCEL och AXCES. Dessa kablar har tre enledare med skärm, och AXCEH-kabeln är även utrustad med en bärlina utav stål.

Den vanligaste typen av kabel är jordkabel, som används i såväl mellan- som lågspänningsnäten. För mellanspänning är kabelmodellerna AXCEL och AXCE de som används i störst utsträckning. Skillnaden mellan dessa kabeltyper är att hos AXCEL ligger alla tre fasledare samt skärm samlade i samma kabel, medan AXCE-kabeln bara har en fasledare samt skärm per kabel, s.k. enledare.

Den sista sträckan i lågspänningsnätet mellan en nätstation och elkund benämns ofta serviskabel eller servisledning. För det mesta används jordkabel för detta ändamål. En viktig skillnad mellan serviskablarna och mellanspänningskabel, är att serviskabeln har fyra ledare. Varje transformatorstation har en egen nollpunktsreferens, varför en noll-ledare inte behöver finnas med i hög- och mellanspänningsnäten. I lågspänningsnätet där elkunderna är anslutna måste däremot denna nollpunktsreferens hos transformatorstationen ligga med i en egen ledare ut till kunden, varför sammanlagt fyra ledare går till elkunden. Några vanligt förekommande kabeltyper för lågspänning är N1XV, N1XE, AKKJ och FKKJ. Värt att nämna i detta sammanhang är att äldre serviskabel som fortfarande är i bruk kan vara av 3-ledartyp, med en separat jordlina som PEN-ledare.

Hos Falu Elnät pågår en ständig förbättring av det befintliga elnätet för att reducera risken för driftstörningar. Allt fler linjer görs trädsäkra genom att använda isolerade luftledningar eller jordkabel, istället för oisolerade luftledningar. Falu Elnäts nät, med några tätbebyggda områden och stora landsbygdsområden, bör nog inte ses som en generell modell för hur svenska elnät är uppbyggda men kan utgöra ett exempel på hur ett svenskt elnät kan se ut. Tabell 2-1 nedan visar hur Falu Elnäts nät är uppbyggt utav olika ledningstyper [13].

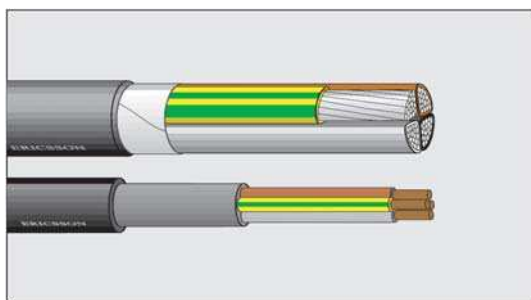
Mellan-/högspänningsnät (10/20/50 kV)		Lågspänningsnät (0,4 kV)	
Oisolerad friledning	406 km	Oisolerad friledning	10 km
Isolerad friledning	128 km	Isolerad friledning	456 km
Högspänningskabel	559 km	Lågspänningskabel	1738 km
Kabel upphängd i stolpar	25 km		
Summa mellan-/högspänningsnät	1145 km	Summa lågspänningsnät	2204 km

Tabell 2-1. Fördelning av ledningstyper hos Falu Elnät per mars 2006.

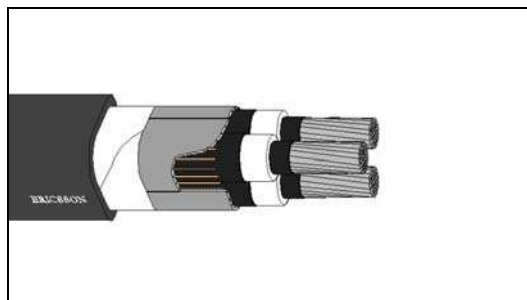
2.1.1.3.3 Kabelns uppbyggnad

En typisk kabel för svenskt bruk i lågspänningsnätet är av 4-ledartyp. Figur 2-3 nedan visar den vanligt förekommande N1XV-kablen i genomskärning. Kabeln finns i två utföranden, beroende på tvärsnittsarean hos ledarna. Vid större tvärsnittsarea är kabeln uppbyggd av fyra sektorformade aluminiumledare, och då ledarna har mindre tvärsnittsarea än 50 mm² används istället vanligtvis rund koppartråd. Varje ledare är isolerad med ett lager av PEX-plast.

Utanpå detta används ett utfyllnadsskikt med plastmaterial, och kring det ligger den svarta manteln av PVC-plast som håller ihop kabeln och fungerar som ytterligare isolering [13].



Figur 2-3. NIXV-kabel i genomskärning [32].

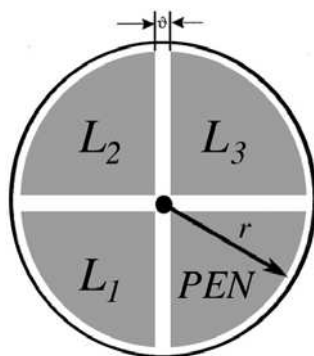


Figur 2-4. AXCEL-kabel i genomskärning [32].

För att redogöra för hur en klassisk mellanspänningskabel är uppbyggd, kan den vanligt förekommande AXCEL-kabeln vara lämplig att utgå ifrån. Figur 2-4 ovan visar just denna kabeltyp i genomskärning. Till skillnad från lågspänningskabeln ovan har denna kabel bara tre ledare, som inte är sektorformade utan har runda tvärsnitt. Ledarna består av aluminium och är isolerade med ett PEX-skikt, som är vitt i figur 2-4. Innanför och utanpå PEX-skiktet ligger två ledande skikt som utjämnar ytan mellan ledare och isolering respektive isolering och skärm. Skärmen, vars uppgift är att skydda ledarna mot yttre elektriska störningar samt att fungera som personskydd, består av koppartråd och omsluter det yttre ledande skiktet. Kring skärmen ligger ett band och ytterst ligger den svarta manteln som hos AXCEL-kabeln utgörs av LLD-PE-plast [13].

2.1.1.3.4 Kabelns fysikaliska egenskaper

Eftersom elnätkommunikationen som berörs i detta examensarbete i huvudsak sker i lågspänningsnätet, kommer detta avsnitt att fokusera på de fysikaliska egenskaperna i de vanligaste serviskablarna för lågspänning.



Figur 2-5. Tvärsnitt av en typisk 4-ledarkabel [11].

Figur 2-5 visar en schematisk tvärsnittsbild av en typisk serviskabel av 4-ledartyp. L_1 , L_2 och L_3 leder de tre faserna och PEN står för *Protective Earth Neutral* och fungerar som både skydds- och nolledare till kundanläggning. Avståndet mellan två intilliggande ledare är ϑ ,

vilket är litet i förhållande till radien r . Under förutsättning att avståndet g är mycket mindre än radien r , gäller utan att här i detalj härleda denna slutsats, att kapacitansen per längdenhet C' ges enligt:

$$C' = 2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{r}{g} \quad (2.1)$$

där ε_0 och ε_r är den dielektriska respektive relativa dielektriska konstanten. 4-ledarens induktans per längdenhet L' ges enligt:

$$L' = \mu_0 \cdot \frac{g}{2r} \quad (2.2)$$

där μ_0 är permabilitetskonstanten för vakuum. Resistansen per längdenhet R' hos en ledare ges enligt:

$$R' = \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu_0}{\kappa}} \cdot \frac{1}{r} \quad (2.3)$$

där f är nätfrekvensen och κ är ledarens specifika konduktivitet. Läckkonduktansen per längdenhet G' kan beräknas med hjälp av en dielektrisk förlustfaktor $\tan \delta$ och kapacitansen per längdenhet C' enligt:

$$G' = 2\pi f C' \cdot \tan \delta. \quad (2.4)$$

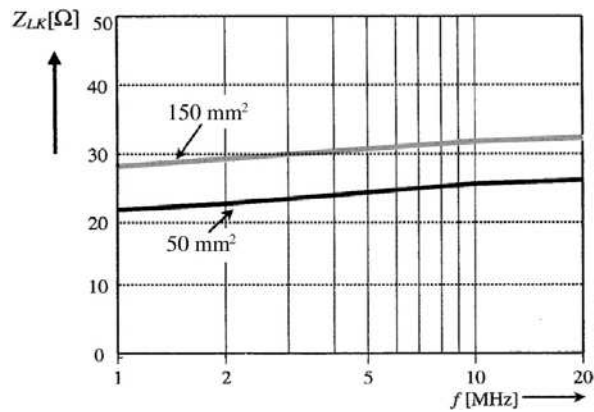
Den karaktäristiska impedansen Z_{LK} hos 4-ledarkabeln ges nu enligt:

$$Z_{LK} = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (2.5)$$

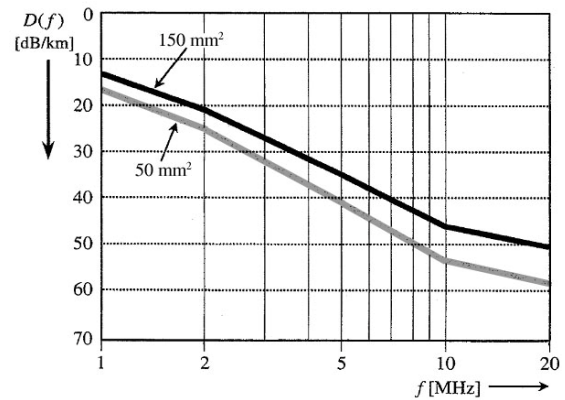
och är som synes komplexvärd. En god realvärd approximation av den karaktäristiska impedansen ges av:

$$Z_{LK} \approx \sqrt{\frac{L'}{C'}}. \quad (2.6)$$

I figur 2-6 nedan ser vi ett exempel på den karaktäristiska impedansens frekvensberoende i två vanliga 4-ledarkablar med 50 respektive 150 mm² tvärsnittsarea.



Figur 2-6. Karaktäristisk impedans vid olika frekvenser hos 4-ledarkabel med 50 resp. 150 mm² tvärsnittsarea [7].



Figur 2-7. Dämpning vid olika frekvenser hos 4-ledarkabel med 50 resp. 150 mm² tvärsnittsarea [7].

En annan viktig faktor när man talar om överföring av signaler med olika frekvens i elnätet är den så kallade *propageringskonstanten* γ , som ges enligt:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C')} . \quad (2.7)$$

Faktorerna α och β i ovanstående ekvation benämns *försvagningskonstant* respektive *faskonstant* och kan approximeras enligt:

$$\alpha(f) \approx \frac{R'}{2 \cdot Z_L} + \frac{G' \cdot Z_L}{2}, \quad \beta \approx \omega \sqrt{L' C'} \quad (2.8)$$

där Z_L motsvarar *lastimpedansen* i nätet. Dessa parametrar utgör grunden för beräkning av signaldämpningen i elledningar, vilket behandlas i avsnitt 2.1.3.4 nedan. Figur 2-7 ovan illustrerar även detta, där vi ser att dämpningen av signaleffekt i olika 4-ledare ökar med signalfrekvensen [7][11][13].

2.1.1.4 Impedansvariationer

Överlagrade informationsbärande frekvenser i elnätet behöver ett visst motstånd för att kunna propagera genom elledningarna utan att dö ut. Elnätet erbjuder väldigt låga motstånd, det är lågimpedivt. Generellt kan man säga att ju lägre impedans nätet har, desto högre effekt måste informationen sändas med. Kring nätfrekvensen avgörs impedansen i elnätet framförallt av den momentana lasten, dvs. det effektuttag som ansluten eldriven utrustning kräver. Det innebär att impedansen i nätet inte är konstant utan varierar kraftigt med tiden.

Impedansen i elnätet varierar olika mycket beroende på spänningsnivå, där stora impedansvariationer förekommer i lågspänningsnätet medan mindre impedansvariationer förekommer i högspänningsnätet [7]. Impedansens lastberoende gör att vi utifrån förhållandet mellan topplast och minimilast i de olika spänningsnivåerna, kan skaffa oss en uppfattning om impedansförhållandena i de olika näten. Med andra ord så kan ett lastförhållande ses som ett mått på impedansförhållandet. Följande tabell 2-2 åskådliggör dessa förhållanden.

	Lågspänningsnät	Mellanspänningsnät	Högspänningsnät
Topplast : minimilast	7:1 – 19:1	3:1 – 8:1	2:1 – 3:1

Tabell 2-2. Topp-/minimilastförhållande i olika spänningsnivåer [7].

Ser man till dessa egenskaper hos elnätets olika spänningsnivåer så kan vi konstatera att möjligheten att förutsäga elnätets impedans och därmed egenskaper när det gäller signalöverföring, är betydligt mindre hos lågspänningsnätet än i mellan- och högspänningsnätet. Med andra ord är elnätskommunikation i detta avseende svårare att tillämpa i denna yttersta del av elnätshierarkin, då den momentana impedansen i lågspänningsnätet kan variera med nästan 2000 % över tiden.

Även hos olika elektronisk utrustning som är ansluten till lågspänningsnätet varierar impedansen med frekvensen. I tabell 2-3 nedan kan vi se exempel hur impedansen hos olika hushållsmaskiner varierar med frekvensen.

Maskin	Effekt [W]	Impedans vid olika frekvens (kΩ)				
		Frekvens (kHz)				
		50 Hz	50	100	150	200
Kaffebryggare	1200	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Diskmaskin	1200	4,75	0,02	0,01	0,006	0,004
Mixer	127	8,25	23,5	10,4	6,43	4,91
Ugn	2500	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Strykjärn	1200	0,85	0,35	0,40	0,46	0,52
Brödrost	1150	3,50	0,03	0,02	0,01	0,007
Tvättmaskin	512	5,25	32,5	27,2	21,5	17,4
Luftväxlare	860	45,0	11,2	9,75	6,35	4,45
Fläkt	88	11,9	27,2	18,9	12,6	8,50
Hårtork	600	4,72	47,1	39,2	24,20	12,70
Rakapparat	15	30,0	11,0	8,50	7,25	6,75
Radio	70	21,2	23,3	6,66	4,28	3,15
TV	240	0,05	0,06	0,02	0,01	0,006
Bandspelare	145	2,53	21,4	4,7	3,13	2,50
Antennförstärkare	4	100	21,4	13,3	4,70	5,09
Damsugare	600	47,0	8,72	3,13	2,01	1,36
Glödlampa	75	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
Dator (PC)	500	6,00	0,27	0,30	0,315	0,33

Tabell 2-3. Effekt och impedans hos olika hushållsmaskiner vid olika frekvenser [4].

2.1.2 Standarder

För att säkerställa kompatibilitet mellan komponenter i elnätet och för att eldistributionen ska hålla en viss kvalitet, finns en mängd standarder och normer som tillverkare av elektrisk apparatur har att följa. Nedan följer en kort beskrivning av de standarder och normer som är relevanta för detta examensarbete.

2.1.2.1 CENELEC

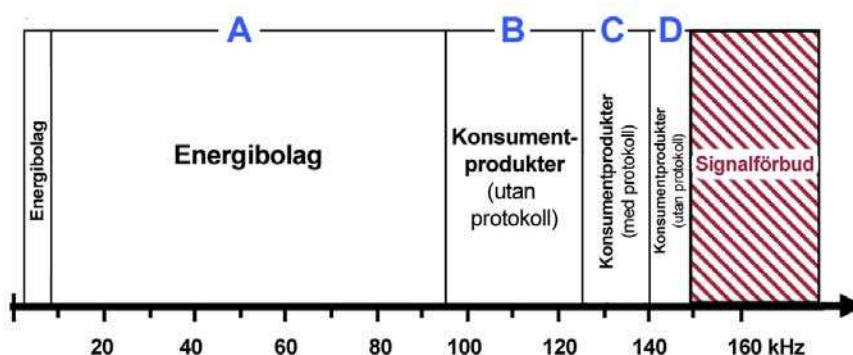
CENELEC är en standardiseringskommitté för elektriska standarder inom EU. Några av dessa standarder som kan anses relevanta för detta examensarbete är EN 50 065-1 som behandlar allokering av frekvensband för signalering i elnätet samt EN 50 160 som beskriver de egenskaper som en ansluten elkund kan förvänta sig hos matningsspänningen [15]. Båda dessa standarder beskrivs kortfattat i följande avsnitt.

2.1.2.2 EN 50 065-1

Den europastandard som CENELEC har tagit fram och som reglerar signalöverföring över elnät benämns EN 50 065-1. Bland annat definierar denna standard olika frekvensband för olika typer av signalering i elnätet. Dessa frekvensband kallas CENELEC-banden, och definieras enligt följande:

- *A-bandet*. Frekvensområdet från 9 till 95 kHz är reserverat för energibolagens signalering i elnätet, t.ex. för AMR-system.
- *B-bandet*. Frekvensområdet 95 till 125 kHz är avsett för kundinstallationers elnätskommunikation utan accessprotokoll.
- *C-bandet*. Frekvensområdet 125 till 140 kHz är tillägnat kundinstallationers elnätskommunikation med accessprotokoll. EN 50 065-1 beskriver krav på dessa protokoll, som måste vara av CSMA-typ (*Carrier-Sense Multiple-Access*). Bland annat krävs att en signaltransmission inte får pågå kontinuerligt i mer än 1 sekund och att transmission bara får ske om frekvensbandet inte redan är i bruk.
- *D-bandet*. Frekvensområdet 140 till 148,5 kHz är precis som B-bandet reserverat för kundinstallationers elnätskommunikation utan accessprotokoll [5].

Figur 2-8 nedan visar CENELEC-indelningen av olika frekvensband.

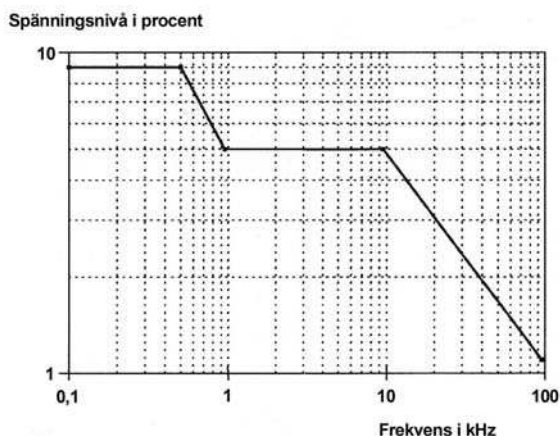


Figur 2-8. CENELEC-banden och respektive användningsområde.

2.1.2.3 EN 50 160

CENELEC's standard EN 50 160 anger huvudegenskaper samt gränser och värden för den elektriska spänning som en elkund är ansluten till. Standarden definierar egenskaperna hos matningsspänningens frekvens, storlek, kurvform samt fassymmetri.

Av särskilt intresse för detta examensarbete är EN 50 160-standardens rekommendationer för spänningsnivåer hos elnätsskommunicerande signaler i CENELEC's A-band. Standarden säger att under mer än 99 % av dygnet skall tresekundersmedelvärdet hos signalspänningen vara mindre eller lika med värdena i figur 2-9 nedan. Detta måste alltså tillverkarna rätta sig efter vid design av elnätsskommunicerande system, för att signaleringen inte ska påverka el-kvaliteten i nätet [6].



Figur 2-9. Spänningsnivåer för signalfrekvenser i procent av den nominella systemspänningen i allmänna LV-distributionssystem [6].

2.1.2.4 EMC

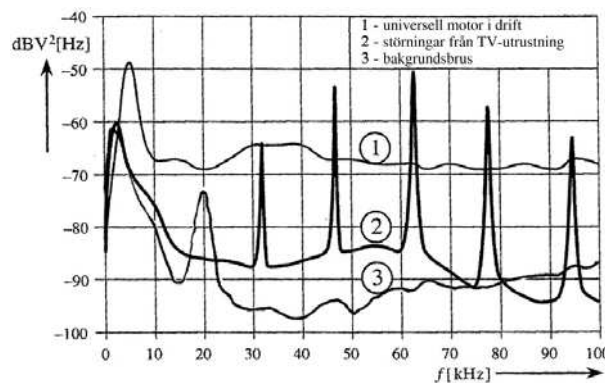
EMC är en förkortning för *Electro Magnetic Compability*, vilket säger en del om dess innebörd. EMC-direktivet har utfärdats av EU och är en tvingande norm för konstruktion och handhavande av elektrisk apparatur. Direktivet innebär att en elektrisk apparat ska fungera tillfredsställande i sin elektromagnetiska miljö, och den får inte inverka störande på denna miljö. För att en apparat ska anses uppfylla EMC-kraven krävs att den genomgår och godkänns i ett antal tester. EMC-direktivet anger inga nivåer, utan standarder som styr gränsvärden och nivåer tas fram av olika branschorganisationer, och godkänns sedan av EU-kommissionen. I och med att en standard harmoniserar med EMC-direktivet blir den en Europainorm och därmed tvingande inom EU [15].

2.1.3 Störningar i elnätet

I detta avsnitt beskrivs olika typer av störningar som alla har den egenskapen att de skapar en ogästvänlig miljö för informationsöverföring i elnätet. Framförallt konfronteras elnätsskommunikationens signaler med bevärande brus i olika former, övertoner från nätfrekvensen samt signaldämpning längs elledningarna. För att analysera eller designa kommunikation via elnätet är det oerhört viktigt att känna till de olika svårigheterna man ställs inför. Dagens elnät är delvis föråldrat och har designats för att endast distribuera elektricitet så effektivt som möjligt. Elledningarna inte är utformade för dataöverföring utan erbjuder en besvärlig miljö när det gäller att implementera tillförlitlig kommunikation [7]. Därför är effekten av de störningar som beskrivs i detta avsnitt väldigt påtaglig, och något som kräver noggrann beaktning.

2.1.3.1 Brus

Brusstörningar i elledningar är ett stort problem för dataöverföring, eftersom de ofta har egenskaper som är svåra att förutse och analysera. Till skillnad från andra väl designade kommunikationsmedium så kan man inte förutsätta att elnätet representeras av en additiv, vit och Gaussisk brus (AWGN) [14]. Istället är brusegenskaperna hos elnätets kommunikationskanal svåra att förutse, med såväl färgat bakgrundsbrus, som smalbandigt brus och impulsbrus. Få elektroniska nätverk visar en så stor variation av signalspektrum som lågspänningsnäten. Störningskällor är ofta elektrisk apparatur ansluten till lågspänningsnätet hos elkonsumenten. Sådana brusksällor kan vara elektriska motorer, lysrör, radiosignaler, strömbrytare och annan elektrisk apparatur som är ansluten till elnätet [7]. Figur 2-10 nedan visar frekvensspektrum från olika störkällor i en anläggning. Kurva 1 visar bruset från så kallade universella motorer som förekommer i t.ex. dammsugare, hårtorkar, borrar maskiner osv. Bruset i kurva 2 härrör från bildröret i en TV vars horisontella uppdateringsfrekvens är 15,734 kHz. Vi ser störningens övertoner med jämna intervall längs frekvensaxeln. Kurva 3 visar bakgrundsbruset i en anläggning utan störkällor i drift.



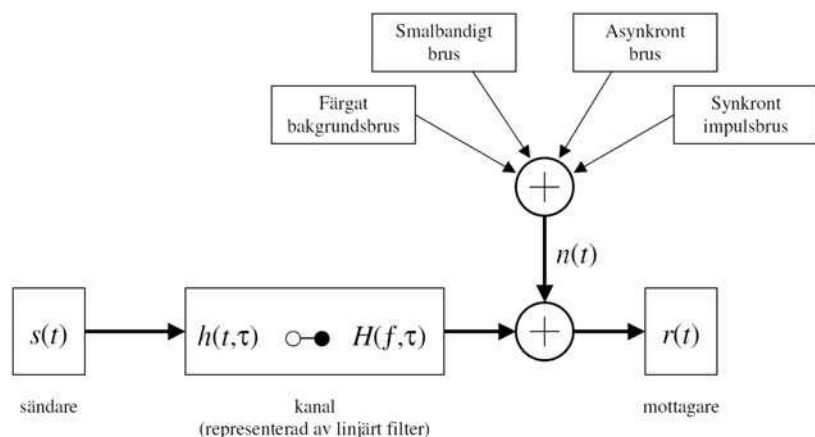
Figur 2-10. Frekvensspektrum som sprids i elnätet från en universell motor i drift (1), TV-utrustning (2) respektive bakgrundsbrus (3) [7].

I och med att elektriska apparater används vid olika tillfällen, lysrör tänds och släcks och så vidare, så varierar bruset med tiden och är omöjligt att förutse. Strömbrytare kan vid det strömbrytande ögonblicket ge en smal spännings- eller strömtopp, och ses som en högfrekvent transient i frekvensspektrumet [8]. Följande avsnitt syftar till att ge en förståelse för de vanligaste störningstyperna i lågspänningsnätet.

Om man analyserar frekvensspektrumet i ett typiskt kundanslutet lågspänningsnät kan fyra olika typer av brus identifieras:

- färgat bakgrundsbrus, som bl.a. härrör från olika anslutna hushållsapparater, t.ex. datorer, dimmers och hårtorkar
- smalbandigt brus, som härrör från t.ex. amplitudmodulerade sinussignaler från TV- och radiosändare
- impulsbrus som är synkront med nätets AC-frekvens, dvs. brus med frekvenskomponenter som är multiplar av nätfrekvensen 50 Hz
- asynkront impulsbrus, som härrör från frekvensspikar i samband med att t.ex. strömbrytare slås till/från [8].

Figur 2-11 nedan visar en schematisk representation av kommunikationskanalen i ett elnätsskommunicerande system. Kanalen representeras av ett linjärt filter med impulssvar $h(t, \tau)$, vars Fouriertransform $H(f, \tau)$ motsvarar överföringsfunktionen. Additivt brus $n(t)$ påverkar den från sändaren transmitterade signalen $s(t)$, och den hos mottagaren detekterade signalen ges av $r(t)$. Vi ser i figuren att det additiva bruset består av de olika brustyperna som nämndes ovan, och dessa beskrivs i följande avsnitt.



Figur 2-11. Signalteoretisk modell av kommunikationskanalen i ett elnätsskommunicerande system.

2.1.3.1.1 Färgat bakgrundsbrus

Det färgade bakgrundsbruset kan ses som flera vitbrusiga källor med olika bruseffekt i olika frekvensband. Det färgade bakgrundsbruset karaktäriseras av sitt karaktäristiska frekvensspektrum, som uppvisar höga värden från nätfrekvensen (50 Hz) till ungefär 20 kHz. Vid högre frekvenser än dessa uppvisar bakgrundsbruset avtagande värden i spektrumet [7]. Kring 150 kHz-bandet är effekten hos det färgade bakgrundsbruset oftast mindre än 1 % av dess effekt vid 20 kHz och vid ännu högre frekvenser förekommer bakgrundsbruset endast med väldigt låg effekt, vilket ofta gör att bakgrundsbrus i de höga frekvensbanden kan ses som vitt [17].

2.1.3.1.2 Smalbandigt brus

Det smalbandiga bruset består vid höga frekvenser (1–22 MHz) vanligtvis av modulerade sinusvågor, som härrör från analoga radioutsändningar. Vid frekvenser under 150 kHz, dvs. under radiobanden, kan smalbandiga störningar komma från switchande effektkällor, frekvensomriktare, fluorescerande lampor, TV-apparater eller datorskärmar. Televisionsrelaterade störningar förekommer i Europa som smalbandigt brus kring 15,625 kHz, vilket motsvarar den horisontella uppdateringsfrekvensen hos den europeiska PAL-standard.

Det smalbandiga bruset känns hos ett frekvensspektrum igen som skarpa toppar med hög effekt över ett begränsat frekvensband [7].

2.1.3.1.3 Synkront impulsbrus

Impulsbrus karaktäriseras av korta spänningstoppar som varar ungefär 10–100 μs , och kan nå amplituder upp emot 2 kV. Det synkrona impulsbruset kan delas in i två olika klasser: nätsynkront, dvs. synkront med nätfrekvensen 50 Hz, samt störningssynkront, dvs. synkront med en störningskälla. Det nätsynkrona impulsbruset härrör framförallt från kiselstyrda likriktare, som switchar ett antal gånger under en 50 Hz-period. Det resulterar i frekvenskomponenter vid heltalsmultiplar av nätfrekvensen. Även thyristorbaserade ljusdimrar ger upphov till samma typ av synkront impulsbrus [8].

Generellt kan sägas att det synkrona impulsbruset inte förekommer regelbundet, utan ibland kan nätet vara helt fritt från denna typ av störning, medan den kan stanna i flera timmar om den väl har kommit [7].

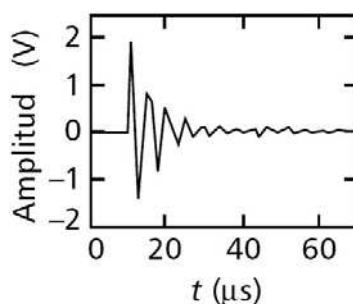
Frekvensspektrumet hos synkront impulsbrus är generellt avtagande med ökande frekvenser, men i bandet 50–200 kHz uppvisar det synkrona impulsbruset särskilt hög effekt.

2.1.3.1.4 Asynkront impulsbrus

Det asynkrona impulsbruset är den bruskategori som är absolut svårast att förutse och modellera, eftersom det är helt stokastiskt. Energin hos denna typ av brus är ofta hög och påverkar elnätssamfundet i hög grad, eftersom impulsernas varaktighet ofta överstiger längden hos en kommunikationssymbol. Ibland förekommer även impulståg av asynkrona impulser, vilket skadar elnätssamfundet i ännu större omfattning [8].

Vid analys av det asynkrona impulsbruset i frekvensplanet så kan man konstatera att bruset kan liknas vid en bredbandig del med större effekt än vanligt bakgrundsbrus, som härrör från den snabbt stigande spänningsamplituden [7]. Dessutom har det asynkrona impulsbruset en smalbandig del med en effekttopp kring en speciell frekvens, som motsvarar oscillationsfrekvensen hos spänningsimpulsen [8].

I tidsplanet syns det asynkrona impulsbruset vanligtvis som snabbt utdöende spänningsspikar. Amplituden hos impulserna är oftast runt 1 V, impulsbredden i storleksordningen 100 μs och intervalltiden ca 100 ms. Figur 2-12 nedan visar ett exempel på en asynkron impulsstörning i tidsplanet.



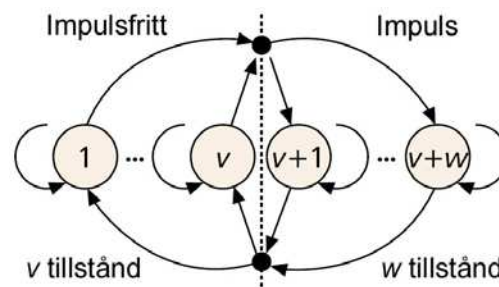
Figur 2-12. Exempel på en impulsstörning i tidsplanet [8].

Eftersom det asynkrona impulsbruset är den förmodligen största orsaken till svårigheterna med elnätsskommunikation är det viktigt att kunna ställa upp en någorlunda korrekt analytisk modell vid beräkning av detta. Ett sätt att modellera bruset är med hjälp av ett impulståg bestående en generaliserad impuls $imp(t)$ med enhetsamplitud och enhetsbredd. Impulståget $n_{imp}(t)$ byggs upp av tre stokastiska variabler: amplitud A , impulsbredd t_w och intervalltid (tid mellan två impulser) t_a , och kan beskrivas enligt:

$$n_{imp}(t) = \sum_i A_i imp\left(\frac{t - t_{a,i}}{t_{w,i}}\right) \quad (2.9)$$

De stokastiska egenskaperna hos parametrarna i denna impulstågsbeskrivning måste bestämmas i det enskilda fallet genom mätningar i fält [7].

En annan metod att modellera det asynkrona impulsbruset är med hjälp av en Markovkedja. Modellen består två tillståndsklasser: brustillstånd och impulsfria tillstånd, enligt figur 2-13 nedan. Varje brustillstånd motsvaras av en exponentialfördelad impulsbredd, medan ett impulsfritt tillstånd motsvaras av en exponentialfördelad intervalltid. Med hjälp av denna metod går det att uppnå väldigt goda approximationer av verkliga brusförhållanden.



Figur 2-13. Markovkedja för modellering av asynkront impulsbrus [8].

Vid mätningar av denna brustyp är det uppenbart att förekomsten är starkt beroende av mänsklig aktivitet. I industriområden visar sig det asynkrona impulsbruset förekomma relativt jämnt fördelat över dag- och natttid, medan man i bostadsområden kan observera denna brustyp mer frekvent under dagtid, speciellt mellan klockslagen 07.00–09.00 och 19.00–00.00. Under dessa tidsintervall kan flera impulser per sekund förekomma. Men tack vare att varje impuls varar under en relativt kort tidsperiod, kan man lyckligtvis konstatera att även i kraftigt störda nätområden såsom intill industrier, så förekommer asynkrona impulser under mindre än 1 % av tiden. Det innebär alltså att elnätet under drygt 99 % av tiden är helt fritt från asynkront impulsbrus [8].

2.1.3.2 Övertoner

Övertonsdistorsion är en typ av kurvformsdistorsion och består av spännings- och strömvariationer i elnätet. Detta påverkar framförallt nätspänningen och nätfrekvensen 50 Hz, vilket i sin tur kan påverka elnätsskommunicerande system som använder nätfrekvensen som referens vid sin signalering.

Den sinusvåg som motsvarar elnätets vanliga växelspanning, nedan även kallad AC-vågen, kan delas upp i en summa av övertonskomponenter enligt:

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^N V_k \sqrt{2} \cos(2\pi k f_0 t + \phi_k) \quad (2.10)$$

där $f_0 = 50$ Hz är grundfrekvensen vilket motsvarar $k = 1$, V_k motsvarar spänningsnivån för överton k och V_0 är en DC-komponent. Värdet på N är oändligt i det analoga fallet och bestäms av samplingsfrekvensen i det digitala fallet.

Ofta innehåller AC-vågen komponenter som inte är jämna multiplar av nätfrekvensen 50 Hz. Dessa komponenter kallas mellantoner, och då det förekommer endast en mellanton vid frekvensen αf_0 fås följande uttryck för nätspänningen:

$$v(t) = V_0 + V_\alpha \sqrt{2} \cos(2\pi \alpha f_0 t + \phi_\alpha) + \sum_{k=1}^N V_k \sqrt{2} \cos(2\pi k f_0 t + \phi_k). \quad (2.11)$$

Då $\alpha < 1$ i ekvation 2.11 påträffar vi ett specialfall av mellantoner som kallas undertoner, dvs. toner med lägre frekvens än nätfrekvensen.

De vanligaste övertonerna i elnätet består av udda övertoner, dvs. toner med frekvenser som är udda heltalsmultiplar av nätfrekvensen, och som härrör från distributionsspänningar och lastströmmar. För att åskådliggöra effekterna av udda övertoner på kurvformen så antas en tredjeton med frekvensen 150 Hz förvränga nätfrekvensen 50 Hz. För enkelhetens skull används enhetsamplitud, och distorsionsvågen har bara 10 % av originalvågens amplitud, vilket ger följande uttryck för den resulterande vågen:

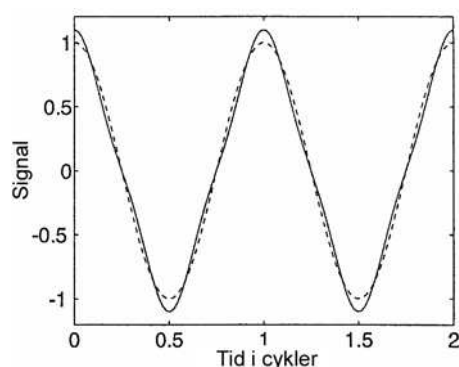
$$v(t) = \cos(2\pi f_0 t) + 0,1 \cos(3 \times 2\pi f_0 t). \quad (2.12)$$

Figur 2-14 nedan visar den ickeförvrängda sinusvågen (streckad kurva) och den distorderade kurvan (heldragen kurva). Vi ser att signalamplituden ökar med 10 %, medan signalens RMS-värde endast ökar med 0,5 %.

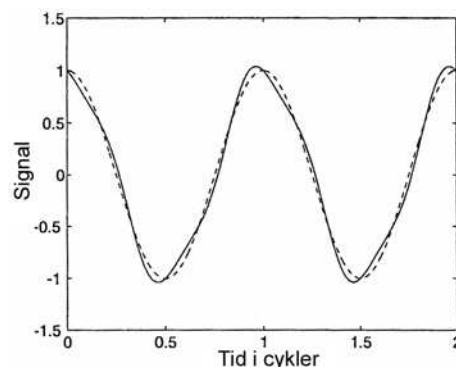
Då övertonen även har en fasvridning blir distorsionen av AC-vågen ännu värre. För att åskådliggöra detta använder vi samma uttryck som ekvation 2.12 där vi introducerar en fasvridning med 90° hos övertonen i förhållande till grundtonen. Den resulterande vågen ges av:

$$v(t) = \cos(2\pi f_0 t) + 0,1 \cos(3 \times 2\pi f_0 t - \frac{\pi}{2}). \quad (2.13)$$

Figur 2-15 nedan visar den ickeförvrängda sinusvågen (streckad kurva) och den distorderade kurvan (heldragen kurva). Signalamplituden ökar marginellt, medan fasförskjutningen vid nollgenomgångarna förvränger formen hos sinusvågen så att den blir osymmetrisk.



Figur 2-14. Udda övertonsdistorsion (heldragen kurva) i fas med grundtonen (streckad kurva) [3].



Figur 2-15. Effekt av tredje tonskomponent vriden 90° (heldragen kurva) mot grundtonen (streckad kurva) [3].

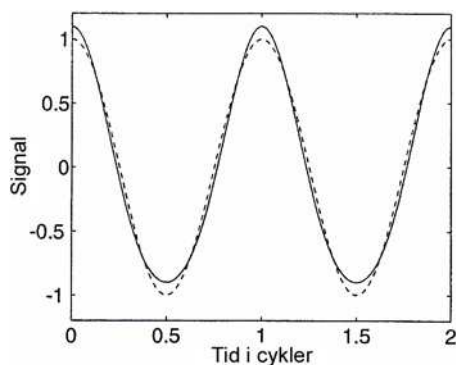
Jämna övertoner är förbjudna enligt gällande föreskrifter och får inte genereras av utrustning som är ansluten till elnätet. Därför är dessa övertoner ovanliga i elnätet, men de kan uppkomma hos en del större likriktare och vid spänningssättning av transformatorer. En jämn överton har en frekvens som är en jämn heltalsmultipel av nätfrekvensen, och för att åskådliggöra effekten av jämna övertoner på grundtonen utgår vi från samma exempel som ovan. Vi använder alltså en andraton med frekvensen 100 Hz för att förvränga nätfrekvensen 50 Hz. För enkelhetens skull används enhetsamplitud, och distorsionsvågen har bara 10 % av originalvågens amplitud, vilket ger följande uttryck för den resulterande vågen:

$$v(t) = \cos(2\pi f_0 t) + 0,1 \cos(2 \times 2\pi f_0 t). \quad (2.14)$$

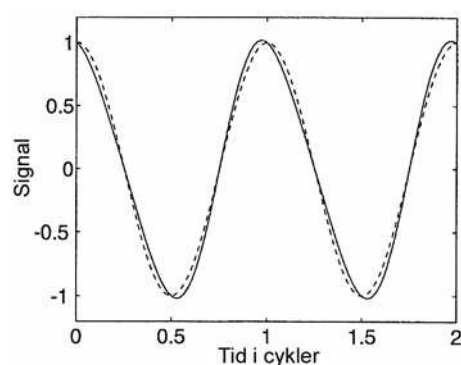
Figur 2-16 nedan visar den ickeförvrängda sinusvågen (streckad kurva) och den distorderade kurvan (heldragen kurva). Vi ser att den distorderade vågen får positiva och negativa halvperioder som inte längre är symmetriska, utan den positiva halvperioden blir smalare och högre medan den negativa blir bredare och lägre. Tittar vi dessutom på effekten av en fasvridning med 90° hos övertonen så får vi uttrycket:

$$v(t) = \cos(2\pi f_0 t) + 0,1 \cos(2 \times 2\pi f_0 t - \frac{\pi}{2}) \quad (2.15)$$

för den distorderade vågen. I figur 2-17 nedan ser vi hur den distorderade vågen (heldragen kurva) har samma nollgenomgångar som grundtonen (streckad kurva), medan vågtopparna kommer i ofas [3].



Figur 2-16. Jämn övertonsdistorsion (heldragen kurva) i fas med grundtonen (streckad kurva) [3].



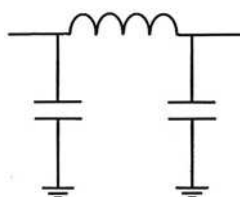
Figur 2-17. Effekt av andratonskomponent vriden 90° (heldragen kurva) mot grundtonen (streckad kurva) [3].

2.1.3.3 Frekvensomriktare

En stor störningskälla och spridare av brus i elnätet är frekvensomriktaren. Frekvensomriktaren används för uppstart och varvtalsreglering hos olika asynkrona motorer som är anslutna till elnätet. Nackdelen hos många eldrivna motorer är de höga startströmmar som krävs på grund av tröghet i uppstartningsfasen. En frekvensomriktare undviker dessa startströmmar genom att arbeta med en optimal spänning för det aktuella varvtalet hos maskinen och styr varvtalet genom att reglera matningsspänningens frekvens till maskinen. Driften av den frekvensstyrda asynkronmaskinen blir jämnare och man minskar dess uppvärmning vid start och under drift [2].

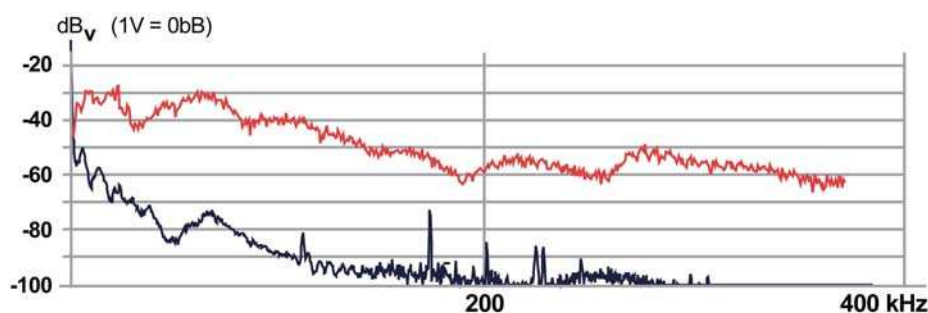
För att förstå funktionen hos en frekvensomriktare kan det vara bra att studera dess uppbyggnad. Den matande trefasiga växelspänningen konverteras först till likspänning med hjälp av likriktare. Likriktaren följs av en omriktare, uppbyggd av resistorer och switchar, vars uppgift är att skapa en ny växelspänning med önskad frekvens. Denna växelspänning är till att börja med en fyrkantsvåg, men tack vare induktansen hos asynkronmaskinens statorlindningar övergår fyrkantsvågen till en ström som är i det närmaste sinusformad. De branta flankerna hos fyrkantsvågen dvs. de korta stigtiderna, ger upphov till högfrekventa spänningsövertoner. Störningar med frekvenser upp till 100 MHz kan spridas i det matande nätet. Denna egenskap gör frekvensomriktaren till en oönskad fiende för elnätskommunicerande system [12].

För att inte strida mot EMC-kraven används ofta filter på nätingången hos frekvensomriktare. Filtren kallas EMC-filer och reducerar de högfrekventa störningarna från 50–100 kHz och högre i elnätet, men har ingen reducerande effekt hos lågfrekventa övertoner. Filtren är uppbyggda av två kondensatorer och en spole, sammankopplade i vad som kallas PI-koppling, enligt figur 2-18 nedan.



Figur 2-18. PI-koppling hos EMC-filer [12].

Störningarna från frekvensomriktare fortplantar sig i anläggningen via elledningar, vattenledningsrör och andra ledande material, och sprider sig i elnätet [12]. Figur 2-19 nedan visar två olika frekvensmätningar på elnätet. Den övre kurvan visar ett frekvensspektrum från matningen hos en frekvensomriktare, medan den nedre visar brusnivåerna hos ett mer allmänt elnät i stadsmiljö. Vid båda mätningarna har ett högpasfilter använts för att ta bort allt frekvensinnehåll under 10 kHz. Skillnaden mellan brusnivåerna intill frekvensomriktaren och i det allmänna nätet är tydlig, och syns över hela frekvensspektrumet.



Figur 2-19. Brusnivåer intill frekvensomriktare (övre kurvan) och i allmän stadsmiljö (nedre kurvan) [2].

2.1.3.4 Signaldämpning

Ett annat problem för elnätskommunikation, som är minst lika allvarligt som brusstörningar, är dämpning av signalernas effekt i elledningarna. Dämpning av informationsbärande signalers effekt i elnätet är beroende av flera olika faktorer. Olika former av impedivt motstånd i elnätet inverkar dämpande på all signalpropagering. Dessutom kan signaler dämpas i transformatorer samt i kopplingar. De impedanser som framförallt är avgörande för dämpningen av en signal i ett nätavsnitt är:

- elledningarnas karaktäristiska impedans, Z_{LK}
- lastimpedansen i nätet, Z_L .

Den karaktäristiska impedansen Z_{LK} i en elledning är proportionell mot dess längd, vilket innebär att ökande längd hos ledaren ger en ökande impedans. Dämpningen av en signals effekt ökar då elledningens karaktäristiska impedans Z_{LK} ökar. Det medför att signaleffekten alltid är avtagande i elledningens längdriktning, vilket är viktigt att ha i åtanke vid design och analys av ett elnätskommunicerande system. Signaldämpning p.g.a. den karaktäristiska impedansen i en elledning beror inte bara på ledningens längd, utan är också beroende av signalens frekvens. Högre frekvenser medför större karaktäristisk impedans hos en elledning, vilket illustrerades av frekvensberoendet hos den karaktäristiska impedansen hos en typisk 4-ledare i figur 2-6.

Dämpning av signaleffekt i elnätet är även i stor utsträckning beroende av lastimpedansen Z_L , dvs. impedansen ifrån all nätansluten utrustning. Detta ser vi i beskrivningen av propageringskonstanten γ i ekvation 2.7 ovan, samt försvagningsfaktorn $\alpha(f)$ i ekvation 2.8.

Kabelparametrarna C' och L' kan i dessa ekvationer beräknas utifrån geometriska dimensioner och materialens egenskaper. Resistansen och konduktansen per enhetslängd hos kabeln är proportionell mot \sqrt{f} respektive f . Detta ger ett förenklat uttryck för propageringskonstanten enligt:

$$\gamma = \underbrace{k_1\sqrt{f} + k_2f}_{\text{Re}(\gamma)=\alpha} + j \underbrace{k_3f}_{\text{Im}(\gamma)=\beta} \quad (2.16)$$

där konstanterna k_1 , k_2 och k_3 summerar material- och geometriparametrarna hos kabeln. Realdelen α hos denna beskrivning av propageringskonstanten ökar med frekvensen, och är proportionell mot f , \sqrt{f} eller båda två, beroende på vilken av konstanterna k_1 och k_2 som är dominant. Utifrån detta kan man sammanfatta en approximation av försvagningsfaktorn α enligt:

$$\alpha(f) = a_0 + a_1 \cdot f^k \quad (2.17)$$

vilket ger oss möjligheten att med hjälp av tre parametrar beskriva signalförsvagningen $D(f,d)$ hos en signal med frekvens f i en elkabel med längd d , enligt följande uttryck:

$$D(f,d) = e^{-\alpha(f) \cdot d} = e^{-(a_0 + a_1 \cdot f^k) \cdot d}. \quad (2.18)$$

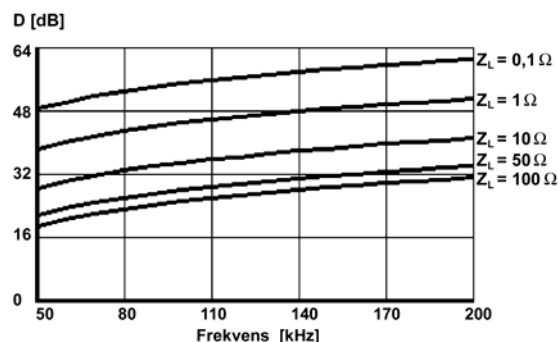
Eftersom det är svårt att ta fram alla nödvändig geometri- och materialdata för kablar i verkliga elnät, är det också svårt att på analytisk väg beräkna parametrarna a_0 , a_1 och k i denna beskrivning av signalförsvagningen. Istället brukar parametrarna vanligtvis beräknas ur uppmätta överföringsfunktioner hos ett nät [9].

Lastimpedansen, Z_L , varierar vanligtvis i intervallet 0,1 till 100 Ω [24]. Då spänningen U i elnätet alltid är konstant (frånsett mindre variationer) följer av Ohms lag i ekvation 2.19 nedan att ökande ström I medför lägre lastimpedans Z_L . Då stor ström I medför hög effekt P enligt ekvation 2.20, innebär detta att hög effekt i nätet motsvarar en låg lastimpedans.

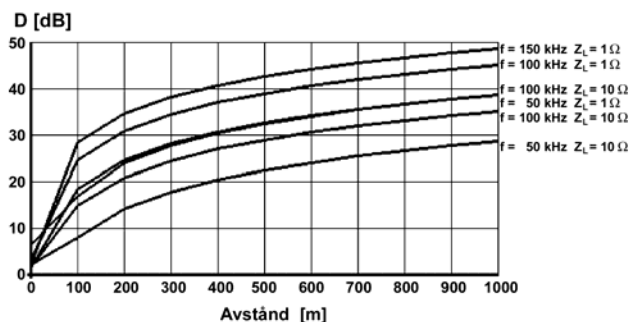
$$U = Z_L \cdot I \quad (2.19)$$

$$P = U \cdot I \quad (2.20)$$

Signalers dämpning i elnätet ökar med ökande ström, vilket motsvaras av minskande lastimpedans. Figur 2-20 nedan illustrerar dämpningen hos en 1000 meter lång ledare vid olika lastimpedans Z_L . Figuren visar att dämpningen ökar med minskande lastimpedans. Dessutom ökar dämpningen med frekvensen, vilket beror på att elledningens karaktäristiska impedans ökar med frekvensen. Figur 2-21 nedan illustrerar signaldämpningens beroende av ledningslängden. Vi ser att dämpningen ökar med ledningslängden, vilket beror på elledningens ökande impedans i längdriktningen.

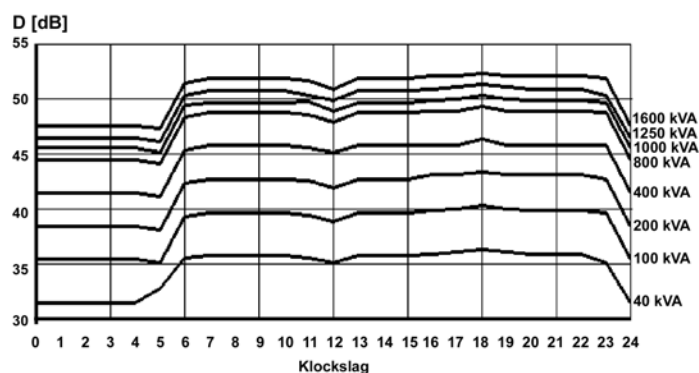


Figur 2-20. Dämpning vid olika frekvens för olika lastimpedans i 1000-metersledare [4].



Figur 2-21. Dämpning vid olika avstånd för olika frekvens och lastimpedans i 1000-metersledare [4].

Eftersom dämpningen av signaleffekt i elnätet är beroende av effektuttaget, är dämpningen större i distributionsnät under transformatorer med stor märkeffekt. Med tanke på att effektuttaget i ett nät varierar mycket över tiden så är även signaldämpningen väldigt varierande. Figur 2-22 nedan visar hur dämpningen D varierar under ett vardagsdygn hos nät som matas från transformatorer med 40–1600 kVA märkeffekt. Vi ser att större effekt i nätet medför ökande signaldämpning, varför dämpningen är som lägst nattetid då lasten är låg. Då låg dämpning medför minskad sannolikhet för bitfel hos signaleringen, kan vi konstatera att elnätskommunicerande system teoretiskt sett bör uppvisa bäst prestanda under tidsperioden mellan midnatt och klockan 07.00 [20].



Figur 2-22. Dämpning vid olika tid på dygnet i nät matade med olika transformatorer [4].

2.1.4 Kanalmodeller

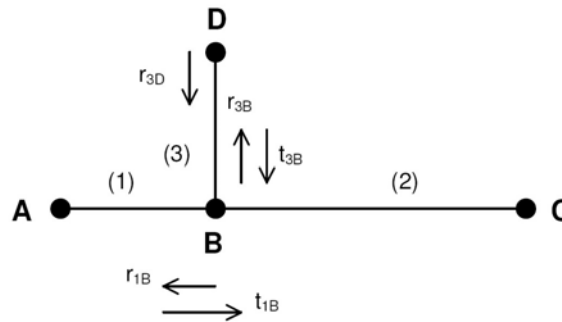
För att kunna simulera och analysera elnätets egenskaper som kommunikationsmedium bör man ha en bra modell för kanalens påverkan hos den transmitterande signalen. Inom kommunikationsteorin kallar man denna effekt för kanalens överföringsfunktion, som kan modelleras med hjälp av ett filter.

En enkel metod för att grovt kunna uppskatta överföringsfunktionen mellan två punkter i ett elnät utvecklades av Hensen [8]. Denna metod interpolerar med hjälp av en rät linje den med frekvensen ökande signalförsvagningen, vilket ger en enkel ekvation för att beräkna amplituden hos kanalens överföringsfunktion. Denna metod tar dock inte hänsyn till den

trädstruktur som elnätet har och som ger fördröjda ekon av signaler från olika grenar i nätet. Därför var det nödvändigt att ta fram en ny modell som tog denna effekt i beaktning.

2.1.4.1 Förgrenad signalpropagering

En signal som sänds från en punkt i elnätet propagerar inte enbart den kortaste vägen till mottagaren, utan passerar även genom andra förgreningar i nätet, vilket ger fördröjda och dämpade ekon från den sända signalen hos mottagaren. Detta resulterar i att komplexiteten hos modeller för kanalens överföringsfunktion ökar, eftersom varje punkt i elnätet har en unik trädstruktur.



Figur 2-23. Förgrenat elnät med signalpropagering [9].

För att härleda en överföringsfunktion för dessa så kallade ekomodeller kan det fiktiva nätet i figur 2-23 ovan utgöra exempel. Detta enkla exempel har bara en förgrening i sin nätstruktur och består av segmenten (1), (2) och (3) med längderna l_1 , l_2 respektive l_3 samt de karaktäristiska impedanserna Z_{L1} , Z_{L2} respektive Z_{L3} . För att förenkla modellen något så antas endast punkterna B och D vara reflekterande, med reflektionsfaktorerna r_{1B} , r_{3D} respektive r_{3B} och transmissionsfaktorerna t_{1B} respektive t_{3B} . Varje väg som en signal kan ta från sändare till mottagare har en egen viktfaktor g_i som motsvarar produkten av alla reflektions- och transmissionsfaktorer längs vägen. Eftersom punkt B och D är reflekterande i detta exempel kan en signal som skickas från A till C ta ett oändligt antal vägar, t.ex. $A \rightarrow B \rightarrow C$, $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow C$, $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow C$, och så vidare. Men eftersom vikt faktorn, dvs. produkten av transmissions- och reflektionsfaktorerna längs vägen mellan sändare och mottagare, alltid är mindre eller lika med ett, så blir inverkan liten hos mottagaren från signaler som reflekterats många gånger i nätet, eftersom vikt faktorn då konvergerar mot noll [9]. Vi har alltså att:

$$|g_i| \leq 1. \quad (2.21)$$

Eftersom signalekon med många reflektioner blir så dämpade att de får en liten betydelse hos mottagaren, kan modellen förenklas ytterligare genom att bestå av ett bestämt antal N dominanta vägar mellan sändare och mottagare.

Signalfördröjningen i den i :te vägen från sändare till mottagare ges av τ_i enligt:

$$\tau_i = \frac{d_i \sqrt{\varepsilon_r}}{c_0} = \frac{d_i}{v_p} \quad (2.22)$$

där ε_r är den dielektriska konstanten hos det isolerande materialet kring ledaren, c_0 är ljusets hastighet i vakuum och d_i är ledningslängden hos den i :te vägen.

Signaldämpningen längs signalens väg från sändare till mottagare är viktigt att ta hänsyn till i ekomodellen. Här möts signalteori och elledningarnas fysikaliska egenskaper som behandlades i avsnitt 2.1.1.3.4. Överföringsfunktionen hos en elledning med längd d kan uttryckas med hjälp av propageringskonstanten γ från ekvation 2.7 och spänningen $U(x)$ vid avstånd x , enligt:

$$H(f) = \frac{U(x=d)}{U(x=0)} = e^{-\gamma \cdot d} = e^{-\alpha(f) \cdot d} e^{-j\beta(f) \cdot d}. \quad (2.23)$$

Detta känns igen från avsnitt 2.1.3.4 som behandlade signaldämpning i elnätet. Vi ser att den första faktorn i högerledet av ekvationen ovan är identisk med uttrycket för just dämpningen $D(f,d)$ vid frekvens f och avstånd d [9]. Faskonstanten β beskrevs i ekvation 2.8 och den andra faktorn i högerledet av ekvationen ovan motsvarar fördröjningen. Det slutgiltiga uttrycket för ekomodellens överföringsfunktion $H(f)$ ges nu enligt:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{g_i}_{\text{viktfaktor}} \cdot \underbrace{e^{-(a_0+a_1 f^k) \cdot d_i}}_{\text{dämpning}} \cdot \underbrace{e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}}}_{\text{fördröjning}} \quad (2.24)$$

Denna ekomodell beskrevs av Zimmermann [9] och ses som den bästa och mest praktiskt användbara vid beskrivning av en komplex överföringsfunktion mellan två punkter i elnätet.

Zimmermanns ekomodell föregicks av en något enklare, som beskrevs av Philipps [23] och som är uppbyggd på i princip samma sätt. Philipps använder i sin ekomodell ett impulssvar som en superpositionering av N st Diracpulser som motsvarar superpositionen av signaler från N st olika nätförgreningar. Var och en av dessa impulser multipliceras med en komplex faktor ρ_i som motsvarar produkten av reflektions- och transmissionsfaktorerna längs den i :te nätgrenen. Impulserna fördröjs dessutom med tiden τ_i vilket motsvarar ekots fördröjning från den i :te nätgrenen. Detta ger följande överföringsfunktion:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \rho_i \cdot e^{-j2\pi f \tau_i}. \quad (2.25)$$

Philipps modell beskriver väl de hack som signalekon ger hos överföringsfunktionen mellan två punkter i ett nät med fler förgreningar, och är därför lämplig att använda vid beskrivning av t.ex. inomhusnät som inte har någon tydlig lågpasskaraktäristik. Det har emellertid elnät i allmänhet när det är fråga om större sträckor, eftersom signalstyrkan avtar med den ökande impedansen i ledningens längdriktning. Zimmermann tar i sin ekomodell hänsyn till denna signaldämpning med hjälp av dämpningsfaktorn som beskrevs i ekvation 2.18 [8].

2.1.5 Modulering

För att överföra digital information över ett analogt medium, det vill säga elnätet i förevarande fall, krävs analog representation av de digitala bitarna. Denna process kallas modulering och mappar en diskret datavariabel $I \in \{0, \dots, M-1\}$ till en analog vågform $s_I(t) \in \{s_0(t), \dots, s_{M-1}(t)\}$ [43], vilket illustreras schematiskt i figur 2-24 nedan.

Moduleringen sker hos sändaren, medan mottagaren demodulerar den mottagna signalen utifrån samma moduleringsstrategi. Demoduleringen hos mottagaren syftar alltså till att tolka vilken diskret datavariabel som den erhållna analoga signalen motsvarar [24].

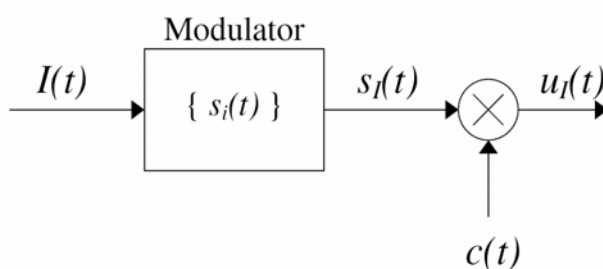
Eftersom signalmiljön hos elnätets kommunikationskanal skiljer sig avsevärt från andra klassiska kommunikationsmedium, är det extra viktigt att välja en moduleringsstrategi med god störningstålighet. För att öka prestandan hos informationsöverföringen i ett visst medium kan det vara fördelaktigt att anpassa de modulerade vågformerna till vissa frekvensband. Vid elnätskommunikation till exempel är det en vital och enkel åtgärd att placera informationsöverföringen vid band som inte överlappar nätets övertoner, dvs. udda multiplar av nätfrekvensen. Denna anpassning och förflyttning av informationsvågorna till lämpliga frekvensband sker med hjälp av en så kallad bärvåg $c(t)$ som beskrivs enligt:

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \phi_c) \quad (2.26)$$

där A_c motsvarar vågens amplitud, f_c är bärfrekvensen och ϕ_c fasen. Signalen $u_I(t)$ som representerar den diskreta datavariabeln I och som skickas från sändaren ges på s.k. *Envelope*-form enligt:

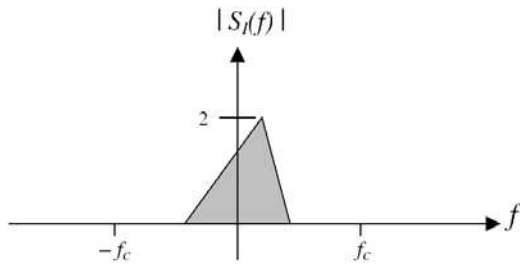
$$u_I(t) = s_I(t) \cdot c(t) = A(t) \cdot \sin[2\pi f(t) \cdot t + \varphi(t)]. \quad (2.27)$$

Figur 2-24 nedan illustrerar moduleringen och bärvågsuppblandning i schematisk form.

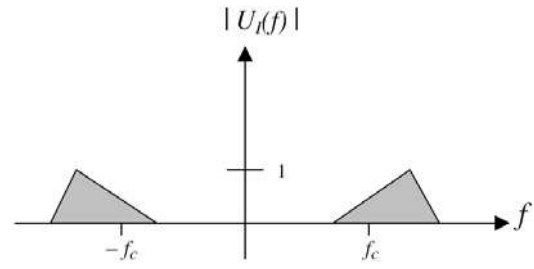


Figur 2-24. Mappning av digital information till analog vågform och bärvågsmodulering [43].

Bärvågen $c(t)$ flyttar alltså den informationsbärande signalen $s_I(t)$ till ett annat frekvensband, som vanligtvis ligger högre än frekvensen hos $s_I(t)$. Detta benämns även att basband-signalen $s_I(t)$ "blandas upp" med bärvågen $c(t)$, för att bilda bandpass-signalen $u_I(t)$. Figur 2-25 och 2-26 nedan illustrerar i frekvensdomänen hur frekvensbandet innehållande information kan se ut i basband- respektive bandpass-representation, dvs. före respektive efter uppblandning med en bärvåg.



Figur 2-25. Basband-signal i frekvensdomänen [43].



Figur 2-26. Bandpass-signal i frekvensdomänen [43].

Den transmitterade signalen $u_I(t)$ kan även beskrivas på s.k. *In-Phase/Quadrature*-form enligt

$$u_I(t) = u_c(t) \cos(2\pi f(t) \cdot t) - u_s(t) \sin(2\pi f(t) \cdot t) \quad (2.28)$$

där $u_c(t)$ är ekvationens *In-phase*-komponent och $u_s(t)$ dess *Quadrature*-komponent. I kommande avsnitt benämns dessa signalkomponenter även I- respektive Q-kanaler.

Informationen hos den transmitterade signalen $u_I(t)$ kan representeras av amplituden $A(t)$, frekvensen $f(t)$ eller fasen $\varphi(t)$. Följande avsnitt beskriver respektive moduleringsstrategi [22][24][43].

2.1.5.1 Amplitudmodulering

Då digital information i en analog signal motsvaras av olika amplitud $A(t)$ hos vågen, har man så kallad amplitudmodulering (AM). I det enklaste scenariot av binär amplitudmodulering finns bara två amplitudnivåer, noll och ett, hos den informationsbärande signalen. Med andra ord kan man sända en binär nolla genom att slå ifrån bärvågen under en tidsperiod motsvarande bitlängden, medan en binär etta representeras av en aktiv bärvåg under en lika lång sekvens. Figur 2-27 nedan illustrerar detta, där den övre rektangulära kurvan motsvarar en binär dataström och den nedre kurvan representerar den amplitudmodulerade signalen som skickas från sändaren. Denna form av amplitudmodulering kallas ASK efter engelskans uttryck *Amplitude Shift Keying*, och är en moduleringssteknik som inom elnätsskommunikation endast har en historisk betydelse. Störningskaraktäristiken i elnäten gör ASK till ett dåligt alternativ eftersom allt additivt brus påverkar amplituden hos den mottagna signalen [7][24].

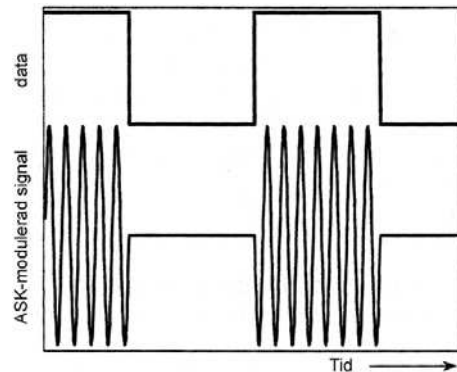
Följande uttryck beskriver en ASK-signal $u_{ASK}(t)$:

$$u_{ASK}(t) = d(t) \cdot A \cdot \sin(2\pi f t) \quad (2.29)$$

där A motsvarar bärvågens amplitud och f dess frekvens. Den digitala informationen representeras av dataströmmen $d(t)$ enligt

$$d(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} b_i \cdot \text{rect}\left(\frac{t - iT_b}{T_b}\right) \quad (2.30)$$

där b_i är en datavektor bestående av ettor och nollor och T_b är tidsperioden för en databit. ASK-moduleringen är linjär eftersom den i :te sända signalen är en linjär funktion den i :te databiten [7]. Dessutom kan man säga att ASK-moduleringen ”minneslös”, eftersom den i :te sända signalen endast beror på den i :te databiten och inte gamla värden [43].

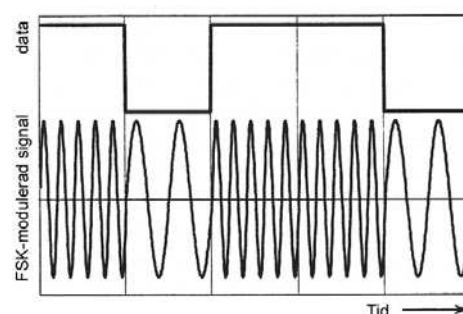


Figur 2-27. Dataström och ASK-modulerad analog representation [7].

Den uppenbara nackdelen med ASK-modulering är att en binär nolla motsvaras av en helt tyst signal. Det gör det dels svårt för mottagaren att avgöra om den uppfattade tystnaden motsvarar en nolla eller beror på avbrott. Dessutom uppstår synkroniseringsproblem mellan sändare och mottagare när fler nollor sänds i en följd.

2.1.5.2 Frekvensmodulering

Då man i en analog våg låter dess frekvens $f(t)$ representera digital information, har man så kallad frekvensmodulering (*FM*). I det enklaste scenariot av binär frekvensmodulering motsvaras en binär etta respektive nolla av varsin frekvens hos den informationsbärande signalen. Figur 2-28 nedan illustrerar detta, där den övre rektangulära kurvan motsvarar en binär dataström och den nedre kurvan representerar den frekvensmodulerade signalen som skickas från sändaren. Denna form av frekvensmodulering kallas *FSK* efter engelskans uttryck *Frequency Shift Keying*. Den frekvensmodulerande sändaren sänder alltså en signal på en viss frekvens f_1 under en tidsperiod som motsvarar bitlängden för att överföra en digital etta, och på en annan frekvens f_0 för att överföra en digital nolla. Avståndet mellan dessa frekvenser, $\Delta f = f_1 - f_0$, kan väljas utefter systemimplementationens behov, men måste vara större än datahastigheten hos kommunikationen. Det medför att bandbredden hos frekvensmodulerade system är större än hos amplitudmodulerade [7][24].



Figur 2-28. Dataström och FSK-modulerad analog representation [7].

Följande ekvation beskriver en binär FSK-signal $u_{FSK}(t)$, dvs. en FSK-signal som överför ettor och nollor med hjälp av varsin frekvens f_1 respektive f_0 :

$$u_{FSK}(t) = A \cdot \sum_{i=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t - iT_b}{T_b}\right) \cdot [b_i \cdot \sin[2\pi f_1 t] + \bar{b}_i \cdot \sin[2\pi f_0 t]]. \quad (2.31)$$

Detta uttryck ger alltså en informationsbärande FSK-signal $u_{FSK}(t)$ med amplitud A , där värdet hos den binära datavariabeln $b_i \in \{1, 0\}$ avgör vilken frekvens signalen ska ha under en tidsperiod T_b som motsvarar en bitlängd [7].

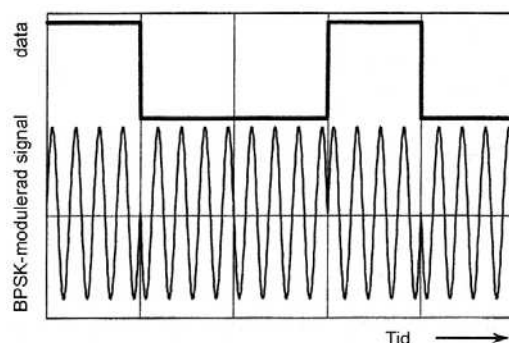
FSK är en minneslös moduleringsstrategi eftersom den i :te sända signalen endast är beroende av den i :te databiten och inte gamla värden. Däremot är FSK-moduleringen olinjär på grund av att den sända signalen inte är en linjär funktion av den databit som ska skickas [42].

FSK-modulering används sedan 80-talet i en del olika applikationer för elnätsskommunikation och är pratiskt fördelaktigt då både sändare och mottagare är relativt enkla att implementera med både analog och digital teknik. En annan fördel hos FSK gentemot amplitudmodulerade system ligger i den större robusthet som FSK uppvisar, då det är vanligare att amplituden hos en signal förvrängs än att frekvensen påverkas. Men elnätet erbjuder i detta avseende en ganska besvärlig miljö även för frekvensmodulerade system och FSK-kommunikationen påverkas negativt av t.ex. signaldämpning och starka smalbandiga störningar i frekvensbandet där informationen överförs [7].

2.1.5.3 Fasmodulering

Om man väljer att varken låta amplituden eller frekvensen hos en sinussignal representera digital information, kan man utnyttja signalens fas $\varphi(t)$ istället. Olika fasvinklar hos en sinusvåg med konstant amplitud och frekvens kan alltså motsvara olika information, och en enkel variant av detta är när binära ettor och nollor motsvaras av sinusvågor med 180° fasskillnad. Denna moduleringsstrategi kallas *BPSK* efter det engelska uttrycket *Binary Phase Shift Keying*, och är en enkel och robust teknik som dock har en något begränsad betydelse inom elnätsskommunikationen, bland annat på grund av svårigheten och kostnaden för fasdetekteringsutrustning vid mottagaränden. I CENELEC-banden finner vi få system som implementerar ren BPSK-modulering [7]. Däremot använder ett av systemen som berörs i detta examensarbete en variant av BPSK där en DSP kan ändra frekvensen hos bärvågen som BPSK-moduleras. BPSK-teknik tillämpas även tillsammans med s.k. PN-kod i spread spectrum-modulering, vilket berörs i kommande avsnitt 2.1.5.4. Därför är det lämpligt att ge en översiktlig förståelse för BPSK, vilket detta avsnitt avser att ge.

Figur 2-29 nedan illustrerar hur den övre rektangulära kurvan motsvarar binär data, som efter BPSK-modulering blir en sinusvåg med olika faser för olika binär data i den nedre kurvan.



Figur 2-29. Dataström och BPSK-modulerad analog representation [7].

Fasen hos den informationsbärande vågen påverkas inte i nämnvärd utsträckning av varken amplitud eller frekvens hos additiva störningar i elnätet, på grund av det stora Euklidiska avståndet mellan den analoga representationen i signalrummet. Däremot kan BPSK-kommunikation bli störd av fasförändringar i elnätet under kommunikationen mellan sändare och mottagare, och även om detta problem inte är så vanligt förekommande så kan det inte helt bortses ifrån [7][22].

Den modulerade BPSK-vågen $u_{BPSK}(t)$ som transmittas från sändaren ges enligt

$$u_{BPSK}(t) = A \cdot \sin[2\pi ft + d(t) \cdot \pi] \quad (2.32)$$

där både signalens amplitud A och frekvens f är konstanta [7]. Den binära information som vågen motsvarar, representeras av dataströmmen $d(t)$ enligt ekvation 2.30.

I likhet med ASK-moduleringen så är BPSK minneslös eftersom den i :te signalen endast är beroende av den i :te databiten, och inga gamla värden. Dessutom är BPSK-moduleringen linjär, eftersom den i :te sända signalen är en linjär funktion den i :te databiten [43].

Observera att BPSK är den enklaste varianten av det vidare begreppet *PSK* (*Phase Shift Keying*), som även inrymmer andra fasmodulerande tekniker som t.ex. *DPSK* (*Differential Phase Shift Keying*) där diskreta datavariabler motsvaras av fasskillnader mellan två efterföljande bitströmmar i bärvågen. Med andra ord är DPSK en moduleringsstrategi med minne [43].

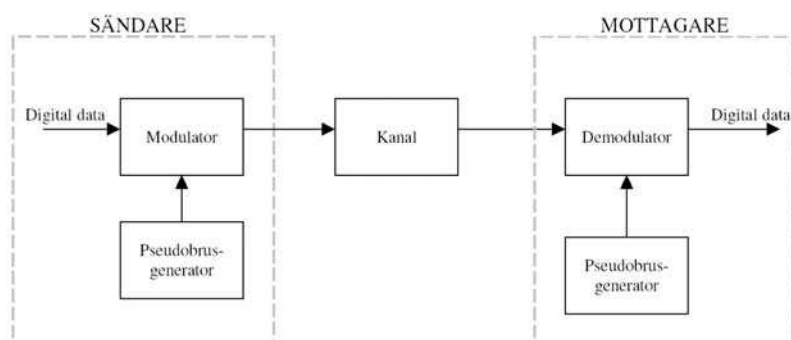
2.1.5.4 Spread Spectrum-modulering

Det är känt att elnätet utgör ett svårt stört kommunikationsmedium, med störningar som är svåra att förutse och kompensera bort. Valet av moduleringsteknik kan därför vara avgörande för hur ett elnätskommunicerande system fungerar, och då de klassiska moduleringsstrategierna uppvisar dålig prestanda i elnätet har man varit tvungna att hitta mer anpassade och störningståliga tekniker. Därför har industrin tagit lärdom från den militära industrin, som har stränga krav på störningstålig och tillförlitlig kommunikation [7].

De moduleringstekniker som den amerikanska armén utvecklat, sprider en bandbegränsad informationsbärande signal över ett större frekvensband samtidigt som spektraltätheten hos signalen sänks. Denna moduleringsprincip kallas *SST* efter det engelska uttrycket *Spread Spectrum Techniques*, och har visat sig användbar för elnätskommunikation tack vare sin

immunitet mot smalbandig interferens och frekvensberoende signaldämpning. Även telekomindustrin utnyttjar spread spectrum-tekniker för mobiltelefoni, som också har att handskas med en oförutsägbar signalmiljö. Dessutom utnyttjar mobiltelefonen spread spectrum-teknikernas möjligheter att tillämpa parallell kommunikation i olika kanaler. Denna multiplexerande utveckling av spread spectrum-teknologin kallas *CDMA* efter engelskans *Code-Division Multiple Access* och används även i system för elnätsskommunikation [24].

Spread spectrum-moduleringen använder en s.k. pseudobrus-kod som är oberoende av det data som skickas, för att generera modulationsvågen som sprider signalenergin över en större bandbredd än informationens bandbredd. Pseudobruset benämns inom kommunikationsteorin *PN* efter det engelska uttrycket *Pseudo Noise*. För att fungerande kommunikation ska kunna upprättas mellan två terminaler, måste moduleringen hos sändaren och demoduleringen hos mottagaren ”sprida” respektive ”samla” signalenergin med identiska PN-koder. Figur 2-30 nedan illustrerar en schematisk modell av ett spread spectrum-system [24].

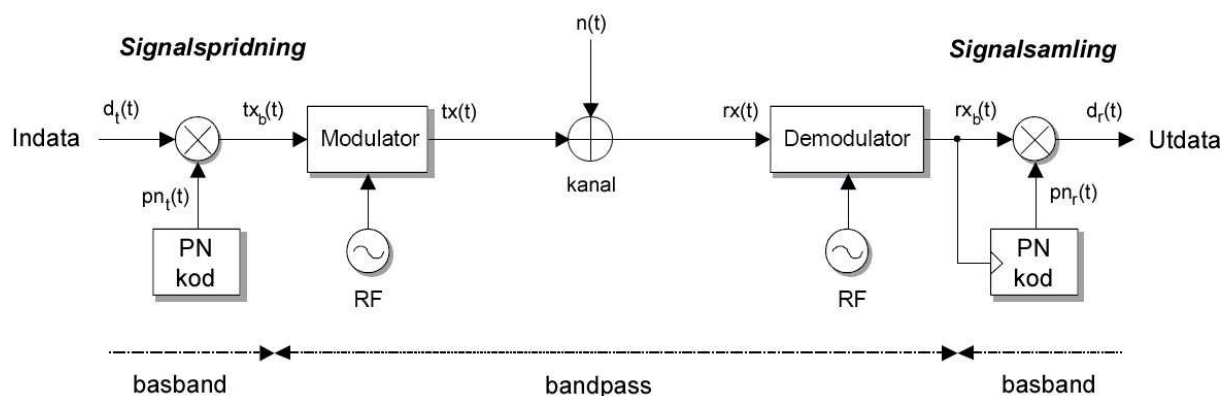


Figur 2-30. Schematisk modell av en spread spectrum-system [24].

Två av de system som utvärderas i detta examensarbete, Senea CustCom och Avalon X-Base från Enermet, tillämpar sin elnätsskommunikation med hjälp av olika spread spectrum-tekniker. Därför avser följande avsnitt att ge en fördjupad kunskap om dessa moduleringsstrategier.

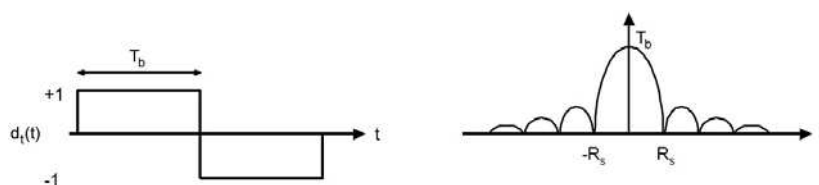
2.1.5.4.1 Direct Sequence Spread Spectrum (DS-SS)

Direct Sequence Spread Spectrum (DS-SS)-tekniken använder vanligtvis en bärvåg som moduleras med den informationsbärande signalen med BPSK-teknik. BPSK-moduleringen sker med hjälp av 0/180-graders fasvinklar som genereras av en PN-sekvens. Det ger ett brett frekvensspektrum kring bärfrekvensen, och den information som ska skickas finns spriden över en större bandbredd. Man går med andra ord från en smalbandig basbandsignal till en bredbandig bandpasssignal [7]. Figur 2-31 nedan visar en schematisk bild över ett DS-SS-system, med sändare, kanal och mottagare.



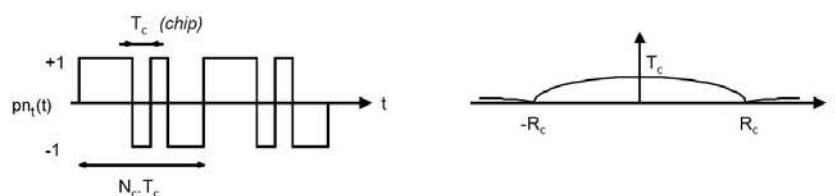
Figur 2-31. Uppbyggnad av ett DS-SS-system [33].

I figur 2-31 ovan ser vi hur binär data $d_t(t)$ med bittakten $R_s = 1/T_b$ och med ett smalt frekvensspektrum motsvarar den information som ska skickas från sändaren. Figur 2-32 nedan visar hur en bitsekvens $d_t(t)$, här antipodalt representerad, kan se ut i tidsplanet respektive frekvensplanet.



Figur 2-32. Bitsekvens i tidsplanet respektive frekvensplanet [33].

Bitsekvensen $d_t(t)$ multipliceras med en PN-sekvens $pn_t(t)$ som är oberoende av den binära datasekvensen och som har takten R_c och ett brett frekvensspektrum, vilket figur 2-33 nedan illustrerar.

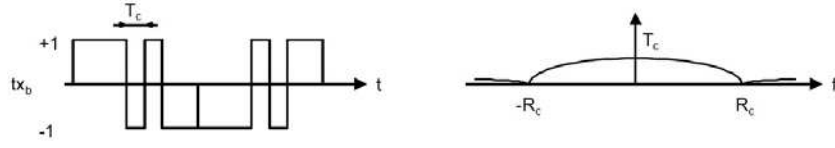


Figur 2-33. PN-sekvens i tidsplanet respektive frekvensplanet [33].

Basbandsignalen $tx_b(t)$ med den information som ska skickas, lämnas därefter över till modulatorens och ges följaktligen enligt:

$$tx_b(t) = d_t(t) \cdot pn_t(t) . \quad (2.33)$$

Denna signal som nu innehåller den binära information som ska skickas, får ett brett frekvensspektrum, vilket figur 2-34 nedan visar.



Figur 2-34. Signalen i tidsplanet respektive frekvensplanet [33].

Effekten av multiplikationen mellan datasekvensen och PN-koden blir alltså en spridning av signalens bandbredd från BW_{info} till BW_{SS} , där

$$BW_{info} \cong R_s \ll BW_{SS} \cong R_c. \quad (2.34)$$

Kommunikationskanalen påverkar generellt signalen med bland annat additivt brus $n(t)$ av smalbandig och/eller bredbandig karaktär. Den hos mottagaren uppfattade signalen $rx(t)$ ges följaktligen av summan av en filtrerad variant av den transmitterade signalen $tx(t)$ och det additiva bruset $n(t)$. Efter demodulering hos mottagaren måste den bandspridda signalen $rx_b(t)$ samlas till ett smalare band igen likt originalsignalen, vilket kan åstadkommas med en ny multiplikation med en exakt kopia $pn_r(t)$ av den PN-sekvens som sändaren använde vid bandspridningen, dvs. $pn_r(t) = pn_t(t)$. Ur detta kan den transmitterade binära informationen återskapas i sekvensen $d_r(t)$ som kan beskrivas enligt följande ekvation:

$$d_r(t) = rx_b(t) \cdot pn_t(t) = d_t(t) \cdot pn_t(t) \cdot pn_t(t) + n(t) \cdot pn_t(t). \quad (2.35)$$

Det framgår i ekvation 2.35 ovan att den binära informationen i $d_t(t)$ multipliceras två gånger med samma PN-sekvens, medan det brus $n(t)$ som påverkat signalen i kanalen endast multipliceras en gång. Här ligger en av de stora förtjänsterna hos DS-SS-tekniken. Då PN-koden är antipodal, dvs. $\{\pm 1\}$, och perfekt synkroniserad hos sändare och mottagare, vet vi att följande gäller:

$$pn_t(t) \cdot pn_t(t) = +1 \quad \forall t \quad (2.36)$$

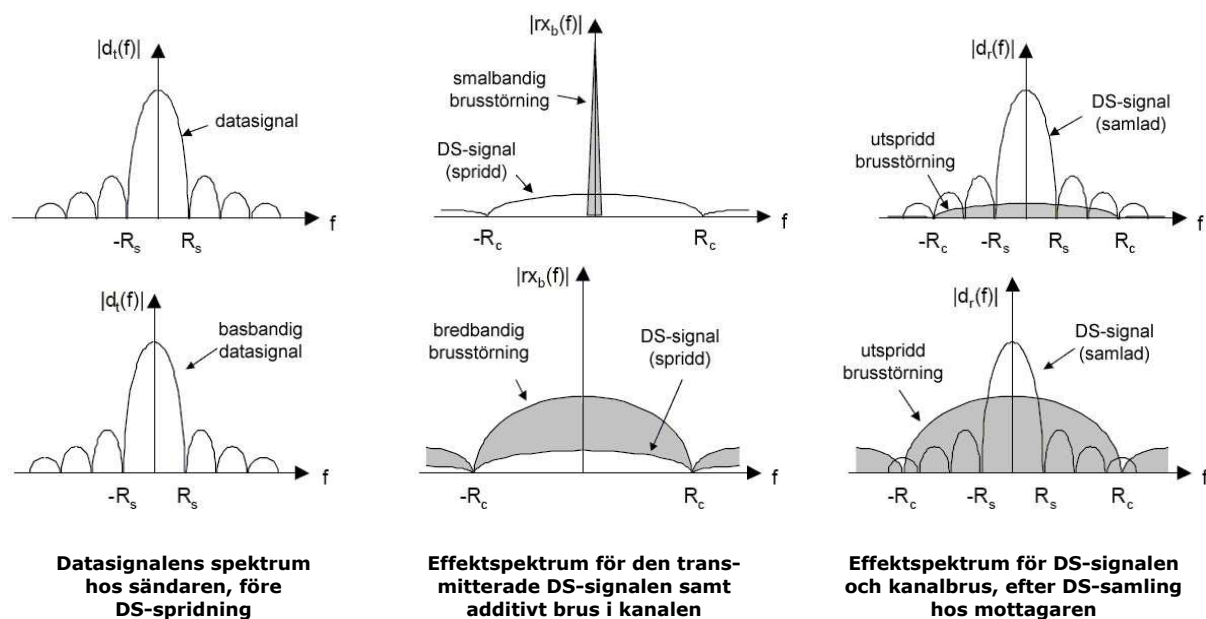
vilket leder till att vi kan förenkla uttrycket i ekvation 2.35 enligt:

$$d_r(t) = d_t(t) + n(t) \cdot pn_t(t). \quad (2.37)$$

Den återskapade datasekvensen $d_r(t)$ hos mottagaren består alltså av originaldatan i $d_t(t)$ samt en additiv term som representerar bruset i kanalen. I denna additiva brusterm ser vi att kanalbruset multipliceras med PN-sekvensen, vilket innebär att koden sprider brusets effektspektrum precis som den gjorde med informationen hos sändaren. Brusets bandbredd ökar samtidigt som effekttätheten minskar. Genom att använda ett lågpasfilter som filtrerar ut det smalbandiga informationsbärande frekvensbandet hos $d_r(t)$ får vi bort det mesta av bruset från kanalen, och den binära informationen kan återskapas hos mottagaren. Brusets inverkan hos den filtrerade signalen har efter lågpasfiltreringen reducerats med en faktor G_p , som ges enligt:

$$G_p = \frac{BW_{SS}}{BW_{info}} = \frac{R_c}{R_s} = \frac{T_b}{T_c}. \quad (2.38)$$

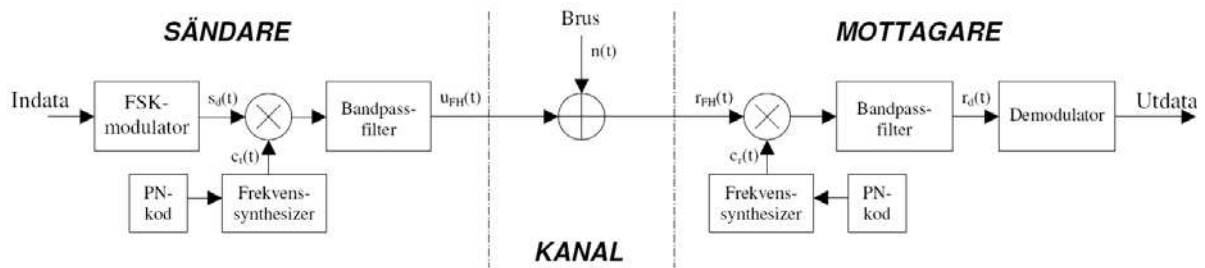
Fördelarna hos DS-SS-tekniken ser vi framförallt då den informationsbärande signalen påverkas av smalbandigt brus i kanalen, eftersom detta blir utspritt över ett bredare spektrum och får lägre effekttäthet hos mottagaren. Bredbandigt additivt brus i kanalen kan däremot inte spridas så mycket av mottagarens PN-kod, vilket gör att DS-SS-tekniken inte ger någon förbättrad hantering eller möjlighet att filtrera detta brus jämfört med att skicka den smalbandiga informationssignalen direkt utan att sprida dess spektrum hos sändaren [33]. Figur 2-35 nedan illustrerar detta.



Figur 2-35. Effekten av smalbandigt respektive bredbandigt additivt brus hos DS-SS-system [33].

2.1.5.4.2 Frequency Hopping Spread Spectrum (FH-SS)

Frequency Hopping Spread Spectrum (FH-SS)-tekniken använder vanligtvis en bärvåg som modulerar den informationsbärande signalen med FSK-teknik. FH-SS använder precis som DS-SS-tekniken en PN-sekvens som genereras lokalt vid sändarens modulering och mottagarens demodulering, men till skillnad från DS-SS så används PN-sekvensen $pn_i(t)$ för att skifta den informationsbärande FSK-frekvensen kring bärvågsfrekvensen. PN-sekvensen multipliceras aldrig till signalen likt DS-SS, utan används för att slumpa fram en adress i en frekvenstabell med olika bärfrekvenser f_i , som sedan genereras i en frekvenssynthesizer och ger bärvågen $c_i(t)$. PN-sekvensen genererar alltså hoppande bärfrekvenser hos den transmitterade signalen, och kring den aktuella bärfrekvensen används FSK för signalering. Figur 2-36 nedan visar en enkel modell för uppbyggnaden av ett FH-SS-system [7][24].

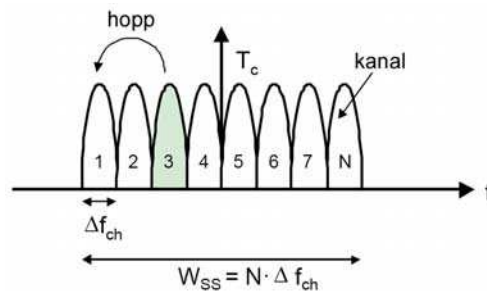


Figur 2-36. Blockschemat över ett FH-SS-system [24].

Den sända FH-SS-signalen $u_{FH}(t)$ beskrivs med amplitud A , informationsbärande frekvens f_i och hoppintervall T_c enligt:

$$u_{FH}(t) = A \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T_c}\right) \cdot \sin[2\pi f_i t]. \quad (2.39)$$

Hoppen mellan olika bärfrekvenser hos signalen sker med takten/chipfrekvensen R_c och symboltakten hos det data som ska sändas betecknas R_s . FH-SS delar in den tillgängliga bandbredden i N kanaler utan överlappningar, och hoppar kontinuerligt mellan dessa enligt PN-sekvensen. Bandbredden hos den enskilda signalen ökar alltså inte i och med FH-SS, men de N kanalerna bildar tillsammans ett spektrum med större bandbredd. Man kan säga att tekniken är momentant smalbandig men genomsnittligt bredbandig, och den totala bandbredden W_{ss} ges av den lägsta respektive högsta hopp-positionen och bandbredden per hopp Δf_{ch} . Figur 2-37 nedan visar hur frekvensspektrumet hos en FH-SS-modulerad signal ser ut med N kanaler. Jämfört med DS-SS kan FH-SS använda ett betydligt bredare frekvensband W_{ss} , eftersom antalet kanaler N kan varieras.



Figur 2-37. Frekvensspektrum hos en FH-SS-signal [33].

För att fungerande kommunikation ska kunna upprätthållas är det naturligtvis nödvändigt att sändaren och mottagaren följer samma hoppmönster, dvs. använder exakta kopior av PN-sekvensen vid modulering respektive demodulering. Eftersom hoppen mellan olika frekvenser generellt leder till fasdiskontinuitet krävs dessutom att demoduleringen hos mottagaren är icke-koherent [24].

Man skiljer mellan två typer av FH-SS: långsam FH-SS respektive snabb FH-SS. Vid långsam FH-SS innehåller varje hoppintervall T_c minst en symbol/bit, dvs. $R_c \leq 1/T_s$. För att få bättre tolerans mot brusstörningar vid en frekvens, repeteras samma transmitterade data vid flera olika frekvensband. Nackdelen med FH-SS vid kommunikation i medium som t.ex.

elnätet, är att faser hos den mottagna signalen tenderar att variera med hoppintervallen T_c , vilket kan leda till stora svårigheter att hitta autokorrelationsmaximum vid detekteringen av data hos mottagaren. Därför är snabb FH-SS-modulering att föredra vid elnätskommunikation [33].

Vid snabb FH-SS hinner signalen hoppa mellan olika band för varje informationsbit. En informationsbit kommer därmed att återfinnas vid flera olika frekvenser. Detta ökar teknikens immunitet mot smalbandigt brus som stör en informationsbit vid en frekvens, men kanske inte vid nästa dit signalen hoppar. Hopptakten R_c mellan olika frekvenser är alltid en heltalsmultipel av data takten R_s vid snabb FH-SS [33].

FH-SS är en klassisk spread spectrum-metod som har en stor betydelse inom dagens och framtidens elnätskommunicerande system. Tack vare sina hopp mellan olika bärfrekvenser, framstår FH-SS-signalerna som näst intill stokastiska och får brusliknande karaktäristik. Just denna egenskap intresserar militärindustrin, eftersom signalerna på grund av sitt brusliknande utseende blir svåra att upptäcka för oönskad/fientlig avlyssning. Dessutom är tekniken okänslig för smalbandiga störsignaler som fienden kan tänkas sända, eftersom man sprider sin information över flera frekvenser [7].

2.2 Beskrivning av de olika systemen

I detta avsnitt beskrivs, på en detaljerad teoretisk nivå, de tre systemen som studeras inom ramarna för detta examensarbete (Turtle, Senea CustCom och Avalon X-Base från Enermet). Systemen benämns i följande avsnitt *Turtle*, *Senea* respektive *Enermet*. Systemen är elnätskommunicerande och har till syfte att via elnätet regelbundet överföra information om enskilda elabonnenters energikonsumtion. Samlingsnamnet för denna typ av system är *AMR* efter det engelska uttrycket *Automatic Meter Reading*.

2.2.1 Generell beskrivning av elnätskommunicerande AMR-system

De tre elnätskommunicerande mätaravläsningsystemen som studeras i detta examensarbete är i princip uppbyggda på samma sätt. För att utgå från den kommunikationsteoretiska uppbyggnaden hos systemen, så har de analoga sändare och mottagare som skickar respektive tar emot analogt modulerad digital information över elnätet.

Ett av systemen (Turtle) tillämpar bara informationsöverföring i en riktning, dvs. sändaren skickar data till mottagaren men kan inte ta emot information eller anrop från mottagaren. Mottagaren kan bara ta emot signaler och själv inte sända. Detta åskådliggörs med heldragna pilar i figur 2-38 nedan. De två andra systemen (Senea och Enermet) har dubbelriktad kommunikation, dvs. varje nod i systemet kan både sända och ta emot information, vilket illustreras med heldragna och streckade pilar i figur 2-38 nedan.

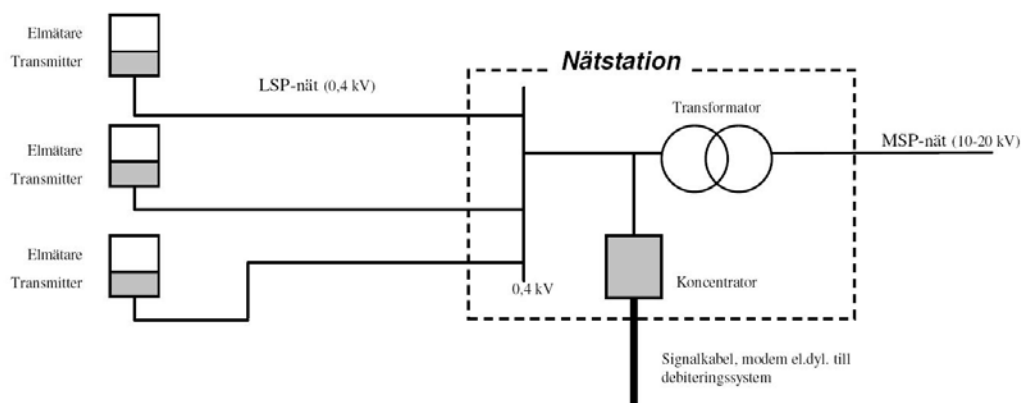


Figur 2-38. Kommunikationsteoretisk modell av elnätskommunicerande AMR-system, med enkelriktad respektive dubbelriktad kommunikation.

Sändaren hos de tre elnätskommunicerande systemen sitter i anslutning till elmätaren hos varje elkund och benämns i fortsättningen *transmitter*. Transmittern utgör alltså den utrustning som sänder analoga signaler med elmätarens mätarställning från kunden. Elmätaren är en separat enhet som bara har till uppgift att registrera energiförbrukningen i en anläggning, men den har också en så kallad *SO-anslutning* till transmittern där den skickar elektroniska pulser i takt med energiförbrukningen. Dessa pulser översätts i transmittern till digitala värden av energiförbrukningen/mätarställningen, och moduleras till en analog vågform som transmitteras ut i elnätet.

Den analoga informationsbärande signalen propagerar från transmittern mot effektriktningen genom lågspänningsnätet till den nätstation som anläggningen är ansluten till. Där sitter mottagaren, dvs. den utrustning som samlar in de informationsbärande signalerna från underliggande transmittar. Denna terminal kallas fortsättningsvis *koncentrator* och den samlar alla mätarställningar/förbrukningsvärden från elkunderna som är anslutna till denna nätstation. Här finns det en viktig skillnad mellan de tre systemen i detta examensarbete. Medan Senea- och Enermet-systemen bara tillämpar sin elnätskommunikation i lågspänningsnätet och har sin koncentrator i en nätstation, kan Turtle-systemet även signalera genom låg-/mellanspänningstransformatörer och upp i mellanspänningsnätet, vilket medför att koncentratorterminalen kan placeras i fördelningsstationer högre upp i elnätstopologin.

Den mätarställnings-/elförbrukningsdata som koncentratorn tar emot från sina underliggande transmittar sparas lokalt. För att överföra alla mätdata från koncentratorn till elnätbolagets centrala debiteringssystem, i fortsättningen benämnt *centralsystem*, måste extern kommunikation från koncentratorn kunna ske med regelbundna intervall, god säkerhet och hög överföringskapacitet. Vanligtvis finns möjlighet att ansluta koncentratorn till olika kommunikationsmedel, och de klassiska i sammanhanget är modem, signalkabel eller GSM/GPRS-telefoni.



Figur 2-39. Skiss över elnätskommunicerande AMR-system på LSP-nätet.

Figur 2-39 ovan visar en generell schematisk skiss över ett koncentratorområde/delsystem i ett elnätskommunicerande AMR-system. I just detta exempel ser vi att elnätskommunikationen enbart sker mellan transmittar och koncentratorn i lågspänningsnätet, vilket är fallet hos Senea- och Enermet-systemen där koncentratorpunkten sitter i en nätstation. Som nämnts ovan kan Turtle-systemets koncentrator sitta högre upp i

nätet, i en fördelningsstation. Mer detaljerade beskrivningar av de olika systemen följer i kommande avsnitt.

2.2.2 Turtle

Turtle är ett AMR-system som utvecklats av Hunt Technologies i USA. Uppfinnaren Paul Hunt lyssnade under det tidiga 1990-talet på de amerikanska elnätbolagens missnöje med de befintliga AMR-systemen, och utgick vid sitt utvecklande av Turtle ifrån kraven på ett driftsäkert system som klarar av att överföra information i elnätet trots den besvärliga signalmiljön som elnätet erbjuder. I rak motsats med andra system som har stor bandbredd och hög överföringskapacitet, utnyttjar Turtle fördelarna i att använda långsam kommunikation med väldigt smal bandbredd [18]. Kraven som ställs på AMR-systemen för hushållskunder i Sverige är att de ska registrera anläggningens mätarställningsdata var 30:e dag. Höghastighetskommunikation är därför onödigt i detta sammanhang.

2.2.2.1 Ultra Narrow Bandwidth-teknologi

Den lågfrekventa och smalbandiga kommunikationsstrategi som Turtle utnyttjar benämns *UNB* efter engelskans *Ultra Narrow Bandwidth*. Eftersom bredbandiga signaler kräver högre sändareffekt för att övervinna brus och smalbandiga störningar, innebär UNB-konceptet reducerad sändareffekt från transmittern samt möjligheten att tillverka utrustningen med mindre och billigare komponenter. Tabell 2-4 nedan belyser och jämför sändareffektens bandbreddsberoende.

Typ av kommunikation	Bandbredd [kHz]	Sändareffekt [W]
Television	6000	200 000
Radio	60	2000
Telefoni	3	100
UNB	0,000001	0,0003

Tabell 2-4. Bandbredd och sändareffekt hos olika kommunikationssystem [18].

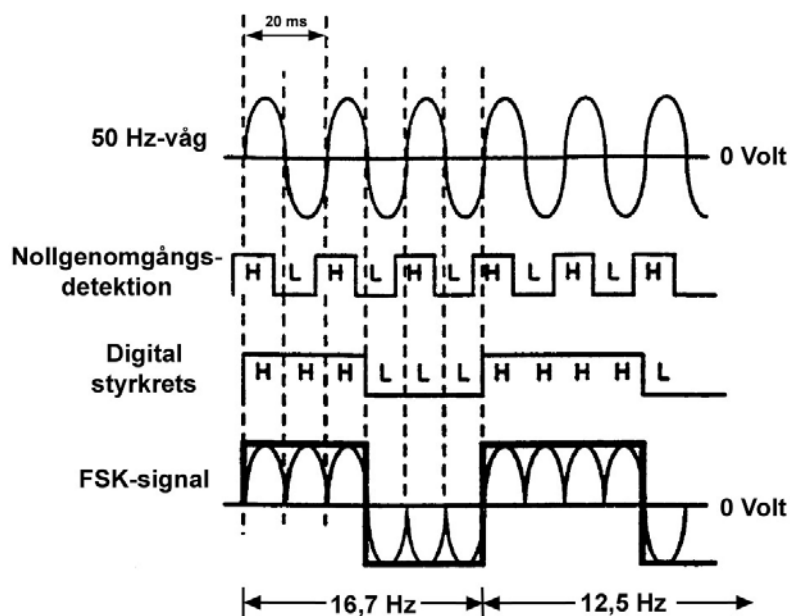
Turtle-systemets UNB-tillämpning består av 3000 st individuella kanaler i bandet 5–9,5 Hz. Varje kanal har bandbredden 1,5 mHz och består i sin tur av tre egna frekvensband med 0,25 mHz mellanrum. Det innebär alltså att sammanlagt 9000 st individuella frekvensband ryms i inom ett intervall på 4,5 Hz, vilket ger det mycket täta frekvensspektrum som är karaktäristiskt för UNB-teknologin [18][37].

2.2.2.2 Turtle-transmittern

Turtle-transmittern sitter monterad intill elmätaren vid en kundanläggning. Genom en S0-anslutning från elmätaren får transmittern elektroniska pulser i takt med mätarens registrerade elförbrukning. Med hjälp av dessa pulser kan transmittern kontinuerligt räkna upp mätarställningen i anläggningen. Transmittern ansluts till en av de matande faserna i anläggningen, på vilken den sedan sänder mätarställning över elnätet till koncentratorn.

En kondensator i Turtle-transmittern genererar bärvågen som den lågfrekventa UNB-signalen blandas upp med [21]. Denna bärvåg har dubbla nätfrekvensen, dvs. 100 Hz, och den transmitterade informationen hamnar spegelvänd kring denna frekvens i sidband vid 90,5–95 respektive 105–109,5 Hz.

Transmitterns kondensator används även för att generera de informationsbärande UNB-frekvenserna, i intervallet 5–9,5 Hz. En digital styrkrets hos transmittern kan styra vid vilken nollgenomgång hos AC-vågen (50 Hz), som kondensatorn ska laddas upp respektive ur. Detta illustreras i figur 2-40 nedan. Styrkretsen kan alltså genom att skifta polaritet hos spänningsurladdningen från kondensatorn, skapa vad som kan liknas vid en fyrkantsvåg, där positiv nollgenomgångsladdning motsvarar H (hög/1:a) och negativ nollgenomgångsladdning motsvarar L (låg/0:a) [21]. Denna fyrkantsvåg, den nedre kurvan i figur 2-40 nedan, används som den informationsbärande FSK-signalen vars frekvens motsvarar binär information. Vågen får periodtiden T och en låg frekvens (5–9,5 Hz), beroende på hur många höga/låga perioder som går under en fyrkantsperiod [19].



Figur 2-40. Turtle-transmitterns generering av FSK-signal med bestämd frekvens.[19]

Med hjälp av denna teknik kan man generera 9000 st individuella frekvensband i intervallet 5–9,5 Hz. Frekvensbanden delas därefter upp i 3000 st grupper om tre, vars sammanlagda bandbredd är 1,5 mHz och med ett mellanrum på 0,25 mHz mellan varje frekvensband [19]. Dessa tre frekvenser motsvarar varsin digital information enligt:

$$\begin{aligned} f_1 &\rightarrow 1 \\ f_2 &\rightarrow 0 \\ f_3 &\rightarrow \text{synk} \end{aligned} \tag{2.40}$$

och utgör en kanal som blir unik för varje Turtle-transmitter under en koncentrator. Moduleringstekniken som Turtle tillämpar är följaktligen FSK, eftersom varje transmitter har

tre unika frekvenser som motsvarar varsitt digitalt informationsinnehåll. Om t.ex. en binär 1:a ska skickas så sänder Turtle-transmittern en konstant ton med enbart den frekvens som motsvarar 1, medan de andra frekvenserna är ”tysta”. Den informationsbärande frekvensen f_i i kanal j ges av:

$$f_{i,j} \quad \text{där} \quad i \in \{1,2,3\} \quad \text{och} \quad j \in \{1,...,3000\} \quad (2.41)$$

och den informationsbärande FSK-signalen $s_{i,j}(t)$ kan beskrivas som en ren sinusvåg med enhetsamplitud och utan fasförskjutning, enligt:

$$s_{i,j}(t) = \sin(2\pi f_{i,j} t). \quad (2.42)$$

Denna informationsbärande, modulerade signal med den specifika FSK-frekvensen $f_{i,j}$, multipliceras innan transmissionen ut i elnätet med bärvågen $c(t)$, dvs. en sinusvåg med frekvens 100 Hz. I avsnitt 2.1.5 ovan såg vi att en sådan bärvågsmultiplikation leder till att frekvensbandet innehållande information flyttas (upp) till ett annat frekvensband kring bärvågens frekvens f_c . I förevarande fall, där bärfrekvensen är 100 Hz, fås följande bandpass-signal $u_{i,j}(t)$ som skickas från Turtle-transmittern:

$$u_{i,j}(t) = s_{i,j}(t) \cdot c(t) = \sin[2\pi(100 - f_{i,j})t] + \sin[2\pi(100 + f_{i,j})t] \quad (2.43)$$

Genom denna multiplikation så flyttar man alltså upp frekvensinnehållet till band som är spegelvända kring bärfrekvensen 100 Hz. Signalfrekvenserna i bandet 5–9,5 Hz hamnar nu alltså i sidbanden 105–109,5 Hz och 90,5–95 Hz, och den informationsbärande frekvensen hos den transmitterade signalen blir $f_{u,j}$ enligt:

$$f_{u,j} = 100 \pm f_{i,j} . \quad (2.44)$$

Det är alltså denna signal $u_{i,j}(t)$, där den informationsbärande frekvensen $f_{u,j}$ ligger i frekvensbanden kring 100 Hz, som skickas från Turtle-transmittern, ut i elnätet [21]. Signalen propagerar mot effektriktningen genom lågspänningsnätet till närmaste nätstation, där den endera avslutar sin färd i en koncentrator, eller passerar genom transformatorn och fortsätter ut i mellanspänningsnätet till en koncentrator i matande fördelningsstation.

Sändningen från Turtle-transmittern pågår hela tiden då den är spänningssatt. Beroende på vilken information man väljer att låta transmittern sända, tar sändningen av en mätarställning olika lång tid. Tiden att sända en bit är konstant 40 minuter, så antalet bitar i informationspaketet avgör den totala sändningstiden. Så snart den sista biten i en mätarställning blivit skickad påbörjas nästa sändning av den aktuella mätarställningen vid denna tidpunkt. Avsnitt 2.2.2.4 nedan ger en mer detaljerad beskrivning av uppbyggnaden av informationspaket med mätarställningsdata [21][34][37].

2.2.2.3 Turtle-koncentratorn

För att samla in och tolka den information som alla transmittrar sänder på elnätet, behövs en koncentrator. Turtle-koncentratorn placeras lämpligtvis i den fördelningsstation som matar området som har Turtle-anläggningar, och den ansluts endera till inkommande

transformatorfack eller enskilda utgående fack beroende på lastförhållanden och antalet installerade transmittar.

Koncentratorn har en uppsättning med så kallade mottagarkort, som associeras med varsin fas och kan hantera 480 Turtle-transmittar vardera. Sammanlagt kan alltså varje koncentrator hantera 1440 olika transmittar. I korten finns även minnesfunktioner som lagrar 30 st mätarställningar från varje transmitt [35].

För att förse mottagarkorten i koncentratorn med ström som innehåller de Turtle-signaler som skickats över nätet, används strömtransformatorer (CT). En CT ansluts runt vardera fasledare på en mätslinga från sekundärsidan på inkommande eller utgående facks egna strömtransformatorer. Strömstyrkan i dessa mätslingor bör vara 1–5 A och varje CT ”avlyssnar” strömmen som passerar genom den. Strömmen konverteras ner till tillräckligt låga nivåer för att passa mottagarkorten. Man kan använda flera uppsättningar av CT som ”avlyssnar” olika utgående fack, och ansluta dem gemensamt till koncentratorn. Den rekommenderade övre lastgränsen som strömtångerna kan ”avlyssna”, för att inte reducera möjligheten för koncentratorn att detektera rätt information i nätet, är 10 MVA [36].

Det finns olika sätt att ansluta en CT-uppsättning till mätslingorna. Standardanslutningen är att låta varje fas, L1, L2 och L3, passera genom varsin CT med samma strömriktning. Alternativt kan man låta fasledarna passera två varv genom strömtången, vilket förstärker den utgående strömmen, men även bruset, som går in i koncentratorn. En annan CT-anslutning som kan reducera brusstörningar är den s.k. *kompenserade CT-anslutningen*. Denna anslutningsmetod innebär att varje mätslinga passerar genom två CT, med olika strömriktning, på följande sätt: +L1–L2, +L2–L3, +L3–L1. En fjärde CT-anslutning, som används i fack där bara mätslingor för två faser finns, innebär att L1 leds genom CT1, L2 leds genom CT2 och både L1 och L2 leds genom CT3 men i motsatt riktning. Denna metod benämns i kommande avsnitt *2-fasanslutning* [36].

Den nedkonverterade strömmen $I(t)$ från strömtångerna blir insignal till koncentratorns mottagarkort. Mottagaren blandar ner insignalen med bärvågen för att få dess information på basband-form istället för bandpassform, varpå denna signal lågpasfiltreras och samplas med samplingsfrekvensen 60 Hz. Efter denna behandling erhålls en signal $I_I(t)$ vars FSK-modulerade data ligger i frekvensbandet 5–9,5 Hz [21].

Signalen $I_I(t)$ innehåller en mängd frekvenser och brus upp till 30 Hz, och för att detektera de olika Turtle-frekvenserna tillämpas en mängd integreringar parallellt. Mottagarens DSP utför dessa beräkningar. Rent matematiskt bygger denna detekteringsmetod på att I- respektive Q-kanalen hos den uppmätta och nedblandade basband-signalens $I_I(t)$ multipliceras med vågen $\sin(2\pi f_x t)$ där f_x är en sökt frekvens. Hela tiden integrerar man alltså produkten av den inkommande signalens I- och Q-komponenter och denna sinusterm där f_x tillhör mängden om de 9000 möjliga frekvenserna under varje mottagare. Dessa 9000 integreringar F_x pågår parallellt över en tid om 40 minuter och ges enligt:

$$F_x = \int_{t=0}^{40 \text{ min}} I_I(t) \cdot \sin(2\pi f_x t) dt. \quad (2.45)$$

För att koncentratorn ska kunna detektera vilka frekvenser f_x som skickats, ser man om integralen F_x för frekvensen f_x är linjärt växande under en tidsperiod. Om frekvensen f_x finns i

den ström som mottagaren tar emot, så är integralen F_x konstant växande under 40 minuter. Alla intilliggande frekvenser $f_{x+\Delta}$ kommer att ge en integral som förr eller senare viker av och blir avtagande, eftersom frekvenserna inte kommer i exakt fas. Frekvensinnehåll som ligger väldigt nära frekvensen f_x men ändå inte har exakt rätt frekvens, kommer att ge en växande integral en stund, för att senare vika av neråt när frekvenserna kommer i ofas. För att säkerställa att endast rätt frekvenser känns igen hos mottagaren, så låter man integrera över en 40 minuters tidsperiod. När integralen F_x når en viss gränsnivå så godkänner mottagaren att det är frekvens f_x som mottagits [21].

2.2.2.4 Informationspaket

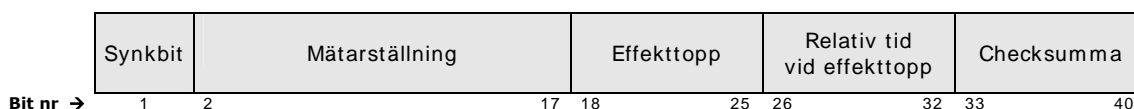
Den information som skickas från Turtle-transmittern till koncentratorn är delvis valbar och följande alternativ står till buds:

- mätarställning i kWh, tidstämplad
- effekttopp i kW, med/utan tidstämpel
- registrering av spänningsdippar
- antal strömavbrott sedan senaste informationspaketet.

Av dessa alternativ har Falu Elnät valt att låta transmittern skicka tidstämplad mätarställning samt tidstämplad effekttopp. Det ger ett informationspaket bestående av sammanlagt 40 bitar, som är fördelade enligt följande:

- synk-bit mellan varje informationspaket
- mätarställning (2 byte/16 bitar)
- effekttopp
- relativ tid vid effekttopp
- checksumma (1 byte/8 bitar).

Figur 2-41 nedan illustrerar uppbyggnaden av ett informationspaket bestående av 40 bitar. Med detta alternativ tar sändningen av data från transmitter till koncentratorn sammanlagt 26 timmar och 40 minuter.



Figur 2-41. Uppbyggnad hos ett informationspaket i Turtle-systemet.

Eftersom koncentratorn inte kan sända information till transmitterna kan den heller inte administrera synkronisering av informationsöverföringen över elnätet. För att hålla reda på när ett informationspaket inleds eller avslutas, låter man transmittern sända en synksignal i inledningen av varje nytt informationspaket. Synkbiten motsvaras av en egen frekvens i Turtle-transmitterns 3-band. Med hjälp av denna synkroniseringsmetod kan alla Turtle-transmittrar kommunicera med en koncentrator parallellt, men de behöver inte vara synkroniserade sinsemellan eftersom koncentratorn hanterar synkroniseringen av varje transmitter individuellt.

Mätarställningen skickas från Turtle-transmittern binärt representerad med 16 bitar. Tidstämplingen för denna mätarställning behöver inte skickas från transmittern, utan den sker hos koncentratorn.

Effekttoppen skickas binärt representerad och tidstämplad. Denna tidstämpling sker genom att Turtle-transmittern var 5:e minut beräknar den aktuella lasten i anläggningen, och sparar det hittills högsta värdet, tillsammans med en relativ tidpunkt för denna topp. Den relativa tidpunkten kan sedan skickas binärt till koncentratorn, som tack vare synksignalen kan översätta denna tidpunkt till ett faktiskt klockslag.

Turtle-transmittern skickar även en 8-bitars checksumma till koncentratorn. Baserat på en algoritm beräknar transmittern och koncentratorn fram en summa från det skickade/mottagna informationspaketet, och denna checksumma ska då överensstämma hos både transmittern och koncentratorn för att informationen ska anses vara rätt. Transmittern skickar sin checksumma till koncentratorn, så att koncentratorn kan jämföra sin beräknade summa med transmitterns [21].

2.2.3 Seneca CustCom

Seneca CustCom-systemet tillämpar elnätssamfund i lågspänningsnätet, mellan en transmitter som sitter hos elkunden och koncentratorn som sitter i den matande nätstationen. Elnätssamfundningen, som sker i CENELEC's A-band dvs. 9–95 kHz, bygger på en speciellt anpassad frekvenshoppande moduleringssteknik. Genom att sända data kring smala frekvensband och låta dessa band hoppa mellan olika frekvenser, kan man förebygga problem i form av brusstörningar och signaldämpning [41].

Seneca-systemets överföringshastighet genom elnätet är konfigurerbar mellan 0,3–3,2 kbit/s, vilket medför att det går relativt snabbt för koncentratorn att hämta en mätarställning från en transmitter. Beroende på antalet anslutna transmittorer under en koncentrator, kan det finnas möjlighet att samla in mätarställningsdata från alla anslutna transmittorer med en timmes intervall [26]. Denna möjlighet kan utnyttjas av elnätsslag för timvisregistrering av elförbrukning vid kundanläggningar som har en mätarsäkring på mer än 63 A. Hos Falu Elnäts implementation av Seneca-systemet utnyttjas möjligheten för timvisregistrering, eftersom man använder systemet i ett bostadsområde där hela elförbrukningen mäts i nätstationerna, och fastighetsbolagets egna timförbrukning beräknas genom att subtrahera den totala timförbrukningen i stationen med alla lägenheters timförbrukning.

2.2.3.1 ICSS-teknologi

Den speciellt anpassade frekvenshoppande kommunikationsstrategi som Seneca CustCom-terminaler utnyttjar benämns *ICSS* efter engelskans *Integrated Circuit Spread Spectrum* [40]. Tekniken bygger teoretiskt på frekvenshoppande spektrumspridning, FH-SS, men har anpassats för att uppfylla kraven på elnätssamfund i CENELEC's A-band enligt standarden EN 50 065-1 [26]. Vid transmission från Seneca-transmittern eller koncentratorn används hoppande frekvenser i två frekvenspar enligt tabell 2-5 nedan.

	Frekvens 1	Frekvens 2
Par 1	52,381 kHz	66,667 kHz
Par 2	61,905 kHz	76,190 kHz

Tabell 2-5. Frekvenspar för Senea CustCom's ICSS-kommunikation [26].

Frekvenserna i de olika frekvensparen är valda med god marginal för att inte interferera med varandra, och så att dess övertoner inte ska påverka frekvensband där data sänds.

ICSS-tekniken utnyttjar en moduleringsstrategi där individuella datapaket FSK-moduleras och transmitteras med två bärvågor med olika frekvens. Manchesterkod används för att kombinera de två frekvenserna i frekvensparet, så att de tillsammans representerar en binär databit. Till skillnad från "vanlig" FH-SS hoppar inte den transmitterade signalen mellan olika frekvenser enligt en PN-sekvens, utan frekvensbyte sker enbart då kommunikationen störs vid det frekvenspar som är i bruk för tillfället. ICSS-tekniken anpassar alltså sin signalering till det av de två frekvensparen som vid varje tillfälle är minst störst av brus. Denna anpassning sker kontinuerligt och i realtid [16].

2.2.3.2 Senea-transmittern

Senea-transmittern sitter monterad intill elmätaren vid en kundanläggning. Genom en S0-anslutning till elmätaren får transmittern elektroniska pulser i takt med elförbrukningen och med hjälp av dessa pulser kan transmittern kontinuerligt räkna upp elförbrukningen i anläggningen [41]. Transmittern ansluts till en av de matande faserna i anläggningen, på vilken den sedan sänder timvärden av elförbrukningen över elnätet till koncentratorn.

Transmitterns kommunikation med koncentratorn är dubbelriktad, och initieras genom att koncentratorn cykliskt anropar en transmitter i taget. Datahastigheten mellan transmitter och koncentrator är variabel, och hos Falu Elnäts implementation av systemet är den 0,8 kbit/s.

Sändar- och mottagarenheten, som är gemensam för både transmittern och koncentratorn i Senea-systemet, är i huvudsak uppbyggd av följande tre komponenter:

- *Controller.* Controllern är en microprocessor som sköter frekvensstyrningen, feldetekteringsalgoritmer, kommunikationsprotokoll, användargränssnitt samt protokoll för olika lager.
- *Digitalt delsystem.* Det digitala delsystemet genererar klock- och synkroniseringssignaler samt logik för generering av signaler som ska sändas. Dessutom sköts ytterligare filtrering samt detektering av mottagna signaler i detta delsystem, samt gränssnitt gentemot controllern och det analoga delsystemet.
- *Analogt delsystem.* Det analoga delsystemet sköter generering av bärvåg för de signaler som ska skickas, baserat på kontroll- och klocksignaler från det digitala delsystemet. Dessutom sköter detta delsystem filtrering av inkommande signaler, samt AD-omvandling, så att mottagna data kan behandlas och tolkas i det digitala delsystemet.

Dessutom krävs en uppsättning av komponenter för att kunna skapa ett gränssnitt mot ett externt nätverk, såsom elnätet. Nämnvärda komponenter i detta sammanhang är transientskydd, sändarförstärkare, externt bandpassfilter samt en AC-anslutning till elnätet [26].

2.2.3.3 Senea-koncentratorn

För att samla in och tolka den information som alla transmitttrar sänder på elnätet, använder systemet en koncentrator. Senea-koncentratorn placeras vanligtvis i den nätstation som matar området med Senea-anläggningar. Koncentratorn har 3-fasanslutning för att kunna ta emot signaler från sina transmitttrar även vid ett fasavbrott [42].

Koncentratorn använder samma kommunikationsteknik som de anslutna transmitttrarna, dvs. ICSS. Varje koncentrator kan hantera upp till 1000 transmitttrar. Vid informationsutbyte med en transmittter är koncentratorn den initierande parten och agerar alltså Master i Master/Slave-förhållandet. Koncentratorn kommunicerar kontinuerligt med en transmittter åt gången. Beroende på antalet transmitttrar som är anslutna till en koncentrator, datahastigheten och eventuella störningar på nätet, varierar den tid det tar mellan två kommunikationsfaser mellan en viss transmittter och dess koncentrator. Normalt hinner koncentratorn hämta mätarställningsdata från varje transmittter med ca en timmes mellanrum. En styrka som den kontinuerliga pollningen av samtliga transmittters medför hos systemet, är att man kan övervaka elnätet och registrera eventuella störningar.

Senea-koncentratorn speglar statisk information i transmitttern och simulerar transmitttern vid kommunikation med centralsystemet. Detta medför fördelar för centralsystemet, eftersom det blir oväsentligt att veta om kommunikation från centralsystemet sker direkt med transmitttern eller om det är koncentratorn som svarar på anropen. Eftersom centralsystemet aldrig behöver ha direktkontakt med enskilda transmitttrar för att hämta dess mätarställning, räcker det om koncentratorn någon gång då och då får kontakt och lyckas spegla mätarställningen. Men koncentratorn kan även användas som gateway om centralsystemet vill etablera direktkontakt med en transmittter. Denna funktion är bra vid konfigurering av transmitttern eller när centralsystemet vill hämta dynamisk information såsom mätarställningsdata från transmitttern.

Koncentratorn arbetar cykliskt med ett antal olika jobb som utförs i loopar. En sådan arbetscykel kan involvera följande arbetsuppgifter:

- *Poll-jobbet.* Varje transmittter pollas, vilket innebär att ett tomt paket skickas från koncentratorn till ett antal transmitttrar i följd. Vid problemfri kommunikation svarar anropade transmitttrar med ett tomt paket. Andra transmitttrar uppfattar denna konversation och får kännedom om vilka frekvenser och hastigheter koncentratorn arbetar på. Lyckad pollning indikerar problemfri kommunikation.
- *Mätdatainhämtning.* Koncentratorn anropar en transmittter i taget som svarar med att överföra nya mätdata, larmer och konfigureringsdata.
- *Tidssynkronisering.* För att synkronisera klockorna hos transmitttrarna och koncentratorn skickas en ny tidssynkronisering från koncentratorn till samtliga transmitttrar efter 30 minuter.
- *Nya transmitttrar.* Om nya transmitttrar ansluts till ett nätstationsområde som administreras av en viss koncentrator, tilldelas de automatiskt en nätadress och loggas in i koncentratorn.

- *Adresspåminnelse.* Koncentratoren räknar upp vilka transmitttrar som har vilka nätadresser. Skulle en transmitter inte känna igen sin nätadress eller sakna nätadress, anser den sig själv som utloggad och försöker logga in vid nästa tillfälle som koncentratoren söker nya transmitttrar.
- *Larmstatus.* Koncentratoren hämtar aktiva larm från transmitttrarna med ett dygns intervall [26].

2.2.3.4 Felhantering

ICSS-teknikens största förtjänst ligger i dess förmåga att klara av brusstörningar som är bandbegränsade. Däremot är tekniken känslig för impulsbrus som sprids över alla frekvenser under korta tidsperioder, vilket är ett vanligt förekommande problem i elnätsmiljö. För att förebygga dessa störningar och öka säkerheten hos elnätskommunikationen, använder Senea-systemet två tekniker: feldetektering och lagring av ickekorrupt data.

Feldetekteringen består dels av en paritetsbit som adderas till varje byte av data. Sammanlagt skickas alltså nio bitar, varav åtta med data och en för paritetskontroll, från sändare (transmitter/koncentrator) till mottagare (koncentrator/transmitter). Detta ger en möjlighet för den mottagande enheten att upptäcka bitfel hos ett udda antal bitar i en byte.

Feldetekteringsfunktionen utökas dessutom med hjälp av *Cyclic Redundancy Check (CRC)*. En 27-bitars felkod skickas i slutet av varje datapaket och består av tre byte med varsin paritetsbit. De 24 bitarna med data bildar en CRC-24-kod, dvs. en 24-bitars checksumma som beräknas utifrån det datapaket som ska skickas. Samma CRC-algoritm används hos sändare och mottagare för att beräkna checksumman utifrån den data som skickas/tas emot. Om den sända CRC-koden överensstämmer med den lokalt beräknade hos mottagaren, så vet man att det mottagna datapaketet är korrekt [26].

Lagring av ickekorrupt data innebär att delar av datapaket som tagits emot hos en mottagare och som inte är felaktiga, sparas hos mottagaren så att en återsändning bara behöver göras av de korrupta delarna i datapaketet. Hela datapaketet med sparade felfria delar och omsända tidigare felbehäftade delar, sätts sedan ihop hos mottagaren. Det innebär att mängden data som behöver sändas om begränsas, med effektivitetsvinster som följd. Om däremot den första byten i ett datapaket visar sig vara korrupt, måste hela paketet sändas igen, eftersom denna byte innehåller information om paketets längd. Metoden med lagring av ickekorrupt data ger en bra immunitet mot impulsbrus, eftersom en impuls oftast är väldigt kortvarig och maximalt påverkar 1–2 bytes. Då det är osannolikt att samma del av ett datapaket påverkas av impulsbrus vid olika sändningstillfällen, behöver ett datapaket med korrupta delar bara omsändas någon eller några få gånger för att alla delar av paketet ska vara korrekt hos mottagaren [16][26].

2.2.3.5 Repeater

Vid längre avstånd mellan transmitttrar och koncentratorpunkten kan en repeater behövas mellan dessa för att mellanlagra och förstärka signalen längs vägen. Repeatern lyssnar efter informationsbärande signaler i elnätet, detekterar dessa, rengör dem från brus och sänder dem vidare. Det medför att kommunikationshastigheten mellan koncentratoren och transmitttrarna sänks, eftersom koncentratoren ger repeatern tid att träda in. Alla paket som når repeatern

lagras lokalt samtidigt som de skickas vidare, och om repeatern inte får kvittens på att ett paket har kommit fram skickar den paketet igen efter en viss tid. Medan normal kommunikation mellan sändare och mottagare utan repeater sker med *fråga-svar-fråga-svar...*, kan repeaterkommunikation beskrivas av sekvensen *fråga-vänta-repetering-svar-vänta-repetering-fråga-vänta-repetering-svar-vänta-repetering....* Repeaterkommunikationen kräver alltså fyra tidsenheter mer tid för varje utväxling, än normal kommunikation utan repeater [26].

2.2.4 Avalon X-Base från Enermet

Enermet-systemet tillämpar precis som Seneas system elnätskommunikation i lågspänningsnätet, mellan en transmittor som sitter hos elkunden och koncentratorn som sitter i den matande nätstationen. Elnätskommunikationen mellan Enermet-systemets transmittor och koncentratorer följer *Echelon LonWorks* standard och uppfyller kraven för kommunikation i CENELEC's A-band enligt standarden EN 50 065-1 [31].

De transmittor som används i Falu Elnäts implementation av Enermet-systemet har modellbeteckning *ML10* och koncentratorerna benämns *CM3250*. Dessutom används ibland repeaterterminaler för förstärkning av signaler vid långa avstånd mellan transmittorn och koncentratorn. Repeaterterminalerna benämns *ME10* [30].

Idag finns och används två olika tekniska "generationer" av *ML10/CM3250*-terminalerna. Skillnaderna mellan dessa generationer är ganska stora, och handlar om väsentliga teoretiska skillnader i moduleringsstrategin vid signalering över elnätet. De två tekniska lösningarna är därför inte kompatibla med varandra utan kan egentligen ses som två olika system. Det överordnade centrala debiteringssystemet, *Avalon X-Base*, ser emellertid ingen skillnad mellan de olika teknikgenerationerna hos terminalerna i fält. Insamlingen av mätvärden från koncentratorerna berörs inte av moduleringsstrategin hos elnätskommunikationen i systemet, utan sker på samma sätt från nya och gamla *CM3250*-koncentratorer. Hos Falu Elnäts implementation av Enermet-systemet använder ungefär 25 % av terminalerna den äldre generationens teknik, men dessa ersätts successivt av terminaler med elnätsmodem för den nya tekniken.

Koncentratorn och dess underliggande transmittor måste använda modemkomponenter av samma teknikgeneration för att kunna kommunicera med varandra. Dessa modem kan både sända och ta emot data, vilket innebär att elnätskommunikationen mellan Enermet-terminalerna är dubbelriktad. Koncentratorn är den initierande parten vid kommunikation mellan två enheter, alltså Master i Master/Slave-förhållandet. Koncentratorn kommunicerar med en transmittor i taget, något som fortsätter i kontinuerliga cykler med alla anslutna transmittor [30].

Enermet-systemets dataöverföring genom elnätet uppnår en hastighet på mellan 2–3,6 kbit/s, vilket medför att det går relativt snabbt för koncentratorn att hämta en mätarställning från en transmittor [30]. Då varje koncentrator kan hantera mätdata från maximalt 200 elmätare uppstår möjligheten att samla in mätarställningsdata från alla anslutna transmittor med en timmes intervall. Denna möjlighet utnyttjas av elnätsbolag, bland annat Falu Elnät, för timvisavläsning av elförbrukning vid kundanläggningar med mätarsäkring på mer än 63 A.

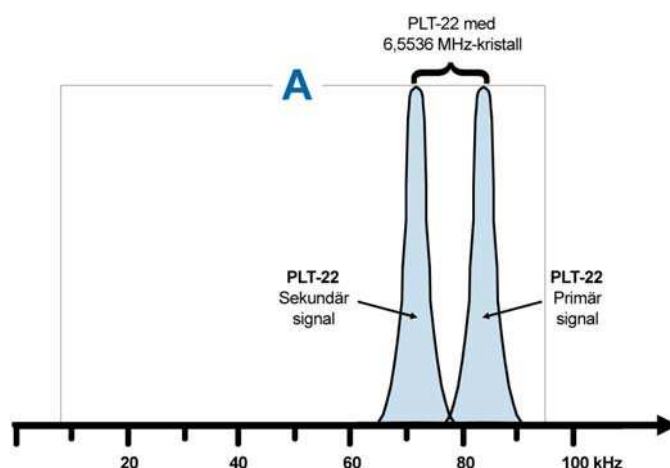
2.2.4.1 Echelonmodemet i Enermet-terminalerna

Den modemkomponent som sköter elnätskommunikationen mellan transmittarar och koncentratorer i Enermet-systemet är framtagen av tillverkaren *Echelon*. Det finns olika modem för elnätskommunikation i olika frekvensband. För elnätbolagens fjärravläsning av elförbrukning används frekvenser i CENELEC's A-band och de Echelon-modem som hanterar kommunikation i detta frekvensband benämns PLT-30 och PLT-22. Utav dessa representerar PLT-30-modemet den äldre teknikgenerationen och PLT-22 är det nyare modemmet [27]. Hos Falu Elnät användes ursprungligen ML10-transmittarar med den äldre PLT-30-kretsen, men idag byts de successivt ut mot transmittarar med det nya PLT-22-modemet. De olika modemkretsarna implementerar skilda kommunikationstekniker, och den nyare PLT-22-kretsen uppvisar något bättre kommunikationskvalitet enligt erfarenheter från Falu Elnät.

2.2.4.1.1 PLT-22-modem

Hos nyttillverkade ML10-transmittarar från Enermet används idag Echelonmodemet PLT-22. Denna krets sköter all signalering över elnätet och följer kommunikationsstandarden LonWorks.

Moduleringstekniken som används för elnätskommunikation till och från PLT-22-modemet är frekvenshoppande BPSK. Det innebär att digital information är BPSK-representerad i den informationsbärande signalen från transmittern, och att signalen kan multipliceras med två olika bärfrekvenser. Dessa frekvensband kallas för de primära respektive sekundära frekvensbanden och har frekvensintervall som är koncentrerade kring 86 kHz respektive 75 kHz enligt figur 2-42 nedan. PLT-22-transmittern börjar alltid sända data till koncentratorn i det primära frekvensbandet. Om sändaren upplever dålig kommunikationskvalitet vid detta frekvensband, börjar den istället sända på det sekundära bandet.



Figur 2-42. Frekvensband för primär respektive sekundär signalering hos PLT-22-modem [27].

De primära och sekundära frekvensbanden kan utnyttjas på olika sätt med hjälp av olika accessprotokoll. Det ena alternativet använder kvittenser (ACK) från mottagaren då ett datapaket tagits emot utan problem. Om transmittern inte får någon ACK från mottagaren

låter den sända samma datapaket igen. Sammanlagt kan transmittern göra tre återsändningar, det vill säga sammanlagt fyra sändningar till mottagaren. Här utnyttjas möjligheterna med ett alternativt frekvensband. Medan den första sändningen och den första återsändningen använder det primära frekvensbandet kring 86 kHz, använder de två sista återsändningarna det sekundära frekvensbandet kring 75 kHz. För god prestanda och liten overhead rekommenderas tre återsändningar från PLT-22-modemet.

Ett alternativt sätt att utnyttja de två frekvensbanden är att använda det primära frekvensbandet för den första sändningen av ett datapaket, och vid avsaknad av ACK från mottagaren återsänds paketet vid det sekundära frekvensbandet. Om ytterligare en återsändning behövs används det primära frekvensbandet igen, och den sista (3:e) återsändningen använder det sekundära frekvensbandet igen. Sammanlagt används alltså maximalt tre återsändningar, där den 1:a och 3:e använder det sekundära frekvensbandet kring 75 kHz och den 2:a återsändningen använder det primära frekvensbandet. Även hos detta sätt att utnyttja två olika frekvensband rekommenderas tre återsändningar från PLT-22-modemet för god prestanda och liten overhead.

Elnätskommunikationen mellan CM3250-koncentratorn och ML10-transmittrar med PLT-22-modem uppnår en hastighet på 3,6 kbit/s. Detta är nästan dubbla hastigheten jämfört med vad det äldre PLT-30-modemet uppnår. Dessutom sägs PLT-22-modemet kunna kommunicera över längre avstånd i elnätet än PLT-30.

I PLT-22-kretsen finns en integrerad DSP som med hjälp av olika algoritmer förbättrar kommunikationsprestandan. DSP:n sköter funktioner som den anpassningsbara bärfrekvens- och datakorrelationen, impulsbrus- och tonkompensering samt felrättning av data med låg overhead-kostnad.

Hjärtat i LonWorks-tekniken och PLT-22-modemet är det så kallade Neuron-chipet, som inrymmer microprocessorer, minne, I/O, kommunikationsportar och operativsystem. Neuron-chipet och PLT-22-kretsen är två skilda kretsar i det som tillsammans bildar PLT-22-modemet. För klocksignal och synkronisering i PLT-22-kretsen används en extern kristall som ger en konstant ton. Hos PLT-22-modem som kommunicerar i CENELEC's A-band används en kristall med frekvensen 6,5536 MHz [27][28].

2.2.4.1.2 PLT-30-modem

Hos äldre ML10-transmittrar och CM3250-koncentratorer från Enermet används Echelonmodemet PLT-30. PLT-30-komponenten sköter all signalering över elnätet och använder precis som PLT-22 kommunikationsstandarden LonWorks.

Skillnaden mellan det nyare PLT-22-modemet och det äldre PLT-30-modemet ligger framförallt i helt olika modulationstekniker. Hos det äldre PLT-30-modemet används modulationstekniken DS-SS, det vill säga spridning av den informationsbärande signalens effektspektrum över ett bredare frekvensband. DS-SS-moduleringens chipfrekvens R_c hos PLT-30-kretsen är 31 chips/bit. Med andra ord blir den transmitterade signalens bandbredd BW_{SS} 31 gånger större än informationens ursprungliga bandbredd BW_{info} , och den mottagna signalens påverkan av additivt smalbandigt brus i kanalen reduceras med faktorn 31 efter lågpassfiltrering.

Elnätskommunikationen mellan CM3250-koncentratorn och ML10-transmittrar med PLT-30-modem uppnår en hastighet på 2 kbit/s, vilket är lägre än det nyare PLT-22-modemet.

Precis som hos PLT-22-modemet är det så kallade Neuron-chipet en vital komponent i PLT-30-modemet med funktioner för minneshantering, I/O-gränssnitt och operativsystem. För klocksignal och synkronisering i PLT-30-kretsen används en extern kristall som ger en konstant ton. Hos PLT-30-modemet används en kristall med frekvensen 10 MHz [27][29].

2.2.4.2 Enermet-transmittern

Hos Falu Elnäts implementation av Enermet-systemet används transmittersmodellen ML10. Transmittern kan anslutas till en eller två elmätare, som överför pulser i takt med elförbrukningen till transmittersns S0-ingångar. Tack vare dessa pulser kan även transmittern beräkna anläggningens elförbrukning, och sända aktuellt timvärde till koncentratorn på förfrågan från denne.

ML10-transmittern kan registrera och spara timvärden av elförbrukningen under upp till 100 dygn. De två pulsingångarna har varsitt serieregister där mätarställningar lagras, och tidsintervallet för att skriva nya data till detta register kan väljas mellan 1 och 60 minuter [31].

Elnätskommunikationen mellan transmittrar och koncentrator hos Enermet-systemet sker endast i lågspänningsnätet, dvs. mellan en kundanläggning och tillhörande nätstation. Ökande impedans och signaldämpning i elledningarnas längdriktning medför normalt en övre gräns på avståndet mellan transmitter och koncentrator på 300–400 meter, för att kommunikationen ska fungera väl.

Transmittern ansluts till alla tre faser vid kundanläggningen, men sänder bara på fas L1. Anledningen till att transmittern är ansluten till alla tre faser trots att den bara sänder på en av dem, är att den kan övervaka de matande faserna och detektera eventuella fasbrott. Vid brott på fas L1 kan transmittern inte börja sända på en av de andra faserna, utan kontakten med koncentratorn bryts.

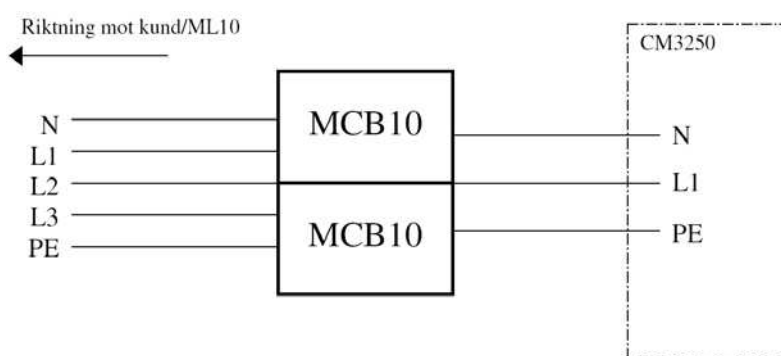
ML10-transmittern kan konfigureras för att sända på en eller två kanaler, beroende på om man har en eller två mätare anslutna till varsin pulsingång. På så sätt kan man överföra de olika anläggningarnas timförbrukning av el på varsin kanal till koncentratorn. Hos Falu Elnäts implementation av Enermet-systemet utnyttjas möjligheten att låta en transmitter hantera två elmätare, genom att mäta och sända förbrukningen av både aktiv och reaktiv effekt vid vissa kundanläggningar. Med andra ord mäts kundanläggningens uttag av aktiv och reaktiv effekt med varsin elmätare, som sedan är kopplad till olika pulsingångar på samma transmitter. Transmittern sänder förbrukningsvärdena hos de två mätarna på varsin kanal över elnätet till koncentratorn [30][31].

2.2.4.3 Enermet-koncentratorn

Hos Falu Elnäts implementation av Enermet-systemet används koncentratorer med modellbeteckning CM3250. En sådan koncentrator sitter vanligtvis installerad i en nätstation och kommunicerar med sina underliggande transmittrar via lågspänningsnätet. ML10-

transmittrarna sänder bara data på fas L1 och i nätstationen ansluts bara fas L1 till CM3250-koncentratorn.

Ofta är faserna omkastade i kabelskåp mellan kundanläggningen och nätstationen, vilket gör det svårt att hålla reda på om fas L1 hos kunden är L1 i andra änden vid nätstationen. Därför används speciella överhörningsboxar med modellbeteckning MCB10 i nätstationen som registrerar signaler från alla tre faserna och samlar dessa till en enda fasledare som ansluts till CM3250-koncentratorn. På så sätt "lyssnar" koncentratorn på alla tre utgående faser från nätstationen, och det spelar ingen roll om faserna är omkastade mellan transmittern och koncentratorn. Figur 2-43 nedan ger en blockschematisk illustration av detta.



Figur 2-43. Energets överhörningsboxar MCB10 och CM3250-koncentratorns anslutning till elnätet [30].

Varje CM3250-koncentrator kan hantera sammanlagt 200 st kanaler. 8 st av dessa kanaler är interna, vilket innebär att en elmätarens pulsutgång kan anslutas direkt till en S0-ingång hos CM3250-koncentratorn. Det medför en möjlighet att samla in mätarställningar från elmätare för t.ex. gatubelysning som sitter i en nätstation, utan att en ML10-transmitter måste användas. CM3250-koncentratorn har 192 st externa kanaler med kapacitet för maximalt 192 st ML10-transmittrar om de använder en kanal vardera, eller 96 st ML10-transmittrar om de, som i Falu Elnäts fall, sänder förbrukningsdata för reaktiv och aktiv effekt på varsin kanal.

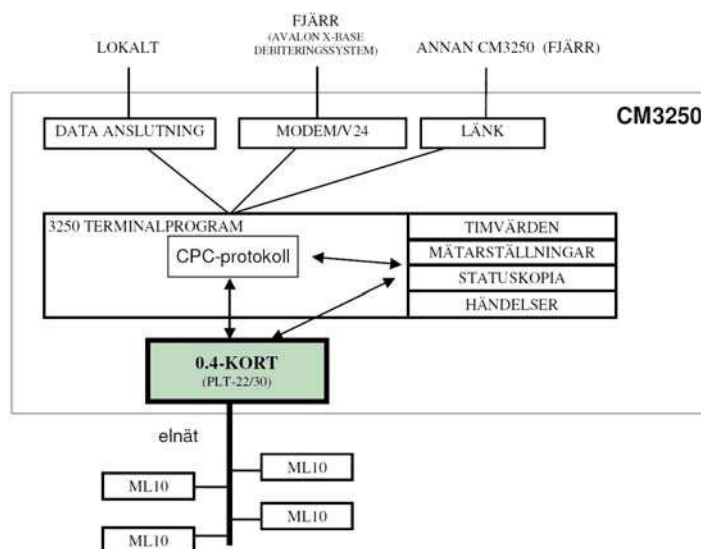
Elnätskommunikationen i Enermet-systemet initieras av koncentratorn, som genom att sända en fråga till en transmitter får ett svar med elförbrukningen hos transmitters anläggning. Timvärden kan visas och avfrågas som ett pågående värde, samt undanlagras varje dag, vecka eller månad i ett register som därefter kan avfrågas.

Alla underliggande ML10-terminaler följer CM3250-koncentratorns klocka. Transmitterarnas tid uppdateras när koncentratorns tid ändras. En gång i timmen synkroniseras samtliga klockor under en koncentrator [39].

Precis som hos ML10-transmittrarna så hanteras elnätskommunikationen till och från CM3250-koncentratorn av modem från tillverkaren Echelon. Dessa modem är identiska med de som sitter i ML10-transmittrarna och har alltså modellbeteckning PLT-22 eller PLT-30 vilka beskrivs ovan. En koncentrator med PLT-22-modem kan endast kommunicera med transmittrar som har likadana modem, och de koncentratorer som har PLT-30-modem kan bara kommunicera med transmittrar med samma modemtyp [39].

2.2.4.4 Felhantering

För att utöka leveranssäkerheten av data i Enermet-systemet används felrättningsalgoritmer och kontinuerlig justering av känsligheten i koncentratorns CPC-protokoll. Hos ML10-transmittern används felrättningsalgoritmer som adderar checksummor till datapaket som ska sändas över elnätet till koncentratorn, vilket ger möjlighet för systemet att jämföra skickad och mottagen data. Dessa felrättningspaket som hängs på datapaketerna utgör 6 % overhead-data. Figur 2-44 nedan illustrerar en blockschematisk representation av Enermet-systemets kommunikationsnivå.



Figur 2-44. Schematisk översikt över CM3250-koncentratorns uppbyggnad [39].

Den av ML10- eller CM3250-terminalerna som agerar mottagare vid elnätskommunikation i Enermet-systemet, tillämpar en kontinuerlig detektering av brusnivån i elnätet. Utifrån uppmätta brusstyrkor anpassar mottagarterminalen kontinuerligt sin samplingskänslighet för att kunna uppfatta den data som skickats. Dessutom används översamplande korrelationsfilter som ger synkronisering av inkommande datapaket hos mottagaren [39].

3 Lösningsmetod

3.1 Modell för urval av mätpunkter

I detta avsnitt beskrivs de metoder som används för att utvärdera de elnätskommunicerande AMR-systemens prestanda i olika områden av elnätet. Metoderna skiljer sig åt i vissa avseenden mellan de olika systemen, varför de beskrivs i olika avsnitt. Vidare beskrivs hur analys av observerad prestanda utgör grund för urval av punkter i elnätet där fysiska mätningar av signalmiljön har genomförts.

3.1.1 Prestandautvärdering av Turtle-systemet

Turtle-systemet är i dagsläget i drift i olika landsbygdsområden utanför centrala Falun, och finns installerat vid tolv olika fördelningsstationer. Följande tabell 3-1 visar de olika fördelningsstationerna hos Falu Elnät där Turtle-systemet finns installerat. Tabellen visar också hur många Turtle-transmittrar som installerats och antalet nätstationer under respektive fördelningsstation, per den 17 mars 2006.

Fördelningstation	Antal nätstationer	Antal Turtle-transmittrar
Bjursås	72	1631
Falu Norra	51	302
Falu Västra	88	65
Grycksbo	37	982
Hosjö	33	668
Källtorp	31	16
Linghed	19	775
Sundborn	55	1423
Svärdsjö	93	1214
Sågmyra	41	863
Tänger	15	566
Vika	69	1030
Summa:	604	9535

Tabell 3-1. Falu Elnäts fördelningsstationer med Turtle-systemet i drift, samt antal nätstationer och Turtle-transmittrar under respektive station, per den 17 mars 2006.

Funktionen hos Falu Elnäts implementation av Turtle-systemet har hittills visat sig vara god. Den erfarenhet man har av stora störningar hos elnätskommunikationen i Turtle-sammanhang kommer framförallt från delsystemet i Källtorp, där intilliggande industrier störde Turtle-signaleringsen i hög grad. Dessa problem kunde emellertid avhjälpas genom att omplacera de strömtänger (CT) som ”avlyssnar” de informationsbärande signalerna till koncentratorn.

För att undersöka prestandan hos Falu Elnäts implementation av Turtle-systemet har systemets programvara för den centrala mätvärdesinsamlingen, *TurtleWare*, använts. Denna programvara erbjuder möjligheter att övervaka de olika koncentratorerna och dess underliggande transmittar. Det finns möjlighet att se historik för enskilda sändare, där man bland annat ser när sändaren har loggat, dvs. överfört korrekta data till sin koncentrator. Programvaran erbjuder även ett antal rapporter som kan vara användbara vid felsökning. En av dessa rapporter listar samtliga Turtle-transmittar som inte loggat under de tre senaste dygnet. Begreppet "logga" innebär att transmittern lyckas överföra korrekta data utan bitfel till koncentratorn. Under normala omständigheter och vid god kvalitet hos elnätskommunikationen från sändaren och koncentratorn, ska varje Turtle-transmitter logga hos koncentratorn var 27:e timme, vilket motsvarar tiden för en sändning av ett paket med mätarställningsdata. Eftersom det centrala systemet samlar in värden från alla koncentratorer var 24:e timme, bör alltså den enskilda transmitterns mätarställning, i värsta fall, uppdateras hos det centrala debiteringssystemet vart annat dygn. Om man observerar att en Turtle-transmitter inte har överfört några nya mätvärdesdata under de tre senaste dygnet, bör detta följaktligen vara en indikation på att elnätskommunikationen kan vara störd eller avbruten.

Men det finns andra tänkbara orsaker till att en koncentrator inte får kontakt med en viss Turtle-transmitter. Erfarenheter visar till exempel att det är vanligt att ägare av fritidshus skruvar ur anläggningens huvudsäkringar då de åker därifrån. Detta medför att hela huset blir strömlöst och ägaren behöver inte vara orolig för att någonting i hans anläggning ska förbruka el under den tid då man inte vistas i huset. Men det medför också att Turtle-transmittern, som sitter framför huvudsäkringarna sett från kundens anläggning, blir strömlös och förlorar kontakten med sin koncentrator. Det centrala debiteringssystemet får således inte in några nya mätarställningsdata från denna kundanläggning, vilket resulterar i att även denna anläggning visas i rapporten för de transmittar som inte loggat de tre senaste dygnet. Detta trots att det inte finns några störningar hos elnätskommunikationen, utan man har ett avbrott på forbindelsen mellan transmitter och koncentrator. Numera installerar man alltid en s.k. *RK* vid alla nya Turtle-transmittar i fritidshus. *RK:n* förbinder Turtle-transmittern med elnätet bakom huvudsäkringarna, vilket medför att den alltid har kontakt med sin koncentrator, även om kunden skruvar ur sina huvudsäkringar.

För att ge en statistisk bild av prestandan hos olika Falu Elnäts implementation av Turtle, har rapporter för de transmittar som inte loggat de senaste tre respektive sju dygnet observerats vid upprepade tillfällen under några månaders tid. Statistisk sammanställning av dessa observationer ger en bild av i vilka delsystem hos Falu Elnäts som Turtle-systemet uppvisar sämst respektive bäst prestanda. Denna statistik utgör senare underlag för val av punkter för fysiska mätningar av signalmiljön. Statistiken syftar även till att visa förändringar i upplevd prestanda före och efter förändringar som görs i systemet under tiden för detta examensarbete.

Vid delsystemen Falu Norra och Falu Västra, där kommande resultat visar att elnätskommunikationen uppvisar dålig kvalitet, har den statistiska prestandan hos dessa system även jämförts med snittlasten och maxlasten under de tre föregående dygnet i dessa fördelningsstationer. I och med att Turtle-systemets prestanda utvärderas utifrån andelen transmittar som inte loggat under de tre senaste dygnet, är det också lasten i nätet under denna tidsperiod som är intressant att studera.

Sambanden mellan prestanda och last i ett delsystem observeras med tanke på det teoretiska sambandet mellan last/ström i nätet och dämpningen av elnätskommunicerande signaler, samt med tanke på uttalade rekommendationer från HM Power AB att koncentratorn maximal bör

”avlyssna” nätavsnitt med 10 MVA last. För att observera lasten i olika områden av elnätet i samband med observation av Turtle-systemets prestanda, används Falu Elnäts driftövervakningssystem *NetControll*. Denna programvara erbjuder möjlighet att avläsa aktuell last under en viss högspänningstransformator, olika fördelningsstationer och olika nätstationer. Dessutom finns möjlighet att studera kurvor för lasterna samt hämta historiska lastdata. Den last som är intressant att studera i detta sammanhang, är lasten vid den punkt i elnätet där Turtle-koncentratorn är placerad för att registrera informationsbärande signaler från underliggande transmittar. Denna punkt utgörs vanligtvis av ett inkommande fack från transformatorn som matar fördelningsstationen, där en strömtransformator mäter strömmen på transformatorns 10 kV-sida. Till samma strömtransformator ansluts även Turtle-koncentratorns strömtänger, vilket gör lasten i denna punkt intressant.

3.1.2 Prestandautvärdering av Senea CustCom

Falu Elnäts implementation av Senea-systemet omfattas bara av bostadsområdet Bojsenburg i norra Falun. Falu Elnät har övertagit driften av systemet från fastighetsbolaget Kopparstaden som äger området och Falu Elnät svarar nu för all mätvärdesinsamling från samtliga lägenheter och lokaler i Bojsenburg.

Systemet implementerar elnätskommunikation i lågspänningsnätet som förgrenar sig ut till de 92 bostadshusen i Bojsenburg från sex stycken nätstationer, som kan kallas T1, T2, T3, T4, T5 och T6 (se *Appendix, fig A5* för karta över området och delsystemen). I varje nätstation sitter en koncentrator som är ansluten till de utgående faserna och ”avlyssnar” signalerna med mätvärden som skickas via elnätet. Sammanlagt finns 1080 elmätare uppsatta i området. I varje lägenhet sitter en elmätare som är ansluten en Senea-transmitter. Transmittern sänder anläggningens elförbrukning sedan senaste avläsning, genom lågspänningsnätet till närmaste nätstation där Senea-koncentratorn sitter. Följande tabell 3-2 visar antalet anslutna transmittar till vardera koncentrator i Bojsenburg.

Koncentrator (nätstation)	Antal transmittar
T1	134
T2	205
T3	187
T4	181
T5	193
T6	180

Tabell 3-2. Antal transmittar under de olika koncentratorerna i Bojsenburg, per 17 mars 2006.

Falu Elnäts erfarenheter av systemet säger att prestandan har varit väldigt varierande och över lag ganska dålig. Vid ett tillfälle upphörde all elnätskommunikation i området att fungera, och det visade sig bero på att fastighetsbolaget Kopparstaden låtit installera frekvensstyrda fläktsystem i området. Detta gav stora störningar hos signalmiljön i lågspänningsnätet, bland annat i det frekvensband där Senea-systemet signalerar. Det blev uppenbart att åtgärder var tvungna att vidtas för att kunna fortsätta använda de frekvensstyrda fläktarna och Senea-systemet i samma nät, och lösningen blev EMC-filter som monterades vid fläktarna. På så sätt

började Senea-kommunikationen återigen fungera, men man är i dagsläget inte helt övertygade om att störningarna från fläktsystemen är helt eliminerade.

Ett annat problem hos Senea-systemet som teknikerna på Falu Elnät har fått erfarenhet utav är att elektroniska komponenter i transmittern tenderar att brinna upp, varpå transmittern upphör att fungera och måste bytas ut.

För att undersöka den statistiska prestandan hos Senea CustCom-systemet i Bojsenburg har systemets programvara för den centrala mätvärdesinsamlingen använts. I denna programvara är det möjligt att övervaka varje koncentrator och enskilda transmittar. Det finns möjlighet att se när enskilda transmittar senast loggade, dvs. var anslutna till sin koncentrator och överförde mätvärdesdata framgångsrikt. Det finns även alternativ för att rangordna olika transmittar efter deras kommunikationsstatus, där de olika statuskategorierna är *OK*, *DÅLIG* och *FÖRLORAD*. Tabell 3-3 nedan visar kriterierna för vilket status en transmitt får av systemet.

Status	Kriterium
DÅLIG	Om transmitt är OK och "antal dåliga polls" > 8 så erhåller den status DÅLIG .
FÖRLORAD	Om transmitt är DÅLIG och "antal dåliga polls" ≥ 256 så erhåller den status FÖRLORAD .
OK	Om transmitt är DÅLIG eller FÖRLORAD och man får en OK poll så erhålls status OK .

Tabell 3-3. Kriterier för olika status hos en transmitt i Senea-systemet [26].

Status DÅLIG eller FÖRLORAD är en indikation på att det finns problem med signaleringen i nätet. Det kan bero på att störningar och/eller signaldämpning förvränger de informationsbärande signalerna i elnätet. Men det kan också bero på att transmittern i lägenheten kopplats bort eller slutat att fungera.

Systemets design bygger på att klara intermittenta störningar, och med anledning av detta pollar alla koncentratorer sina transmittar kontinuerlig och hämtar in mätvärden då kommunikationen är tillgänglig. Senea-koncentratorns pollning mot sina transmittar pågår i cykler där den kontaktar en transmitt åt gången och inväntar svar. Om svaret från transmittern uteblir eller har bitfel så betraktas denna pollning som felaktig, och ett register hos koncentratorn räknar antalet felaktiga pollningar som en transmitt gett. När transmittern lyckas överlämna ett svar på pollningen som inte är felaktigt så nollställs registret. Beroende på värdet hos detta register i koncentratorn så tilldelas varje transmitt en status enligt tabell 3-3 ovan. Om transmittern är DÅLIG innebär det att kommunikationen mellan transmitt och koncentrator är dålig, eller att den är FÖRLORAD trots att den ej hunnit räkna upp till 256 för att erhålla denna status. Koncentratorns pollningscykler pågår kontinuerligt, och pollfrekvensen dvs. hur ofta en transmitt blir pollad av sin koncentrator, beror på hur många transmittar som är anslutna till koncentratorn och tiden för varje pollning [26].

För att ge en statistisk bild av prestandan hos Falu Elnäts implementation av Senea-systemet, har rapporter för transmittar med status DÅLIG, observerats vid upprepade tillfällen. Statistisk sammanställning av dessa observationer ger en bild av inom vilka nätstationsområden Senea-systemet uppvisar sämst respektive bäst prestanda. Dessutom kan

prestandaskillnader mellan olika adresser och huskroppar observeras, för att kunna dra ytterligare slutsatser kring störningsproblematiken som påverkar elnätssamfundet vid vissa anläggningar. Den erhållna statistiska prestandan utgör senare även underlag vid val av punkter för kommande mätningar av signalmiljön i elnätet.

3.1.3 Prestandautvärdering av Avalon X-Base från Enermet

Enermet-systemet har av erfarenhet hos Falu Elnät fungerat relativt bra. Det används uteslutande för insamling av timvärden från elkunder med mer än 63 A mätarsäkring, alltså framförallt industrier, företag och större fastigheter. Systemet är uppbyggt på nästan exakt samma sätt som Senea-systemet, med den viktiga skillnaden i kommunikationstekniken. All elnätssamfundet hos Enermet-systemet sker i lågspänningsnätet mellan en kundanläggning och dess matande nätstation.

Hos elkunden sitter den transmitterande enheten i anslutning till elmätaren. Hos Enermet-systemet benämner man denna transmitter ML10 efter dess modellbeteckning, och det är alltså den som sänder de informationsbärande signalerna timvärden för kundens elförbrukning till koncentratorn som sitter i den matande nätstationen. Koncentratorn som används i Falu Elnäts implementation av Enermet-systemet har modellbeteckning CM3250. Två olika tekniker används för kommunikation mellan transmittar och koncentratorer i Enermet-systemet. Äldre ML10-transmittar och CM3250-koncentratorer använder elnätssamfundet från Echelon med modellbeteckning PLT-30. Dessa använder DS-SS som moduleringsstrategi. Nyare Enermet-terminaler använder Echelon-modemet PLT-22 vars modulering bygger på BPSK-teknik. PLT-30- och PLT-22-modemen är inte kompatibla med varandra och kan alltså inte kommunicera sinsemellan. Hos Falu Elnät ersätter man successivt Enermet-terminaler som har PLT-30-modem med de nyare PLT-22-modemen, eftersom den nyare tekniken uppvisar en något bättre prestanda. Tabell 3-4 nedan visar antalet nätstationsområden och elabonnenter där Enermet-systemets PLT-22- respektive PLT-30-teknik används.

Echelon-modem	Antal nätstationsområden (koncentratorer)	Antal elkunder (transmittar)
PLT-22	49	148
PLT-30	12	48
Summa	61	196

Tabell 3-4. Antal koncentratorer och transmittar med PLT-22- respektive PLT-30-teknik, per 17 mars 2006.

Systemets programvara erbjuder begränsade möjligheter att analysera kvaliteten hos elnätssamfundet. Istället används de erfarenheter och kunskaper som berörda tekniker inom Falu Elnät har av Enermet-systemet, för att avgöra vilka områden och punkter som kan vara av intresse vid insamlingar av mätdata. Dessa erfarenheter visar att Enermet-systemets elnätssamfundet vid en anläggning endera tycks fungera bra eller inte alls. Det verkar inte finnas någon gråskala där emellan utan det är snarare ”svart eller vitt”/”on eller off”. Redan vid installationen av en ML10-transmitter brukar man kunna avgöra om kommunikationen med koncentratorn via elnätet kommer att fungera eller inte. Då det finns

brusstörningar i elnätet som interfererar med en ML10-transmitters frekvensband, indikeras detta genom att en lysdiod tänds på ML10:ans frontpanel vid installationen. Lysdioden varnar för ”Band In Use”, dvs. att frekvensbandet för transmitters signalering redan är ”i bruk” av störande frekvenser. Dessa frekvensstörningar är vanligtvis permanenta vid den berörda anläggningen, och det är oftast inte ens någon idé att installera en ML10-transmitter vid denna punkt. Istället för elnätskommunicerande teknik använder man då det betydligt kostsammare alternativet med egen GSM-/GPRS-uppringning, direkt från kundanläggningen till det centrala debiteringssystemet.

Valet av punkter i elnätet som är intressanta föremål för mätning av signalmiljön baseras således i Enermet-fallet på uttalade erfarenheter från personal på Falu Elnäts mätaravdelning.

3.2 Mätmetodik

I följande avsnitt beskrivs metodiken vid mätningarna av signalmiljön hos de olika systemen.

3.2.1 Metodik för mätning av signalmiljö hos Turtle-systemet

För att studera signalmiljön i elnätet och kunna dra slutsatser om vad som inverkar störande på elnätskommunikationen, är det väsentligt att genomföra spektrumanalys i olika punkter där det är känt att Turtle-systemet uppvisar olika prestanda. Att mäta de oerhört smala frekvensband som Turtle-systemet signalerar vid är väldigt svårt, och det finns inga kända kommersiella instrument för detta ändamål. I samråd med tekniker på HM Power AB har det visat sig mest lämpligt att använda en separat Turtle-koncentrator med en speciell programvara för att studera signalmiljön i systemets frekvensband. En mer detaljerad beskrivning av denna utrustning och programvara följer i senare avsnitt 3.3.1. Användandet av en separat koncentrator för att mäta signalmiljön i elnätet ger något begränsade möjligheter vad gäller användning i fält. Mätningarna kan främst genomföras i inomhusmiljö i fördelningsstationer och även i viss mån i nätstationer.

Mätningar av signalmiljön vid Turtle-systemets frekvensband som genomförs i detta examensarbete sker enbart i olika fördelningsstationer där systemet är i drift. Det är intressant att studera signalmiljön i punkter där systemet uppvisar dålig prestanda och även där det uppvisar bra prestanda. Signalmiljön vid punkter med olika statistisk prestanda kan på så sätt jämföras för att analysera vad som är utmärkande för de punkter där systemet fungerar bäst/sämst. Då Turtle-transmittern sänder kontinuerligt och inte på förfrågan från koncentratorn, är det svårt att mäta elnätets bakgrundsbrus vid ”tystnad”, dvs. då ingen signalering sker. Dessutom är det svårt att mäta i omedelbar anslutning till en Turtle-transmitter eftersom detta kräver tillträde till en kundanläggning.

Vid de olika mätningarna i detta examensarbete jämförs inte enbart signalmiljön mellan olika fördelningsstationer. Olika CT-anslutningar testas vid de olika stationerna för att se vilken betydelse detta kan ha för den ”avlyssnade” signalmiljön som koncentratorn upplever. Dessutom genomförs mätningar på både inkommande fack där lasten är som störst, samt på enskilda utgående fack under vilka Turtle-transmittar finns installerade. Detta kommer förhoppningsvis leda till att slutsatser kan dras kring störningskaraktäristik vid punkter som uppvisar sämst prestanda, samt hur koncentratorns CT-anslutningar kan förändras för att förbättra denna prestanda.

3.2.2 Metodik för mätning av signalmiljö hos Senea CustCom-systemet

För att studera signalmiljön i elnätet och kunna dra slutsatser om vad som inverkar störande på elnätskommunikationen, är det väsentligt att genomföra spektrumanalys i olika punkter där det är känt att Senea-systemet uppvisar olika prestanda. Mätningarna kommer i första hand att göras mellan fas L1 och nollan vid alla mätpunkter, eftersom Senea-systemets elnätskommunikation använder denna fas.

Det är framförallt intressant att mäta och analysera signalmiljön som koncentratorn upplever, dels vid kommunikation med sina underliggande transmittar och även då ingen signalering sker. Signalmiljön vid olika koncentratorer kan jämföras för att eventuellt kunna dra slutsatser kring varför olika delsystem uppvisar olika prestanda. Med hjälp av det centrala insamlingssystemet kan man initiera kommunikation med enskilda transmittar. För att studera signaleringen från olika transmittar som uppvisar varierande statistisk prestanda, är det följaktligen lämpligt att genomföra spektrumanalys vid koncentratorn då kommunikation initieras med olika underliggande transmittar.

Det är även intressant att mäta signalmiljön vid eller intill en Senea-transmitter, dvs. i ett bostadshus med Senea-transmitter, dels vid signalering från transmittern och även då transmittern är ”tyst” för att mäta bakgrundsbruset.

3.2.3 Metodik för mätning av signalmiljö hos Enermet-systemet

För att studera signalmiljön i elnätet och kunna dra slutsatser om vad som inverkar störande på elnätskommunikationen, är det väsentligt att genomföra spektrumanalys i olika punkter där det är känt att Enermet-systemet uppvisar olika prestanda. Eftersom Enermet-terminalerna kommunicerar på fas L1 i elnätet, så sker mätningarna på spänningen mellan denna fas och nollan. Det är intressant att mäta signalmiljön vid eller intill en Enermet-transmitter, dels vid signalering från transmittern och dels då transmittern är ”tyst” för att mäta bakgrundsbruset. Detta avbrott i signaleringen uppnår man enklast genom att göra koncentratorn spänningslös. Dessutom är det intressant att jämföra signalmiljöerna vid punkter där installation av ML10-transmittar misslyckats på grund av störningar i frekvensbandet, med punkter där elnätskommunikationen fungerar problemfritt. Det är även intressant att mäta och analysera signalmiljön som koncentratorn upplever, dels vid kommunikation med sina underliggande transmittar och även då ingen signalering sker.

3.3 Mätutrustning

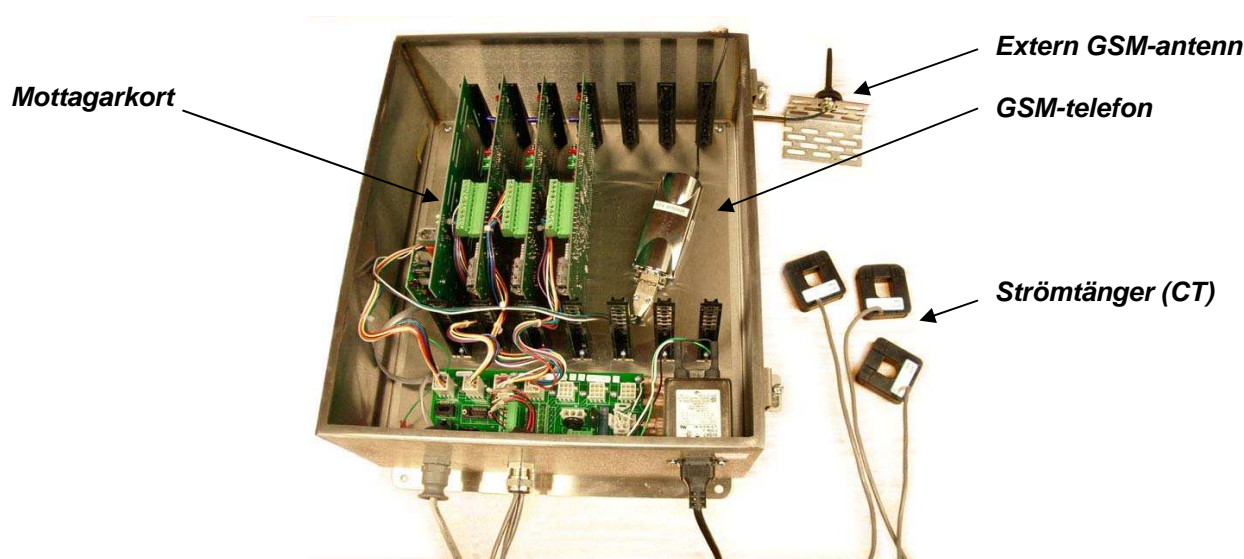
I detta avsnitt beskrivs den utrustning som används vid mätningar av signaler i elnätet vid olika punkter. Olika mätutrustning används vid mätningar i Turtle- respektive Senea- och Enermet-systemen. De beskrivs därför i olika avsnitt nedan.

3.3.1 Mätutrustning för mätning i Turtle-systemet

För att studera signalmiljön i elnätet vid de frekvensband som Turtle-systemet signalerar ställs stora krav på upplösning och mättid. Det är känt att systemet signalerar med mycket smala frekvensband (1,5 mHz) som i sin tur består av tre individuella FSK-frekvenser motsvarande varsitt informationsinnehåll. För att kunna identifiera enskilda frekvensband med denna bandbredd krävs att mätningen sker över en lång tid och med god upplösning. Efter samtal med flera bransch-kunniga inom elkvalitet och mätningar i elnätet, konstaterades det att det inte tycks finnas några kommersiella instrument på marknaden som uppfyller dessa krav.

Istället kontaktades den svenska återförsäljaren av Turtle, HM Power AB, för hjälp med mätningar. Tekniker på detta företag rekommenderade att man kunde använda en separat Turtle-koncentrator för de önskade mätningarna. En speciell programvara används i koncentratorns mottagarkort, och ett modem i koncentratorn möjliggör uppringning från en dator. Koncentratorn ansluts med sina vanliga strömtänger (CT) till mätslingor i inkommande eller utgående fack vid fördelningsstation där man önskar genomföra sina mätningar. Strömtängerna ”avlyssnar” allt frekvensinnehåll i mätslingan och skickar in signalerna till koncentratorns mottagarkort. Figur 3-1 nedan visar en bild på koncentratorn och övrig utrustning som används vid mätningarna.

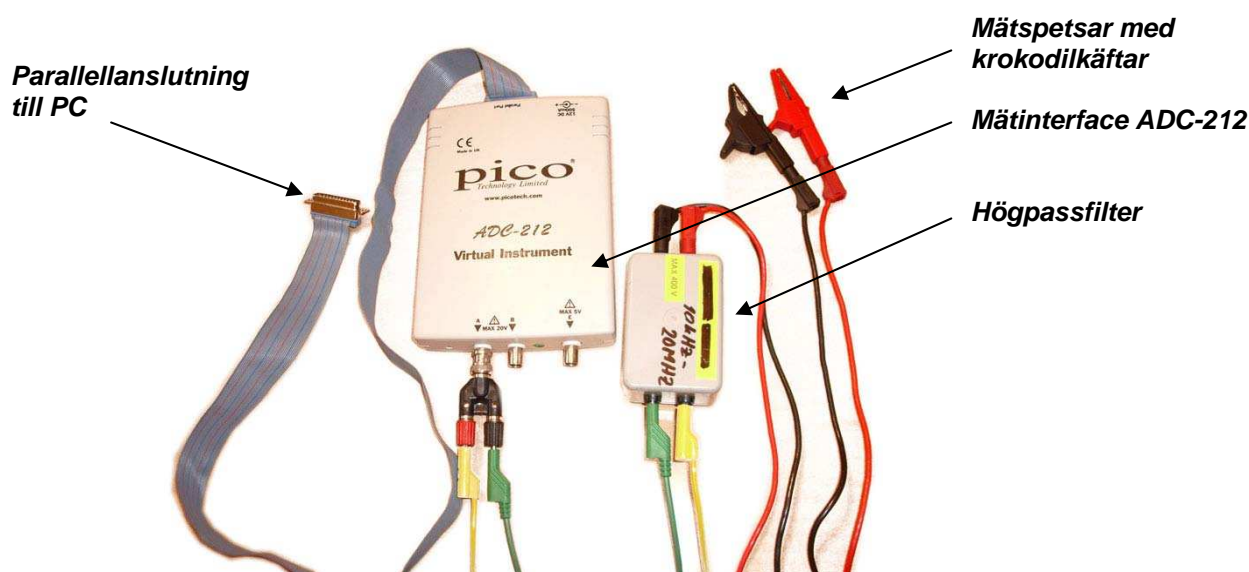
Med hjälp av ett speciellt program på en dator med modem är det möjligt att ringa upp Turtle-koncentratorn och hämta den samplade signalen. Programmet utför själv Fourier-transformering av den samplade signalens I- och Q-kanaler, och presenterar detta i FFT-plottar när mätningen är avslutad. Programmets FFT-analys visar Turtle-signaler i frekvensbandet 5–9,5 Hz vilket innebär att man tittar på signalerna efter att de blandats ned med bärvågen på 100 Hz. I programmet kan man även välja hur många mätsampel man vill använda, och efter rekommendation från tekniker på HM Power AB så används totalt 131 072 sampel, uppdelat på 65 536 sampel per I- och Q-kanal. Detta motsvarar ungefär 40 minuters mättid vid samplingsfrekvensen 60 Hz, vilket visar sig ge tillräckligt hög mätnoggrannhet för att kunna urskilja frekvensband med 1,5 mHz noggrannhet.



Figur 3-1. Turtle-koncentrator som används för mätning.

3.3.2 Mätutrustning för mätning i Senea- och Enermet-systemen

För mätningar i Senea- och Enermet-systemen användes samma mätutrustning eftersom de signalerar i samma frekvensband. Mätningarna utfördes med hjälp av det tvåkanaliga mätinterfacet ADC-212 från Pico Technology Ltd. Mätinterfacet har 12 bitars upplösning och 100 Ms/s samplingshastighet och ansluts till parallellporten på en dator. Leverantörens programvara installeras på datorn och har såväl oscilloskop- som spektrumanalysatorfönster. Anslutning av mätinterfacet till elnätet görs genom ett högpasfilter med bredbandstransformator med frekvensgång 0,01–20 MHz \pm 3 dB och användbar bandbredd upp till 25 MHz (–10 dB) [12]. Figur 3-2 nedan visar denna utrustning som används för mätningar i Senea- och Enermet-systemen.



Figur 3-2. Mätkrets för mätning i Senea- respektive Enermet-banden.

4 Genomförande

4.1 Inhämtande av statistiska data hos de olika systemen

För att kunna skaffa en statistisk bild av de analyserade systemens prestanda, krävs ett bra underlag av lämpliga data. Följande avsnitt beskriver hur statistik för de olika systemen har tagits fram.

4.1.1 Inhämtande av statistiska data hos Turtle

För att ge en statistisk bild av prestandan hos Falu Elnäts implementation av Turtle-systemet, bestående av 12 delsystem, har rapporter för de transmittar som inte loggat de senaste tre respektive sju dygnen observerats vid upprepade tillfällen under tidsperioden december 2005–mars 2006. Statistisk sammanställning av dessa observationer ger en bild av inom vilka delsystem Turtle-systemet uppvisar sämst respektive bäst prestanda.

Observationer av Turtle-prestandan har gjorts under samma betingelser och vid samma tidpunkter vid alla tolv delsystem, med syftet att kunna jämföra olika områden sinsemellan. Genom att vid olika observationstillfällen sammanställa listor över de Turtle-transmittar som inte loggat under de tre/sju senaste dygnen, och sedan beräkna den procentuella andelen transmittar under varje fördelningsstation/koncentrator som inte loggat, jämförs de olika områdena med varandra.

Det är dock viktigt att känna till att Turtle-transmittar i t.ex. fritidshus som tappat kontakten med elnätet p.g.a. urskrivade huvudsäkringar eller frånslagen huvudströmbrytare, också visas i de listor som följande statistik är hämtad ifrån. Detta trots att elnätskommunikationen kanske inte är störd, utan p.g.a. att transmittern saknar kontakt till elnätet. Det innebär följaktligen att andelen transmittar som inte loggat p.g.a. dålig kvalitet hos elnätskommunikationen, är lika med eller mindre än de värden som erhålls i följande statistiska sammanställning.

Utöver att jämföra prestandan hos olika delar av Falu Elnäts implementation av Turtle-systemet, har den upplevda prestandan vid en tidpunkt jämförts med lasten i motsvarande nätavsnitt. För detta används Falu Elnäts driftövervakningssystem NetControll. Turtle-systemets prestanda under ett delsystem utvärderas bl.a. utifrån andelen transmittar som inte loggat under de tre senaste dygnen och det är därför lasten nätet under denna tidsperiod som är intressant att studera. Därför jämförs systemets prestanda vid ett observationstillfälle med den genomsnittliga lasten samt topplasten under de tre föregående dygnen. För att prestandans lastberoende ska bli så tydligt som möjligt, observeras det vid Falu Norra FS och Falu Västra FS där variationerna hos prestandan är som störst.

4.1.2 Inhämtande av statistiska data hos Senea CustCom

För att ge en statistisk bild av prestandan hos enskilda Senea-transmittrar och under olika nätstationer, har rapporter för de transmittrar som har status DÅLIG observerats vid upprepade tillfällen under några månaders tid. Statistisk sammanställning av dessa observationer ger en bild av inom vilka nätstationsområden Senea-systemet uppvisar sämst respektive bäst prestanda. Dessutom har adresserna för de olika Senea-transmittrarna kartlagts, för att ge en uppfattning om vilka områden som uppvisar bäst respektive sämst prestanda hos elnätskommunikationen inom ett nätstationsområde.

Observationer av Senea-prestandan har gjorts vid samma tillfällen och under samma betingelser vid de sex nätstationsområdena som har varsin koncentrator. Dessa nätstationsområden kallas fortsättningsvis även delsystem. Syftet är att kunna jämföra olika delsystem av Senea CustCom sinsemellan. Genom att vid olika tidpunkter sammanställa listor över de Senea-transmittrar som har status DÅLIG, och sedan beräkna den procentuella andelen transmittrar i varje delsystem med denna status, kan de olika delsystemen jämföras med varandra. De kriterier som en Senea-transmitter måste uppfylla för att erhålla status DÅLIG redovisas ovan i tabell 3-2.

Observationer av andelen transmittrar som inte loggat, dvs. inte lyckats överföra tillförlitliga timvärdesdata, under den senaste veckan, görs också. Detta för att kunna kartlägga de transmittrar som har allra sämst prestanda när det gäller elnätskommunikationen.

4.1.3 Inhämtande av statistiska data hos Avalon X-Base från Enermet

Enermet-systemets programvara erbjuder begränsade möjligheter att analysera kvaliteten hos elnätskommunikationen mellan enskilda transmittrar och tillhörande koncentrator. Därför är det svårt att skaffa data och ställa upp en statistisk modell för systemets prestanda avseende kvaliteten hos elnätskommunikationen. Istället har erfarenheter och kunskaper som berörda tekniker inom Falu Elnät har av Enermet-systemet, för att ge en översiktlig bild av dess upplevda prestanda vid olika punkter i elnätet.

Systemets enda mått på kvaliteten hos elnätskommunikationen vid en viss punkt i elnätet är om det går att installera en transmitter och få den att logga in i systemet från denna punkt, eller om det inte går. Då det finns brusstörningar i elnätet som interfererar med en Enermet-transmitters frekvensband, indikeras det redan vid installationen. Då dessa frekvensstörningar vanligtvis är permanenta vid den berörda anläggningen, är det oftast inte ens någon idé att installera någon transmitter vid denna punkt.

4.2 Val av mätpunkter

Detta avsnitt behandlar valet av punkter i elnätet där det är relevant att genomföra mätningar på signalmiljön. Valet av mätpunkter hos de olika systemen redovisas i separata avsnitt nedan.

4.2.1 Mätpunkter hos Turtle

För att analysera Turtle-kommunikationen i elnätet är det intressant att studera signalmiljön som elnätskommunikationen tillämpas i. De punkter och områden i elnätet där elnätskommunikationen uppvisar problem utgör intressanta mätpunkter, och för att bredda förståelsen för elnätet som kommunikationskanal för Turtle-signaler är det också intressant att jämföra problematiska punkter i nätet med störningsfria där Turtle-systemet fungerar bra.

Tabell 3-1 visar de 12 olika delsystemen som utgör Falu Elnäts implementation av Turtle-systemet vid tidpunkten för detta examensarbets slutförande. I resultaten över elnätskommunikationens statistiska prestanda i de olika delsystemen, som presenteras i avsnitt 5.1.1 nedan, visar det sig att delsystemen Falu Norra och Falu Västra uppvisar märkbart dålig prestanda. Resultaten från den statistiska sammanställningen visar även att Turtle-implementationen uppvisar god prestanda under de övriga fördelningsstationerna.

För att kunna dra slutsatser kring störningsproblematiken, som uppenbarligen påverkar Turtle-prestandan i olika omfattning vid olika områden i elnätet, är det av intresse att genomföra analys av signalmiljön vid punkter som uppvisar olika statistisk prestanda. Fördelningsstationerna Falu Norra och Falu Västra utgör därför lämpliga mätpunkter, för att studera vad som gör att elnätskommunikationen fungerar sämre där (se *Appendix, fig. A2* och *A3* för stationsscheman). Tidigare hade delsystemet under fördelningsstationen Källtorp omfattande störningar hos elnätskommunikationen, men efter att koncentratorns strömtänger omplacerats i stationen fungerar signaleringen mycket bättre nu (se *Appendix, fig. A4* för stationsschema). Därför är det även intressant att mäta den signalmiljö som koncentratorn upplevde före och efter denna omkoppling. För att studera signalmiljön som koncentratorn upplever vid stationer där den statistiska prestandan antyder god kvalitet hos elnätskommunikationen, utgör Hosjö ett gott exempel.

Följande fördelningsstationer utgör alltså lämpliga punkter för fysisk mätning av signalmiljön:

- Falu Norra FS
- Falu Västra FS
- Hosjö FS
- Källtorp FS.

4.2.2 Mätpunkter hos Seneca CustCom

Vid mätningar i Seneca-systemet i Bojsenburg är det intressant att jämföra signalmiljön vid punkter som uppvisar olika prestanda hos elnätskommunikationen. Dels är det önskvärt mäta frekvensspektrum vid de sex olika nätstationerna, för att studera hur den signalmiljö som koncentratorn upplever ser ut och för att undersöka eventuella skillnader. Dessutom är det intressant att studera frekvensspektrum vid en anläggning med Seneca-transmitter. Jämförelser mellan signalmiljön i närheten av en Seneca-transmitter respektive vid nätstation är önskvärt.

Tabell 3-2 visar de sex olika delsystemen som utgör Falu Elnäts implementation av Seneca-systemet vid tidpunkten för detta examensarbets slutförande. I resultaten över elnätskommunikationens statistiska prestanda i de olika delsystemen, som presenteras i

avsnitt 5.1.2 nedan, visar det sig att delsystemen T3 och T4 uppvisar sämre prestanda än övriga nätstationsområden. Resultaten från den statistiska sammanställningen visar även att Turtle-implementationen uppvisar särskilt god prestanda under delsystem T2 (se *Appendix, fig. A5* för karta över delsystemen).

För att kunna dra slutsatser kring störningsproblematiken, som uppenbarligen påverkar Senea-prestandan i olika omfattning vid olika områden i elnätet, är det av intresse att genomföra analys av signalmiljön vid punkter som uppvisar olika statistisk prestanda. Nätstationerna T3 och T4 utgör därför lämpliga mätpunkter, för att studera vad som gör att elnätskommunikationen fungerar sämre där. För att studera signalmiljön som koncentratorn upplever vid nätstationer där den statistiska prestandan antyder god kvalitet hos elnätskommunikationen, utgör T2 ett gott exempel.

För att studera signalmiljön vid en kundanläggning med Senea-transmitter, utgör ett vägguttag vid Jungfruvägen 85 A ett lämpligt alternativ.

Följande punkter är alltså lämpliga för fysisk mätning av signalmiljön i Senea-systemet:

- Nätstationerna T1–T6
- Kundanläggning vid Jungfruvägen 85 A.

4.2.3 Mätpunkter hos Avalon X-Base från Enermet

De anläggningar i elnätet som upplever störningar i de frekvensband där Enermet-systemet tillämpar sin elnätskommunikation, utgör intressanta mätpunkter, och redovisas i tabell 5-2 i avsnitt 5.1.3 nedan.

Då det är besvärligt att få tillträde till Nordbankens lokaler, genomförs mätningar av signalmiljön hos dessa ”problemanläggningar” endast vid Kvarteret Pilen och Preem – Jungfrurondellen.

För att dessutom få en uppfattning om hur signalmiljön ser ut vid en kundanläggning där Enermet-kommunikationen tycks fungera bra, utgör Promenaden 19 ett lämpligt exempel. Här har man installerat en Enermet-transmitter som hittills fungerat bra.

Dessutom är det av intresse att studera det spektrum av frekvenser som koncentratorn upplever i nätstationen. För detta ändamål utgör nätstation T0695 ett gott exempel, eftersom mätningar i underliggande anläggningar (Kvarteret Pilen och Promenaden 19) också kommer att genomföras. Dessutom utgör nätstation T0025 en lämplig mätpunkt, eftersom elnätskommunikationen aldrig uppvisat några störningar där.

Följande punkter är alltså lämpliga för fysisk mätning av signalmiljön i Enermet-systemet:

- Kvarteret Pilen
- Preem – Jungfrurondellen
- Promenaden 19
- Nätstation T0695
- Nätstation T0025.

4.3 Mätningar av signalmiljön i de olika systemen

I följande avsnitt beskrivs genomförandet av de mätningar av signalmiljön som genomförts vid olika punkter i de olika systemen.

4.3.1 Mätningar i Turtle-systemet

Mätningarna av signalmiljön i de frekvensområden där Turtle-systemet signalerar har genomförts i följande fördelningsstationer hos Falu Elnät:

- Falu Norra FS
- Falu Västra FS
- Hosjö FS
- Källtorp FS.

Samtliga mätningar vid dessa stationer har skett inom en tidsperiod av drygt en arbetsvecka, vid månadsskiftet januari–februari 2006. Mätningarna har enbart genomförts under dagtid, mellan 09.00–15.00. Då lasten i hela elnätet och i enskilda nätavsnitt varierar ganska kraftigt under ett dygn, har olika mätningar vid samma punkt genomförts vid tidpunkter då lasten är så lika som möjligt. Utöver mätresultaten i form av spektrumanalys av signalmiljön kring Turtle-frekvenserna, har även lasten antecknats för det nätavsnitt som omfattas av mätningen samt utomhustemperaturen vid mättillfället. Detta för att åskådliggöra eventuella samband mellan lasten i ett nätavsnitt, dvs. den totala strömmen som passerar vid mätpunkten, och nivåerna hos brusstörningar.

För att mäta den signalmiljö som Turtle-systemet påverkas av och upplever i elnätet, har en vanlig Turtle-koncentrator använts för att sampla lågfrekvent brus och andra frekvenskomponenter som interfererar med kommunikationsbanden kring 90–95 respektive 105–110 Hz. Mätutrustning och mätmetodik beskrivs närmare i avsnitt 3.3.1 och 3.2.1 ovan.

Mätningarna vid de utvalda punkterna har gjorts under precis samma förutsättningar som den befintliga koncentratorn i respektive station. Genom att ansluta mät-koncentratorns strömtänger (CT:s) till samma fack och med samma anslutningsstrategi som den befintliga koncentratorn, har man kunnat titta på precis den signalmiljö som den befintliga koncentratorn upplever.

Dessutom har mätningar med alternativa CT-anslutningar genomförts i de punkter som elnätskommunikationen är störd, för att se hur detta påverkar den ”avlyssnade” signalen hos koncentratorn. Dessutom har flera uppsättningar med strömtänger använts till mätkoncentratorn, för att mäta på flera utgående fack samtidigt och se vad detta innebär för den uppmätta signalmiljön. Detta kan förhoppningsvis leda till att slutsatser kan dras kring hur strömtängerna kan omplaceras för att förbättra kvaliteten hos de mottagna Turtle-signalerna vid koncentratorn (se *Appendix, fig. A2, A3 och A4* för stationsscheman).

De erhållna mätresultaten från mätningarna i Turtle-systemet redovisas i avsnitt 5.2.1 nedan.

4.3.2 Mätningar i Senea-systemet

Mätningarna av signalmiljön i de frekvensband där Senea-systemet signalerar har genomförts vid samtliga sex nätstationer under vilka Falu Elnät implementerar Senea-systemet. Alla dessa nätstationsområden ligger i bostadsområdet Bojsenburg i Falun. Mätningar vid en kundanläggning har också genomförts i Bojsenburg, under nätstation T4. Vid denna station har även signaleringen från olika transmittar studerats och jämförts.

Samtliga mätningar i Senea-systemet har skett under två arbetsdagar, torsdagen den 9 februari samt onsdagen den 8 mars 2006. Mätningarna genomfördes under dagtid, mellan 10.00–14.00. För att mäta den signalmiljö som Senea-systemet påverkas av och upplever i elnätet, har en spektrumanalysator används för att sampla signaler, brus och andra frekvenskomponenter i frekvensbandet upp till 100 kHz. Eftersom Senea-systemet signalerar i två frekvenspar inom intervallet 52–76 kHz riktas störst uppmärksamhet till dessa frekvenser i mätningarna. Mätutrustning och mätmetodik beskrivs närmare i avsnitt 3.3.2 och 3.2.2.

De erhållna mätresultaten från mätningarna i Senea-systemet redovisas i avsnitt 5.2.2 nedan.

4.3.3 Mätningar i Enermet-systemet

Mätningarna av signalmiljön i de frekvensband där Enermet-systemet signalerar har genomförts under olika nätstationer i centrala Falun. Utifrån erfarenheter från personal inom mätavdelningen på Falu Elnät har områden och platser där Enermet-systemet fungerar bra respektive dåligt kartlagts, vilket beskrivs i avsnitt 4.2.3 ovan. Vid följande punkter har fysisk mätning av signalmiljön i Enermet-systemet genomförts i detta examensarbete:

- Kvarteret Pilen
- Preem – Jungfrurondellen
- Promenaden 19
- Nätstation T0695
- Nätstation T0025.

Mätningarna har skett under dagtid vid två olika tillfällen, dels onsdagen den 22 februari 2006 och dessutom onsdagen den 1 mars 2006. För att mäta den signalmiljö som Enermet-systemet påverkas av och upplever i elnätet, har en spektrumanalysator används för att sampla signaler, brus och andra frekvenskomponenter i frekvensbandet upp till 100 kHz. Eftersom Enermet-systemet signalerar vid endera 75 eller 86 kHz riktas störst uppmärksamhet till dessa frekvenser i mätningarna. Mätutrustning och mätmetodik beskrivs närmare i avsnitt 3.3.2 och 3.2.3.

De erhållna mätresultaten från mätningarna i Enermet-systemet redovisas i avsnitt 5.2.3 nedan.

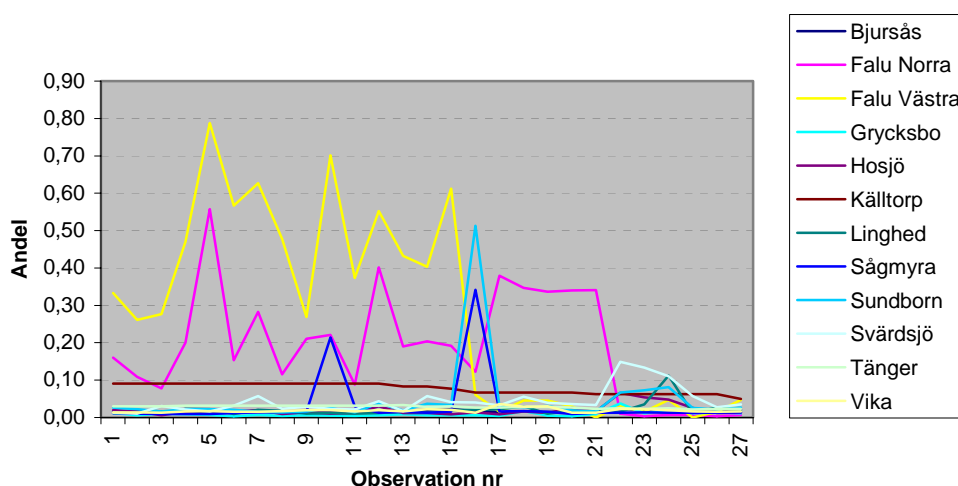
5 Resultat

5.1 Statistisk prestanda hos de olika systemen

I detta avsnitt beskrivs resultaten från det statistiska utvärderingsarbetet av de olika systemen. Sammanställd statistik för systemens prestanda i olika geografiska områden och under olika förhållanden redovisas i diagram- och textform nedan. Statistiken har inhämtats från programvarorna för den centrala mätvärdesinsamlingen hos Turtle- och Senea-systemen, medan Enermet-systemets mått på prestanda endast baseras på uttalade erfarenheter och lärdomar från personal på Falu Elnät.

5.1.1 Statistisk prestanda hos Turtle

Figur 5-1 nedan visar den procentuella andelen Turtle-transmittrar som vid 27 olika observationstillfällen inte hade loggat hos respektive koncentrator under de tre senaste dygnen. Det framgår från denna figur att Turtle-systemet uppvisar sämre prestanda under fördelningsstationerna Falu Norra FS och Falu Västra FS än under de tio övriga stationerna.



Figur 5-1. Andel Turtle-transmittrar som inte loggat de 3 senaste dygnen vid de olika fördelningsstationerna.

Vi ser dock att prestandan hos Falu Västra förbättras avsevärt, från att ha haft ca 30–80 % transmittrar med problem till 0–5 %, efter observation 15 i figuren ovan. Detta blev resultatet av omplaceringar av koncentratorns strömtänger (CT:s) i stationen, från inkommande transformatorfack, till enskilda utgående fack. Tack vare detta reducerades den last som

koncentratorn ”avlyssnar” avsevärt, vilket uppenbarligen gav en betydligt bättre prestanda hos signaleringen.

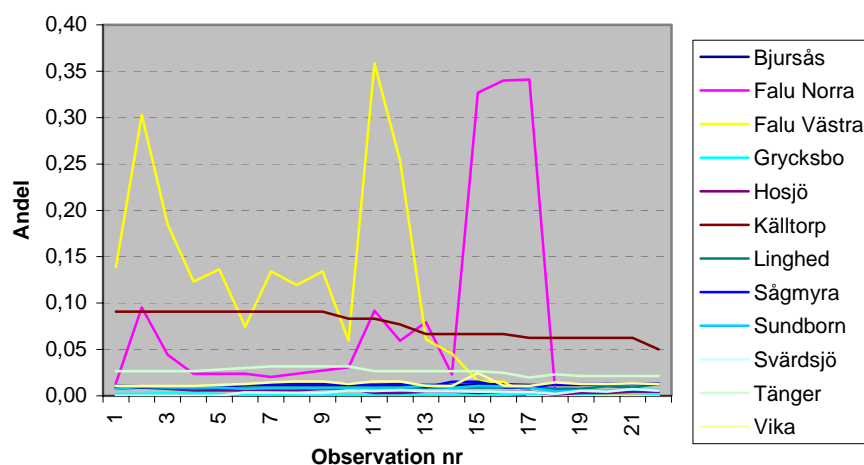
Vi ser även i figur 5-1 ovan att prestandan hos Falu Norra förbättras från ca 10–40 % transmittar med problem till 0–1 %, efter observation 21. Även i detta fall var prestandaförbättringen resultatet av omplacering av koncentratorns strömtänger, till utgående fack istället för inkommande.

Även Källtorp FS uppvisar i denna statistik märkbart dålig prestanda, men detta beror på att det bara finns ett fåtal (20 st per 20 mars 2006) transmittar under denna fördelningsstation, och att en av dessa uppenbarligen är fränkopplad. Därför blir den procentuella andelen transmittar med problem förhållandevis hög i denna sammanställning.

Under de 15 respektive 21 första observationerna ser vi att andelen transmittar som inte loggat de tre senaste dygnen varierar ganska kraftigt över tiden, speciellt vid Falu Norra FS och Falu Västra FS. Dessutom kan en samvarians mellan dessa variationer anas.

Hos de övriga delsystemen av Falu Elnäts Turtle-implementation ser vi att kvaliteten hos elnätskommunikationen är över lag god. Vid Sågmyra, Sundborn och Svärdsjö tycks andelen transmittar som inte loggat de tre senaste dygnen vid ett par tillfällen vara misstänkt höga. Detta sammanfaller dock i samtliga fall med avbrott och med arbeten som utförts på elnätet dagarna innan observationen.

Observationer har även gjorts av andelen transmittar som inte loggat de sju senaste dygnen i respektive delsystem. Figur 5-2 nedan visar en sammanställning av de sammanlagt 22 observationerna som gjorts.



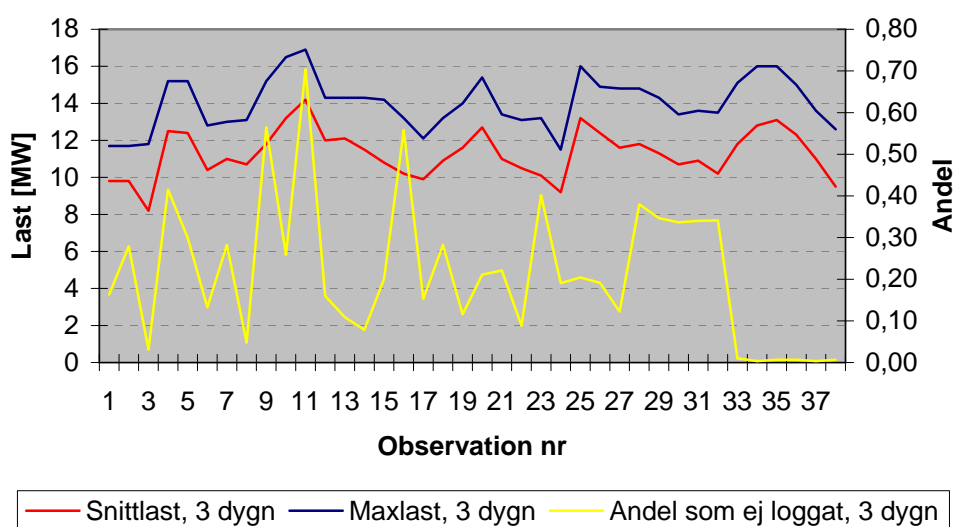
Figur 5-2. Andel Turtle-transmittar som inte loggat de 7 senaste dygnen vid de olika fördelningsstationerna.

Det framgår även från denna figur att Turtle-systemet uppvisar sämre prestanda under fördelningsstationerna Falu Norra FS och Falu Västra FS än under de tio övriga stationerna.

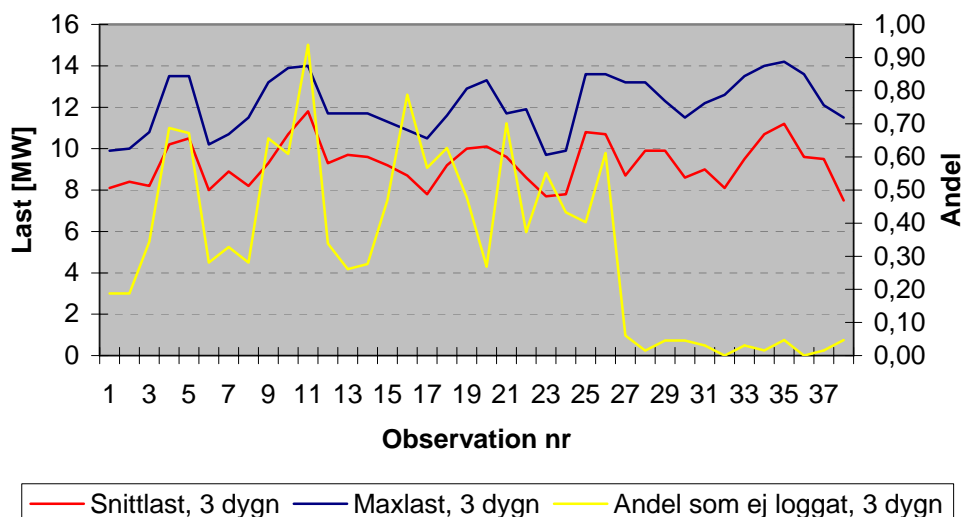
Även i denna statistiska sammanställning ser vi att prestandan hos Falu Västra förbättras avsevärt, från att ha haft ca 7–36 % transmittar med problem till 0–1 %, efter observation 14

i figuren ovan. Detta är naturligtvis också resultatet av omplaceringar av koncentratorns strömtänger (CT:s) i stationen, från inkommande transformatorfack, till enskilda utgående fack. Det samma gäller för Falu Norra där prestandan förbättrades från ca 2–34 % transmitttrar med problem till 0–1 %, efter observation 17. Även i denna sammanställning verkar Källtorps delsystem ha dålig prestanda, men detta beror liksom tidigare på att det endast finns ett fåtal transmitttrar under denna station och en av dessa är konstant fränkopplad.

För att jämföra Turtle-systemets prestanda vid olika lastförhållanden i nätet, har lasten på inkommande transformatorfack vid Falu Norra och Falu Västra noterats i samband med observationerna av andelen transmitttrar som inte loggat. Eftersom man studerar andelen transmitttrar som inte loggat de tre senaste dygnen, är det lasten under denna tidsperiod som är avgörande för kommunikationskvaliteten som observeras. Därför har snittlasten och maxlasten under de tre föregående dygnen i dessa punkter observerats för att om möjligt kunna tyda några direkta samband mellan last och Turtle-prestanda. Figur 5-3 och 5-4 nedan visar andelen Turtle-transmitttrar som inte loggat de tre senaste dygnen i delsystemen Falu Norra respektive Falu Västra. På figureernas högra y-axel, och med gul linje, anges andelen transmitttrar som inte loggat på tre dygn. På figureernas vänstra y-axel avläses lasten i MW hos det inkommande transformatorfacket i respektive fördelningsstation. Den övre (blå) lastkurvan i figurena anger maxlasten under de tre senaste dygnen, och den nedre (röd) lastkurvan anger den genomsnittliga lasten under samma tidsperiod.



Figur 5-3. Andel Turtle-transmitttrar som inte loggat de 3 senaste dygnen under Falu Norra, vid olika max- och snittlast under denna tidsperiod.

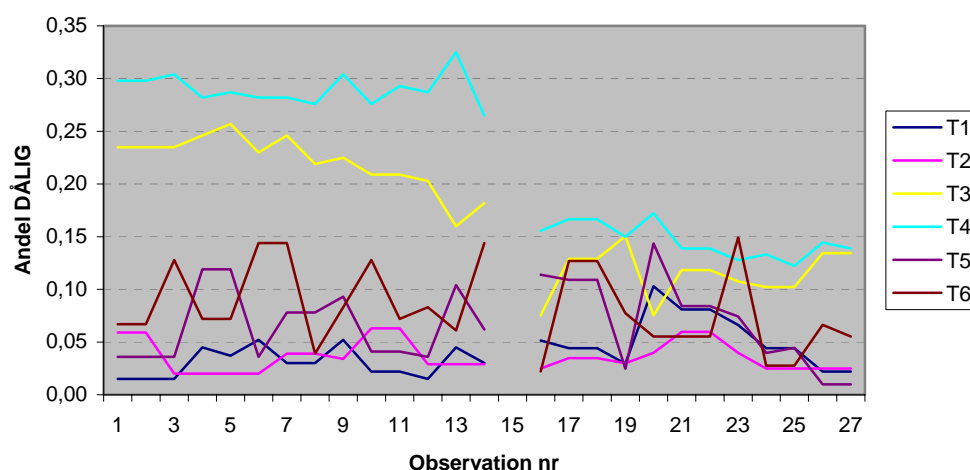


Figur 5-4. Andel Turtle-transmittrar som inte loggat de 3 senaste dygnen under Falu Västra, vid olika max- och snittlast under denna tidsperiod.

Ur ovanstående figurer kan man utläsa att det verkar föreligga ett visst samband mellan Turtle-systemets prestanda och lasten i det nätavsnitt där systemet är implementerat. Vi ser att både ökande snittlast och ökande maxlast i elnätet över en 3-dygnperiod medför en ökande andel Turtle-transmittrar som inte loggat under denna tidsperiod. Speciellt kring observationerna 4–5 och 9–11 ser vi hur andelen transmittrar som inte loggat följer lastkurvorna uppåt hos både Falu Norra och Falu Västra. Efter omplaceringar av konzentrorernas strömtänger vid Falu Norra och Falu Västra, efter observation 32 resp. 26, ser vi att andelen transmittrar som inte loggat minskar avsevärt. Efter dessa omkopplingar ”avlyssnar” konzentrorerna inte längre hela den inkommande lasten till stationen, utan bara några få utgående fack under vilka det finns Turtle-transmittrar.

5.1.2 Statistisk prestanda hos Senea CustCom

Sammanlagt har två observationsomgångar med 14 respektive 12 observationstillfällen av Senea-transmittrar med status DÅLIG genomförts under tidsperioder om 4 veckor vardera. Figur 5-5 nedan visar en sammanställning i diagramform av andelen transmittrar under respektive delsystem som hade status DÅLIG vid de olika observationstillfällena.

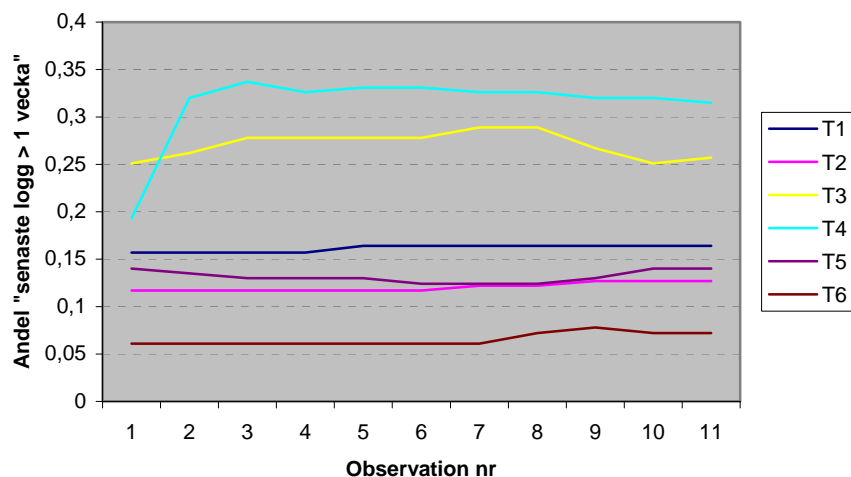


Figur 5-5. Andel transmittrar med status DÅLIG under respektive delsystem.

Under den första observationsomgången, dvs. de 14 första punkterna längs figurens x-axel, ser vi att andelen transmittrar med status DÅLIG är relativt stor under samtliga nätstationer, men T3 och T4 utmärker sig med i genomsnitt 22 respektive 29 %. Bäst prestanda i denna jämförelse har koncentratorn i nätstation T1 med en genomsnittlig andel transmittrar med status DÅLIG som understiger 5 %. Hos några nätstationsområden uppvisar observationerna stor varians kring medelvärdet vid de olika mätningarna, speciellt hos T5 och T6.

Under den andra observationsomgången, dvs. de 12 sista punkterna längs figurens x-axel, ser vi att andelen transmittrar med status DÅLIG fortfarande är stor under samtliga nätstationer. Däremot har denna andel minskat avsevärt hos de delsystem som uppvisade sämst prestanda under den första observationsomgången, dvs. T3 och T4. Detta trots att inga fysiska omkopplingar gjorts i delsystemen mellan observationsomgångarna. Hos de övriga fyra delsystemen är andelen Senea-transmittrar med status DÅLIG i stort sett oförändrad vid den andra omgången, jämfört med den första. Variationerna över tiden är fortfarande stora, och samvariationer mellan de olika delsystemens prestanda verkar inte föreligga i någon större utsträckning.

Observationer över andelen transmittrar som inte loggat, dvs. uppnått tillförlitlig kommunikation, under den senaste veckan, har också gjorts parallellt med den första observationsomgången. Figur 5-6 nedan sammanfattar dessa observationer i diagramform.



Figur 5-6. Andel transmittar under respektive delsystem som inte loggat den senaste veckan.

Dessa observationer visar mindre varierande värden hos de olika nätstationsområdena, men det är uppenbart att T3 och T4 utmärker sig även i detta avseende med så höga genomsnittliga andelar som 27 respektive 31 %. Koncentratoren i nätstation T6 uppvisar i den här jämförelsen bäst funktion, med i genomsnitt drygt 6 % transmittar som inte loggat under de 7 närmast föregående dygnet. Detta är anmärkningsvärt med tanke på att systemet under normala omständigheter ska klara av att samla in mätvärden från varje transmitter med åtminstone ett par timmars intervall.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att Senea-systemets elnätss kommunikation ser ut att uppvisa stora variationer hos sin prestanda i de sex delsystemen som utvärderas i detta examensarbete. Variationerna är stora över tiden, och dessutom ser funktionen hos systemet ut att vara starkt beroende av under vilken nätstation systemet används. I det här fallet utmärker sig systemimplementationen under nätstationerna T3 och T4 med sin dåliga prestanda, vilket föranleder spekulationer kring störningskällor o.s.v. samt intresse för att genomföra fysiska mätningar av frekvensspektrum i elnätet vid dessa områden.

Utöver statistik för prestandan hos de olika nätstationsområdena har även enskilda kundanläggningar i Bojsenburg observerats. Jämförelser mellan olika huskroppar och enskilda trapphus visar bland annat att Senea-transmittar i huskroppar och enskilda trapphus med lång kabellängd till den matande nätstationen, generellt uppvisar sämre prestanda än de som ligger nära nätstationen.

Följande tabell 5-1 redogör för de adresser där kundanläggningarnas Senea-transmittar uppvisar särskilt dålig prestanda. Dessutom visas kabellängden från dessa adresser till den matande nätstationen. Med "Sammanlagd andel DÅLIG" i tabellen avses den sammanlagda andelen för de olika Senea-transmittarna i det aktuella trapphuset.

Adress	Nätstations- område	Antal lägenheter	Sammanlagd andel "DÅLIG"	Kabellängd till nätstation
Jungfruv. 57 A	T3	5	71 %	194 m
Jungfruv. 57 B	T3	5	86 %	194 m
Jungfruv. 69 A	T3	5	84 %	186 m
Jungfruv. 69 B	T3	5	100 %	186 m
Jungfruv. 89 A	T4	5	74 %	197 m
Jungfruv. 89 C	T4	5	80 %	197 m
Jungfruv. 97 A	T4	5	63 %	221 m
Jungfruv. 97 B	T4	5	89 %	221 m
Jungfruv. 105 A	T5	5	21 %	175 m
Jungfruv. 105 B	T5	5	51 %	175 m

Tabell 5-1. Adresser i Senea-systemet med särskilt dålig prestanda.

Figur 5-7 nedan visar en kartbild över delsystem T3, där de trapphus med anmärkningsvärt hög andel Senea-transmittrar med status DÅLIG, är markerade med röd färg. Här ser man tydligt att prestandan är sämst vid anläggningar i utkanten av nätstationsområdet, långt från nätstationen.



Figur 5-7. Adresser i delsystem T3 med särskilt dålig prestanda.

5.1.3 Statistisk prestanda hos Avalon X-Base från Enermet

Den erfarenhet som tekniker inom mätaravdelningen på Falu Elnät har bidragit med till det här examensarbetet, visar att det finns tre anläggningar i nätet där man försökt installera Enermet-transmitttrar, men stött på sådana problem som beskrevs ovan. Tabell 5-2 nedan visar dessa anläggningar.

Anläggning	Nätstation
Kvarteret Pilen	T0695
Nordbanken	T0061
Preem – Jungfrurondellen	T0592

Tabell 5-2. Punkter i elnätet där Enermet-systemet uppvisar dålig prestanda.

Tänkbara källor till de problem som elnätskommunikationen upplever i dessa punkter är brusstörningar från ansluten utrustning vid och intill kundanläggningarna. Det är känt att Kvarteret Pilen byggdes i samband med att Nordbanken renoverades i mitten på 90-talet, vilket föranleder misstankar om att man kanske har liknande störkällor, t.ex. frekvensstyrda fläktsystem. Vid bensinmacken Preem – Jungfrurondellen är det dessutom känt att maskiner i deras tvätthall gett störningar på elnätet, vilket föranleder misstankar om att motorerna i denna utrustning även sprider brusstörningar i de primära och sekundära frekvensbanden där Enermet-transmitterna tillämpar sin elnätskommunikation.

Utöver dessa punkter i nätet där Enermet-systemet inte klarar av att kommunicera via elnätet, fungerar systemet bra. De enda kända problemen som brukar uppstå hos systemet är komponentfel i transmittern vid kundanläggningen. Elnätskommunikationen förefaller emellertid stabil och okänslig för störningar vid de punkter där man en gång lyckats installera en transmitter. Enermet-systemets elnätskommunikation fungerar bra vid 196 av 199 anläggningar i Falu Elnäts implementation av systemet, vilket följaktligen ger andelen 1,5 % av anläggningarna där systemet inte fungerar. Vid dessa anläggningar används då istället GSM/GPRS-uppringda Enermet-terminaler för att hämta data från elmätare.

5.2 Resultat från mätningar av signalmiljön

Detta avsnitt redovisar de resultat som mätningarna av signalmiljön hos de olika systemen har givit.

5.2.1 Resultat från mätningar i Turtle-systemet

Följande tabell 5-3 redovisar vilka mätningar som gjorts i Turtle-systemet, och speciella betingelser som gäller för dessa. Syftet med denna tabell är att på ett enkelt sätt kunna överblicka de mätningar som gjorts. Kommande textavsnitt beskriver resultaten från de enskilda mätningarna.

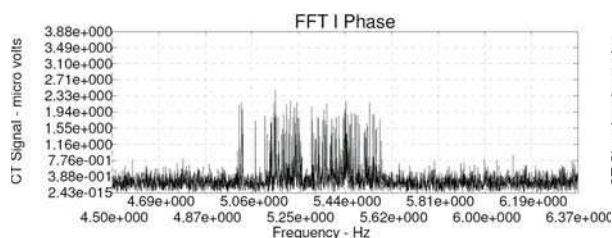
Mätning nr	Fördelnings-station	Mätpunkt	CT-anslutning	Tidpunkt	Temp.	Last vid mätpunkt
1	Falu Norra FS	Inkommande fack från T1	CT-kompenserad anslutning	Tis 31/1 2006 kl 08.23–09.08	6 °C	9,5 MW
2	Falu Norra FS	Utgående fack H104	2-fasanslutning med 3 CT	Ons 1/2 2006 kl 09.00–09.45	3 °C	360 kW
3	Falu Västra FS	Inkommande fack från T4	CT-anslutning med dubbel mätslinga	Ons 1/2 2006 kl 11.08–11.53	5 °C	8,7 MW
4	Falu Västra FS	Inkommande fack från T4	CT-kompenserad anslutning	Ons 1/2 2006 kl 12.21–13.06	7 °C	8,7 MW
5	Falu Västra FS	Utgående fack H107	2-fasanslutning med 3 CT	Ons 1/2 2006 kl 14.10–14.55	7 °C	666 kW
6	Falu Västra FS	Utgående fack H108 & H109	2-fasanslutning med 3 CT i vardera fack	Tors 2/2 2006 kl 11.27–12.13	4 °C	1,2 MW
7	Hosjö FS	Inkommande fack från T1	CT-kompenserad anslutning	Fre 3/2 2006 kl 08.35–09.20	-2 °C	4 MW
8	Källtorp FS	Inkommande fack från T1	1 CT per mätslinga	Fre 3/2 2006 kl 12.08–12.31	0,5 °C	6,4 MW
9	Källtorp FS	Utgående fack H24 & H25	2-fasanslutning med 3 CT i vardera fack	Fre 3/2 2006 kl 12.56–13.19	0 °C	607 kW
10	Falu Västra FS	Utgående fack H101, H107, H108, H109, H110 & H112	2-fasanslutning med 3 CT i vardera fack	Fre 10/2 kl 11.04–11.49	-1 °C	5,2 MW

Tabell 5-3. Sammanställning av de mätningar som genomförts på Turtle-systemet, samt betingelser för respektive mätning.

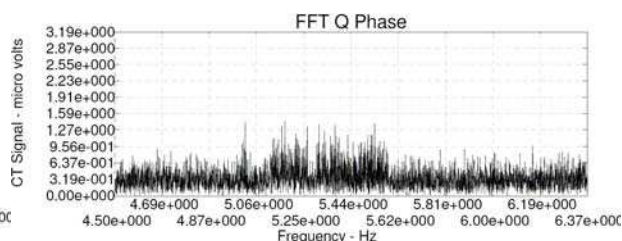
Mätning 1 – Falu Norra FS, inkommande fack

Den första mätningen av signalmiljön i nätavsnitt där Turtle-systemet implementerar elnätskommunikation, ägde rum den 31 januari 2006 kl. 08.23–09.08. Mätningen genomfördes vid fördelningsstationen Falu Norra, under vilken Turtle-kommunikationen uppvisat vissa problem. Den befintliga Turtle-koncentratorn i Falu Norra FS har sina strömtänger (CT) monterade i stationens fördelningsfack för inkommande last. Det innebär fördelen att koncentratorn kan ”avlyssna” Turtle-transmittrar under samtliga utgående fack i stationen, men det innebär också att all last från de utgående facken adderas i mätpunkten och blir väldigt stor. Dessutom ”avlyssnar” Turtle-koncentratorn vissa utgående fack i onödan, eftersom dessa nätavsnitt kanske inte har några Turtle-transmittrar överhuvudtaget (se *Appendix, fig. A2* för stationsschema).

Den första Turtle-mätningen genomfördes således i exakt samma punkt, och med samma CT-anslutning, där den befintliga Turtle-koncentratorn i Falu Norra FS sitter. Mätningen pågick i sammanlagt 45 minuter med samplingsfrekvensen 60 Hz, vilket gav 131 072 mätsampel att bilda frekvensspektrum utav. Figur 5-8 och 5-9 nedan visar de resulterande frekvensspektrumen kring Turtle-signaleringsens frekvensband vid mätning 1 i Falu Norra FS.



Figur 5-8. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens I-kanal.

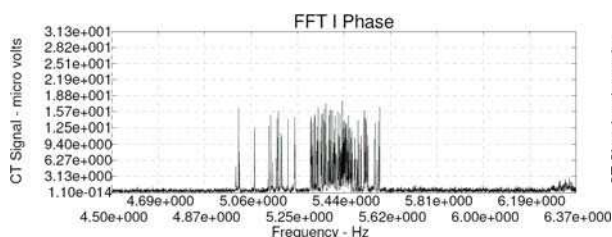


Figur 5-9. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens Q-kanal.

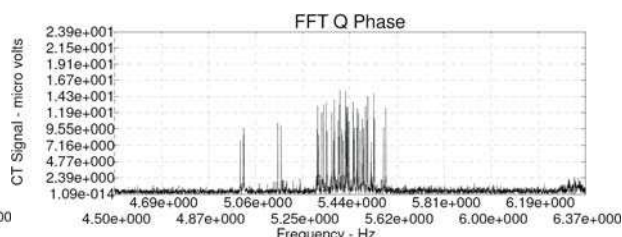
Vi ser i figur 5-8 och 5-9 ovan att Turtle-signalerna, som återfinns i intervallet 5–5,6 Hz, är relativt tydliga i förhållande till omgivande brus. Det verkar dock finnas skillnader mellan de mottagna signalernas I- och Q-kanal. Vid jämförelser mellan figurerna ser vi att brusnivån hos de båda kanalerna är ungefär lika, med toppvärden kring 0,7 μV . Däremot är signalnivåerna hos Q-kanalen betydligt lägre än hos I-kanalen, med toppvärden kring 1,4 μV , till skillnad från I-kanalens toppvärden kring 2,1 μV . Det innebär följaktligen att signal-brus-förhållandet (SNR) är ca 2 hos Q-kanalen, medan det är 3 hos I-kanalen.

Mätning 2 – Falu Norra FS, utgående fack H104

Mätning 2 genomfördes i Falu Norra FS på utgående fack H104 (se *Appendix, fig. A2* för stationsschema). Under detta fack finns samtliga Turtle-transmittrar som hittills installerats under denna fördelningsstation. Genom att låta koncentratorn mäta Turtle-signaler i denna punkt slipper den ”avlyssna” en massa onödigt frekvensinnehåll från övriga utgående fack, vars nätavsnitt saknar installerade Turtle-transmittrar. Istället för att mäta på den inkommande lasten till stationen som vid mätning 1 ovan uppgick till 9,5 MW, sker denna mätning på utgående last som uppgår till 360 kW, alltså knappt 4 % av lasten i föregående mätpunkt. Mätningen ägde rum den 1 februari 2006 kl. 09.00–09.45, vid utomhustemperaturen 3°C. Figur 5-10 och 5-11 nedan visar de resulterande frekvensspektrumen kring Turtle-signaleringsens frekvensband vid mätning 2 i Falu Norra FS.



Figur 5-10. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens I-kanal.

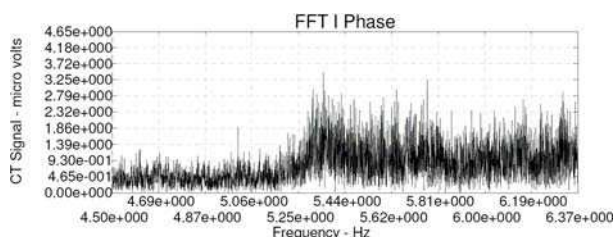


Figur 5-11. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens Q-kanal.

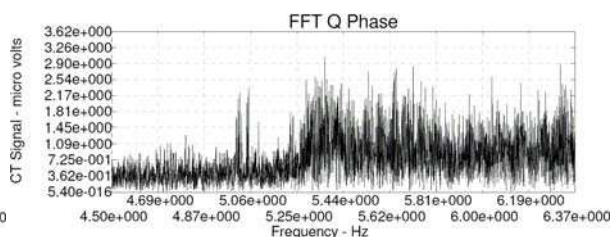
Vi ser i figur 5-10 och 5-11 ovan att de uppmätta signalerna i Turtle-bandet uppvisar märkbart bättre SNR än vid mätning 1 på inkommande fack. Signalnivån hos den mottagna signalens I- och Q-kanal uppvisar toppvärden kring 16 μV respektive 14 μV , samtidigt som brusnivåerna i de bägge signaldelarna har toppvärden kring 0,8 μV . Det ger signal-brus-förhållanden på 20 respektive 17,5 för de mottagna signalernas I- respektive Q-kanal, vilket är mycket bättre än det SNR som mätning 1 visade hos inkommande transformatorfack.

Mätning 3 – Falu Västra FS, inkommande fack

Mätning 3 genomfördes i Falu Västra FS på inkommande fack från transformator T4 (se Appendix, fig. A3 för stationsschema). Vid denna punkt sitter den befintliga koncentratorn i Falu Västra, som alltså ”avlyssnar” Turtle-signaler ur all last under transformatorn. Genom att mäta Turtle-signaler i denna punkt ”avlyssnar” man en hel del onödigt frekvensinnehåll från utgående fack vars nätavsnitt saknar installerade Turtle-transmitttrar. Vid denna mätning användes samma typ av CT-anslutning som den befintliga Turtle-koncentratorn använder. Hos denna CT-anslutning låter man mätslingan passera 2 varv genom strömtången (CT) för att förstärka de uppmätta signalerna. Men samtidigt förstärks även allt övrigt frekvensinnehåll, såsom brus, i mätslingan. Mätningen ägde rum den 1 februari 2006 kl. 11.08–11.53, vid utomhustemperaturen 5°C. Lasten vid mätpunkten i samband med mätningen var i genomsnitt 8,7 MW. Figur 5-12 och 5-13 nedan visar de resulterande frekvensspektrumen kring Turtle-signaleringsens frekvensband vid mätning 3 i Falu Västra FS.



Figur 5-12. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens I-kanal.



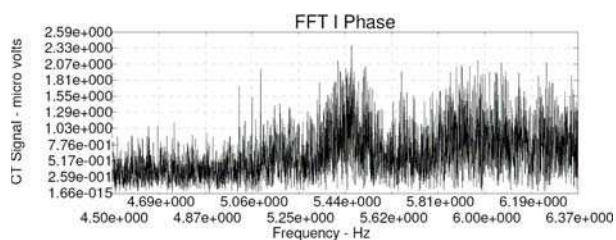
Figur 5-13. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens Q-kanal.

Vi ser i figur 5-12 och 5-13 ovan att de uppmätta signalerna i Turtle-bandet är oerhört brusiga. Det är omöjligt att utifrån denna grafiska representation av signalmiljön urskilja vad som är Turtle-signaler och brus frekvensområdet strax ovanför 5 Hz. Vi ser att brusnivån i bandet strax ovanför 5 Hz uppgår tilldrygt 2 μV hos såväl I- och Q-delen av den uppmätta signalen. Att ur de erhållna frekvensspektrumen uppskatta signal-brus-förhållandet hos de mottagna Turtle-signaler är omöjligt.

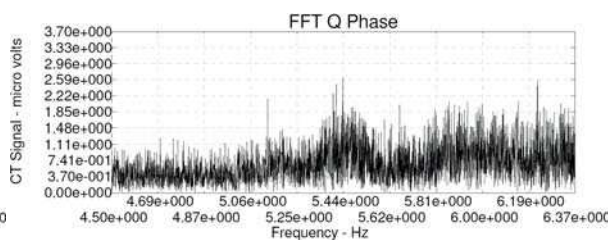
Mätning 4 – Falu Västra FS, inkommande fack

Mätning 4 genomfördes, precis som mätning 3, i Falu Västra FS på inkommande fack från transformator T4. Till skillnad från mätning 3 användes en annan typ av CT-anslutning för att ”avlyssna” signalmiljön i mätslingan. CT-anslutningen som användes i denna mätning benämns CT-kompenserad anslutning, vilken beskrivs i avsnitt 2.2.2.3 ovan. Mätningen ägde rum den 1 februari 2006 kl. 12.21–13.06, vid utomhustemperaturen 7°C. Lasten vid

mätpunkten i samband med mätningen var i genomsnitt 8,7 MW precis som vid mätning 3. Figur 5-14 och 5-15 nedan visar de resulterande frekvensspektrumen kring Turtle-signaleringsens frekvensband vid mätning 4 i Falu Västra FS.



Figur 5-14. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens I-kanal.

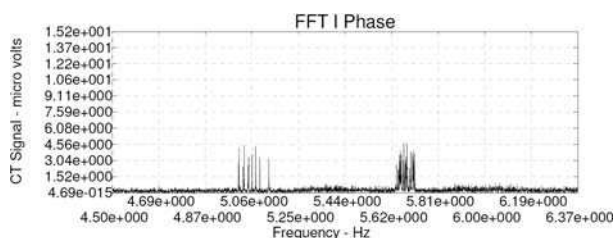


Figur 5-15. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens Q-kanal.

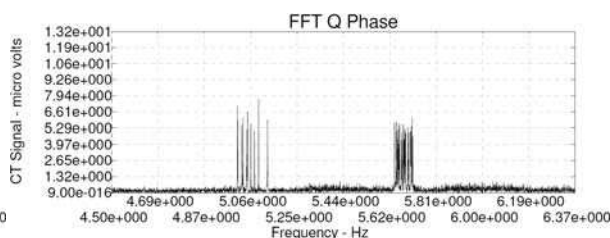
Vi ser i figur 5-14 och 5-15 ovan att de uppmätta signalerna i Turtle-bandet är oerhört brusiga även med denna CT-anslutning. Denna mätning avbröts p.g.a. problem med mätutrustningen efter ca 4/5 av den totala mättiden, varför nivåerna hos de uppmätta signalerna är ca 4/5 för låga. Däremot är förhållandena mellan brus och Turtle-signaler riktiga, och vi ser att det är omöjligt att urskilja några tydliga Turtle-signaler i dessa frekvensspektrum. Bruset i frekvensbandet över 5 Hz liknar det som uppmättes vid mätning 3 ovan, även nivåerna med tanke på att de egentligen är ca 25 % högre. Att ur de erhållna frekvensspektrumen uppskatta signal-brus-förhållandet hos de mottagna Turtle-signalererna är omöjligt.

Mätning 5 – Falu Västra FS, utgående fack H107

Mätning 5 genomfördes i Falu Västra FS på utgående fack H107 (se Appendix, fig. A3 för stationsschema). Under detta fack finns majoriteten av de Turtle-transmittrar som hittills installerats under denna fördelningsstation. Istället för att mäta på hela den inkommande lasten som vid mätningarna 3 och 4 ovan uppgick till 8,7 MW, sker denna mätning på utgående last som uppgår till 666 kW, alltså knappt 8 % av lasten i föregående mätpunkt. Mätningen ägde rum den 1 februari 2006 kl. 14.10–14.55, vid utomhustemperaturen 7°C. Figur 5-16 och 5-17 nedan visar de resulterande frekvensspektrumen kring Turtle-signaleringsens frekvensband vid mätning 5 i Falu Västra FS.



Figur 5-16. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens I-kanal.



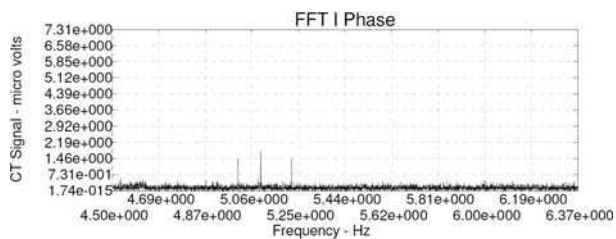
Figur 5-17. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens Q-kanal.

Vi ser i figur 5-16 och 5-17 ovan att de uppmätta Turtle-signalererna är väldigt tydliga. Skillnaden är markant mellan signalmiljön vid denna mätpunkt och vid mätpunkten där

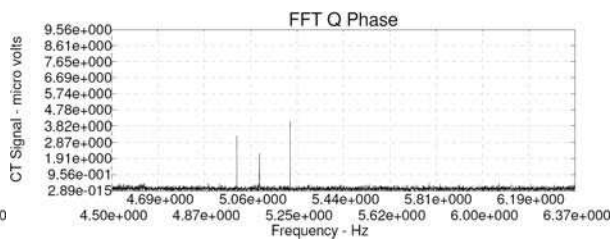
mätning 3 och 4 genomfördes. Signalnivån hos den mottagna signalens I- och Q-kanal uppvisar toppvärden kring 6 μV respektive 4 μV , samtidigt som brusnivåerna i de bägge signaldelarna har toppvärden kring 0,7 μV . Det ger signal-brus-förhållanden på ca 8,5 respektive 5,7 för de mottagna signalernas I- respektive Q-kanal, vilket är mycket bra jämfört med mätningarna 3 och 4 där SNR inte ens kunde uppskattas.

Mätning 6 – Falu Västra FS, utgående fack H108 & H109

Mätning 6 genomfördes i Falu Västra FS på de utgående facken H108 och H109 (se *Appendix, fig. A3* för stationsschema). Under dessa fack fanns vid mättillfället ett fåtal Turtle-transmittrar installerade, och dessa områden ska snart förses med Turtle-transmittrar hos alla hushållskunder. Denna mätning har gjorts för att ge en uppfattning om förutsättningarna för framtida insamling av Turtle-signaler i dessa fack. Mätningen ägde rum den 2 februari 2006 kl. 11.27–12.13, vid utomhustemperaturen 4°C. Den genomsnittliga lasten i de ”avlyssnade” facken var 1,2 MW vid mättillfället. Figur 5-18 och 5-19 nedan visar de resulterande frekvensspektrumen kring Turtle-signaleringsens frekvensband vid mätning 6 i Falu Västra FS.



Figur 5-18. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens I-kanal.



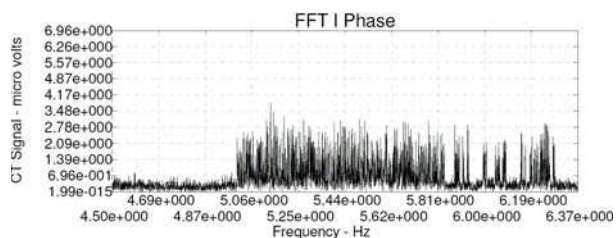
Figur 5-19. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens Q-kanal.

Vi ser i figur 5-18 och 5-19 ovan att tre Turtle-frekvenserna motsvarande varsin transmitter är väldigt tydliga. Signalnivån hos den mottagna signalens I- och Q-kanal uppvisar toppvärden kring 1,7 μV respektive 4,0 μV , samtidigt som brusnivåerna i de bägge signaldelarna har toppvärden kring 0,35 μV . Det ger signal-brus-förhållanden på ca 4,9 respektive 11,4 för de mottagna signalernas I- respektive Q-kanal, vilket måste anses bra med tanke på brusnivåerna som uppmättes hos all inkommande last vid mätningarna 3 och 4 ovan.

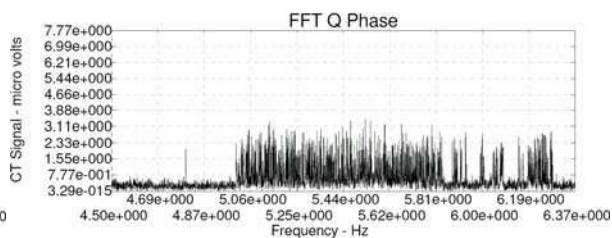
Mätning 7 – Hosjö FS, inkommande fack

Mätning 7 genomfördes i Hosjö FS på inkommande fack från transformator T1. Vid denna punkt sitter den befintliga koncentratorn i Hosjö FS, som alltså ”avlyssnar” Turtle-signaler ur all last under transformatorn. Trots det så har Turtle-systemet uppvisat bra prestanda under denna fördelningsstation, vilket föranleder intresse att mäta signalmiljön i Turtle-bandet vid denna punkt, för att senare kunna jämföra den med mätresultat från punkter där elnätskommunikationen uppvisar dålig prestanda. Vid mätningen användes samma typ av CT-anslutning som den befintliga Turtle-koncentratorn använder, nämligen CT-kompenserad anslutning. Mätningen ägde rum den 3 februari 2006 kl. 08.35–09.20, vid utomhustemperaturen –2°C. Lasten vid mätpunkten i samband med mätningen var i

genomsnitt 4,0 MW. Figur 5-20 och 5-21 nedan visar de resulterande frekvensspektrumen kring Turtle-signaleringsens frekvensband vid mätning 7 i Hosjö FS.



Figur 5-20. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens I-kanal.



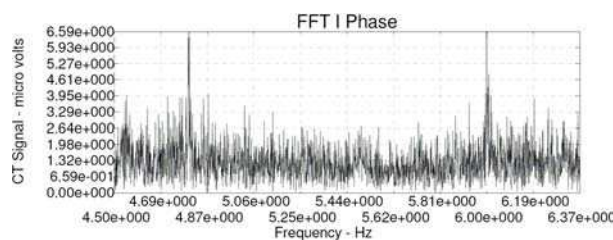
Figur 5-21. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens Q-kanal.

Vi ser i figur 5-20 och 5-21 ovan att de uppmätta Turtle-signalerna i frekvensområdet 5–6,3 Hz är tydliga i förhållande till omgivande brus. Signalnivån hos såväl I- som Q-kanalen hos den mottagna signalen uppvisar toppvärden kring 3,0 μV , samtidigt som brusnivåerna i de bägge signaldelarna har toppvärden kring 0,7 μV . Det ger ett signal-brus-förhållande på ca 4,3 hos både I- och Q-kanalen i de mottagna Turtle-signalerna, vilket med andra ord måste anses fullt tillräckligt för att Turtle-signaleringsen ska fungera bra. I Hosjö FS gör man alltså bäst i att även fortsättningsvis ”avlyssna” all inkommande last till Turtle-koncentratoren, trots att vissa utgående fack saknar installerade Turtle-transmittrar.

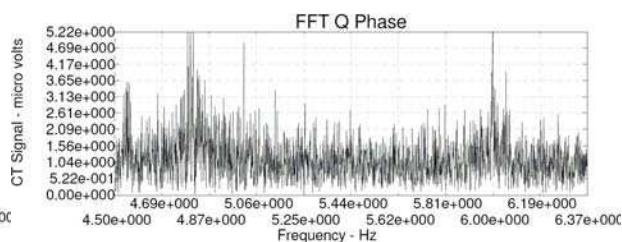
Mätning 8 – Källtorp FS, inkommande fack

Mätning 8 genomfördes i Källtorp FS på inkommande fack från transformator T1 (se Appendix, fig. A4 för stationsschema). Vid denna punkt satt tidigare den befintliga Turtle-koncentratoren, som då alltså ”avlyssnade” Turtle-signaler ur all last under transformatorn. Från Källtorp FS utgår flera fack till närbelägna industrier, vars laster utgör majoriteten av all last i fördelningsstationen. Tidigare omfattade Turtle-koncentratorns mätning även dessa utgående fack som helt saknade signaler från Turtle-transmittrar. Det gjorde att prestandan hos Turtle-implementationen i detta delsystem blev väldigt dålig, varför man numera bara ”avlyssnar” elnätet efter Turtle-signaler på enskilda utgående fack.

Eftersom denna mätning bara syftade till att ge en översiktlig bild av bruset och Turtle-signalerna i den punkt där koncentratoren tidigare ”avlyssnade” nätet, ställdes det inte lika stora krav på noggrannheten hos mätningen. Därför rationaliserades arbetet genom att bara mäta över en 23-minuters tidsperiod med 65 536 sampel istället för det dubbla vid föregående mätningar. Mätningen ägde rum den 3 februari 2006 kl. 12.08–12.31, vid utomhustemperaturen 0,5°C. Lasten vid mätpunkten i samband med mätningen var i genomsnitt 6,4 MW. Figur 5-22 och 5-23 nedan visar de resulterande frekvensspektrumen kring Turtle-signaleringsens frekvensband vid mätning 8 i Källtorp FS.



Figur 5-22. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens I-kanal.



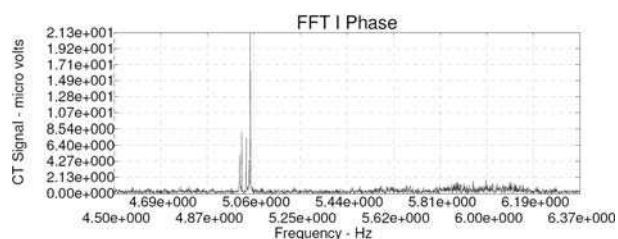
Figur 5-23. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens Q-kanal.

Vi ser i figur 5-22 och 5-23 ovan att de uppmätta signalerna i Turtle-bandet är oerhört brusiga. Det är omöjligt att utifrån denna grafiska representation av signalmiljön urskilja vad som är Turtle-signaler och brus frekvensområdet strax ovanför 5 Hz. Vi ser att brusnivån i bandet strax ovanför 5 Hz uppgår tilldrygt 2 μV hos såväl I- och Q-delen av den uppmätta signalmiljön. Att ur de erhållna frekvensspektrumen uppskatta signal-brus-förhållandet hos de mottagna Turtle-signalerna är omöjligt.

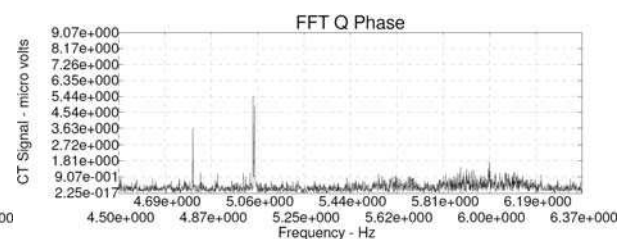
Mätning 9 – Källtorp FS, utgående fack H24 och H25

Mätning nummer 9 genomfördes i Källtorp FS på de utgående facken H24 och H25 (se Appendix, fig. A4 för stationsschema). Under dessa fack finns majoriteten av de Turtle-transmittar som hittills installerats under denna fördelningsstation. Istället för att mäta på den inkommande lasten som vid mätning 8 ovan uppgick till 6,4 MW, sker denna mätning på utgående last som uppgår till 607 kW, alltså knappt 10 % av lasten i föregående mätpunkt. Den befintliga Turtle-koncentratorn i Källtorp FS ”avlyssnar” numer dessa två utgående fack, tillsammans med några ytterligare. Utgående fack tillhörande närlägen industri ”avlyssnas” alltså inte längre.

Mätningen ägde rum den 3 februari 2006 kl. 12.56–13.19, vid utomhustemperaturen 0°C. Figur 5-24 och 5-25 nedan visar de resulterande frekvensspektrumen kring Turtle-signaleringsens frekvensband vid mätning 9 i Källtorp FS.



Figur 5-24. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens I-kanal.



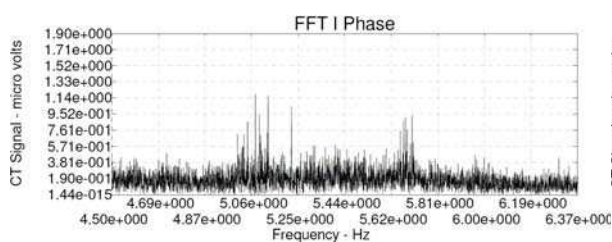
Figur 5-25. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens Q-kanal.

Vi ser i figur 5-24 och 5-25 ovan att de uppmätta Turtle-signalerna är väldigt tydliga. Skillnaden är markant mellan signalmiljön vid denna mätpunkt och vid mätpunkten där mätning 8 genomfördes. Signallnivån hos den mottagna signalens I- och Q-kanal uppvisar toppvärden kring 8 μV respektive 5 μV , samtidigt som brusnivåerna i de bägge signaldelarna har toppvärden kring 0,8 μV respektive 0,6 μV . I signalens I-del ser vi att en Turtle-signal vid

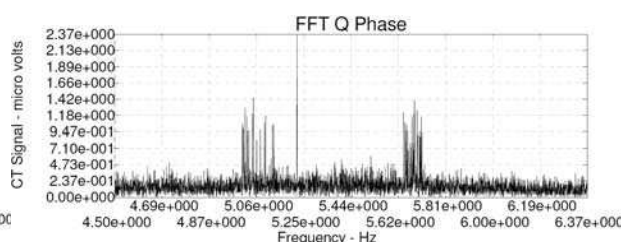
5,05 Hz har förhållandevis stor amplitud i förhållande till de två övriga. Det kan vara en konsekvens av att även denna mätning gjordes över en kortare tidsperiod än mätningarna 1–7, nämligen 23 minuter motsvarande 65 536 sampel. Det kan ha gjort att noggrannheten vid beräkningen av frekvensspektrumet blivit sämre, varpå två intilliggande Turtle-signaler inte kunnat särskiljas utan istället adderats för att få en orimligt stor signalenergi. Ser man på de andra uppmätta Turtle-signalerna med toppvärden kring 8 μV respektive 5 μV , erhålls uppskattade signal-brus-förhållanden på ca 8,5 respektive 5,7 för de mottagna signalernas I-respektive Q-kanal, vilket är mycket bra jämfört med mätning 8 där SNR inte ens kunde uppskattas.

Mätning 10 – Falu Västra FS, utgående fack H101, H107, H108, H109, H110 & H112

Efter mätresultat från ovanstående mätningar i Falu Västra FS skedde omkoppling av koncentratorns strömtänger som samlar in Turtle-signaler under stationen. Istället för att ”avlyssna” all inkommande last, delade man upp strömtängerna på flera utgående fack mot de områden där Turtle-transmittrar finns och kommer att finnas. Denna mätning gjordes med hjälp av de befintliga strömtängerna i de utgående facken, och speglar därmed den signalmiljö som Turtle-koncentratorn kommer att uppleva härnäst. Mätningen ägde rum den 10 februari 2006 kl. 11.04–11.49, vid utomhustemperaturen -1°C . Den genomsnittliga lasten i de ”avlyssnade” facken var 5,2 MW vid mättillfället. Figur 5-26 och 5-27 nedan visar de resulterande frekvensspektrumen kring Turtle-signaleringsens frekvensband vid mätning 10 i Falu Västra FS.



Figur 5-26. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens I-kanal.



Figur 5-27. Frekvensspektrum i Turtle-bandet för den uppmätta signalens Q-kanal.

Vi ser i figur 5-26 och 5-27 ovan att Turtle-signalerna, som återfinns i intervallet 5–5,7 Hz, är relativt tydliga i förhållande till omgivande brus. Det verkar dock finnas skillnader mellan de mottagna signalernas I- och Q-kanal. Vid jämförelser mellan frekvensspektrumen ser vi att brusnivån hos de båda kanalerna är ungefär lika, med toppvärden kring 0,5 μV . Däremot är signalnivåerna hos I-kanalen något lägre än hos Q-kanalen, vilket ger att signal-brus-förhållandet är ca 2 hos I-kanalen, medan det är drygt 3 hos Q-kanalen.

5.2.2 Resultat från mätningar i Senea-systemet

Följande tabell 5-4 redovisar vilka mätningar som gjorts i Senea-systemet, och speciella betingelser som gäller för dessa. Syftet med denna tabell är att på ett enkelt sätt kunna överblicka de mätningar som gjorts. Kommande textavsnitt beskriver resultaten från de enskilda mätningarna. (se *Appendix, fig. A5* för karta över Bojsenburg)

Mätning nr	Nätstation	Mätpunkt	Kabellängd till signalkälla	Systemaktivitet	Tidpunkt
1	T0063 (T1)	Intill koncentratorn i nätstationen	–	Ingen signal i nätet. Bakgrundsbrus.	Ons 8/3 2006 kl 13.08
2	T0064 (T2)	Intill koncentratorn i nätstationen	–	Ingen signal i nätet. Bakgrundsbrus.	Ons 8/3 2006 kl 13.18
3	T0065 (T3)	Intill koncentratorn i nätstationen	–	Ingen signal i nätet. Bakgrundsbrus.	Ons 8/3 2006 kl 13.27
4	T0066 (T4)	Intill koncentratorn i nätstationen	–	Ingen signal i nätet. Bakgrundsbrus.	Ons 8/3 2006 kl 13.37
5	T0067 (T5)	Intill koncentratorn i nätstationen	–	Ingen signal i nätet. Bakgrundsbrus.	Ons 8/3 2006 kl 13.48
6	T0068 (T6)	Intill koncentratorn i nätstationen	–	Ingen signal i nätet. Bakgrundsbrus.	Ons 8/3 2006 kl 13.57
7	T0066 (T4)	Vägguttag på vinden vid Jungfruvägen 85 A	–	Ingen signal i nätet. Bakgrundsbrus.	Tors 9/2 2006 kl 11.00
8	T0066 (T4)	Vägguttag på vinden vid Jungfruvägen 85 A	≈ 15 m	Transmitter 114996 vid denna adress, försöker kommunicera med koncentrator.	Tors 9/2 2006 kl 11.02
9	T0066 (T4)	Vägguttag på vinden vid Jungfruvägen 85 A	≈ 15 m	Transmitter 114996 vid denna adress, kommunicerar med koncentrator.	Tors 9/2 2006 kl 11.15
10	T0066 (T4)	Intill koncentratorn i nätstationen	33 m	Transmitter 115030 vid Jungfruvägen 85 A kommunicerar med koncentrator.	Tors 9/2 2006 kl 12.02
11	T0066 (T4)	Intill koncentratorn i nätstationen	86 m	Transmitter 216908 vid Jungfruvägen 77 B kommunicerar med koncentrator.	Tors 9/2 2006 kl 14.12
12	T0066 (T4)	Intill koncentratorn i nätstationen	211 m	Transmitter 115495 vid Jungfruvägen 103 A försöker kommunicera med koncentrator.	Tors 9/2 2006 kl 13.58
13	T0066 (T4)	Intill koncentratorn i nätstationen	211 m	Transmitter 115495 vid Jungfruvägen 103 A försöker kommunicera med koncentrator.	Tors 9/2 2006 kl 13.59
14	T0066 (T4)	Intill koncentratorn i nätstationen	211 m	Transmitter 115492 vid Jungfruvägen 103 A kommunicerar med koncentrator.	Tors 9/2 2006 kl 14.01

Tabell 5-4. Sammanställning av de mätningar som genomförts på Senea-systemet, samt betingelser för respektive mätning.

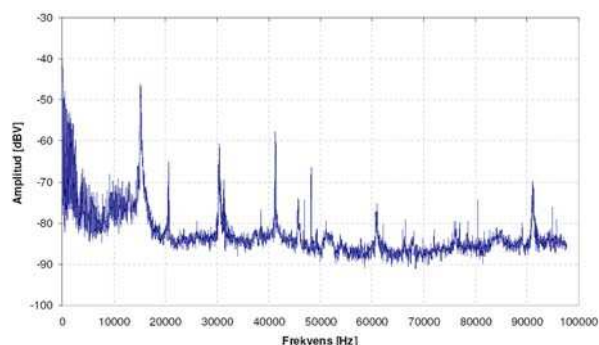
Alla frekvensspektrum som erhållits vid mätningarna nedan är medelvärdesspektrum över ca 10 sekunders mättid, om inte annat anges. Amplitudskalan hos frekvensspektrummen nedan ges med dBV. Genom att addera 120 dB till visat värde erhålls dBμV.

Mätning 1–6 vid nätstationerna T1–T6

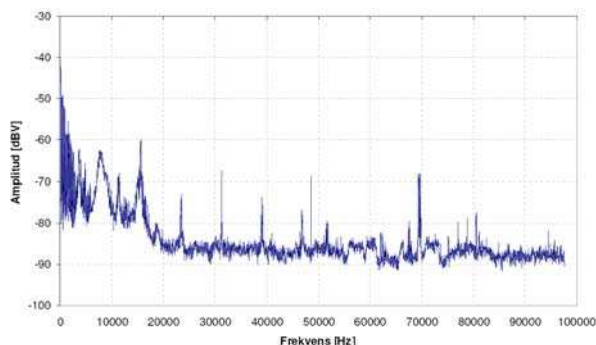
De sex inledande mätningarna i Senea-systemet genomfördes vid de olika nätstationerna i Bojsenburg där koncentratorn till varje delsystem sitter. Dessa mätningar gjordes för att studera och jämföra bakgrundsbruset på fas L1 där Senea-systemet signalerar, vid de sex olika koncentratorerna. Eftersom systemet har uppvisat varierande statistisk prestanda i

delsystemen, med sämst kvalitet hos elnätss kommunikationen under nätstationerna T3 och T4, är det intressant att jämföra signalmiljöerna vid dessa koncentratorer med de övriga för att se eventuella skillnader i störningskaraktärstiken. Samtliga sex mätningar genomfördes i respektive nätstation (se *Appendix, fig. A5* för områdeskarta) efter att koncentratorn gjorts spänningslös och inte kunnat initiera kommunikation i elnätet. Därmed är de uppmätta frekvensspektrumen fria från Senea-signaler och visar bara det bakgrundsbrus som finns i nätet.

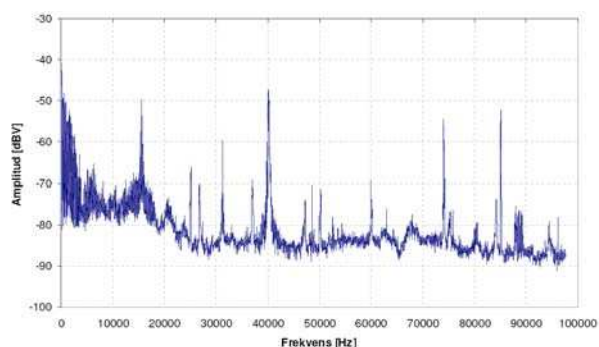
Figur 5-28 – 5-33 nedan visar erhållna frekvensspektrum från mätning 1–6.



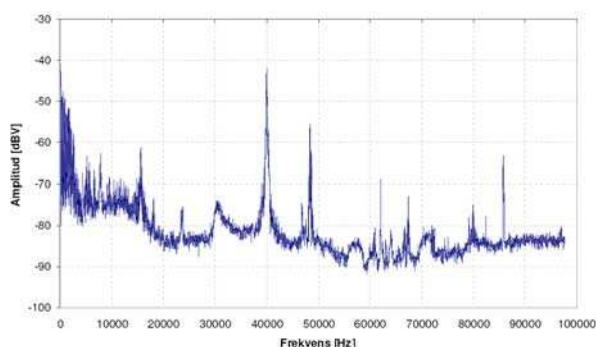
Figur 5-28. Mätning 1: Frekvensspektrum av bakgrundsbrus på fas L1 i nätstation T1. Medelvärdesspektrum över ca 20 sek.



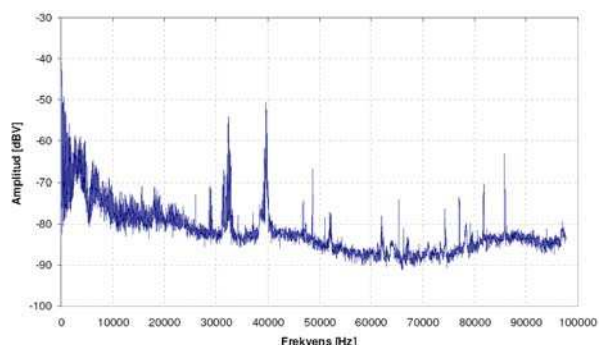
Figur 5-29. Mätning 2: Frekvensspektrum av bakgrundsbrus på fas L1 i nätstation T2. Medelvärdesspektrum över ca 20 sek.



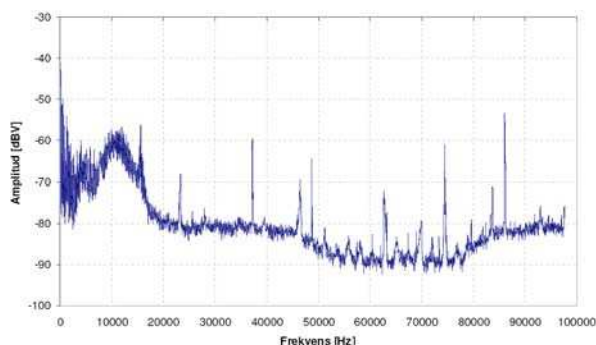
Figur 5-30. Mätning 3: Frekvensspektrum av bakgrundsbrus på fas L1 i nätstation T3. Medelvärdesspektrum över ca 20 sek.



Figur 5-31. Mätning 4: Frekvensspektrum av bakgrundsbrus på fas L1 i nätstation T4. Medelvärdesspektrum över ca 20 sek.



Figur 5-32. Mätning 5: Frekvensspektrum av bakgrundsbrus på fas L1 i nätstation T5. Medelvärdesspektrum över ca 20 sek.



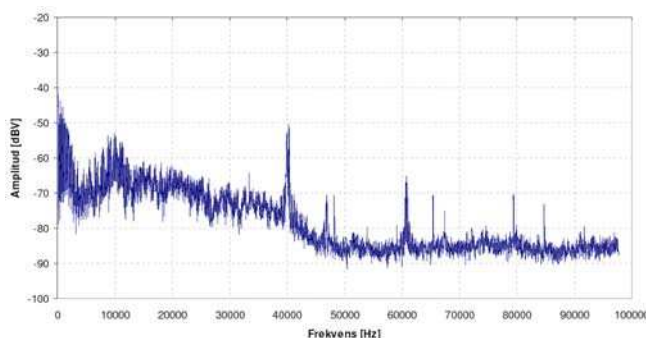
Figur 5-33. Mätning 6: Frekvensspektrum av bakgrundsbrus på fas L1 i nätstation T6. Medelvärdesspektrum över ca 20 sek.

I resultaten från ovanstående mätningar ser vi att bruskaraktäristiken vid de sex olika nätstationerna ser i stort sett liknande ut. I det för Senea-kommunikationen relevanta bandet 52–76 kHz ligger brusnivån hos alla spektrum under –80 dBV (0,1 mV) så när som på några få toppar med något högre amplitud. De största frekvenstopparna i bandet, med amplituder på –55 respektive –62 dBV, ser vi i nätstation T3 och T6, men ingen av dessa sammanfaller med någon av Seneas bärvågsfrekvenser.

Mätning 7–9 vid Jungfruvägen 85 A

Följande tre mätningar genomfördes ur ett vägguttag i ett vindsutrymme på Jungfruvägen 85 A. Vid denna adress har statistik visat att elnätskommunikationen mellan transmittar och koncentratorn fungerar förhållandevis bra. För att skaffa en uppfattning om hur de informationsbärande signalerna hos Senea-systemet ser ut nära den transmitterande källan, dvs. Senea-transmittern, så valdes denna adress som representativ mätpunkt.

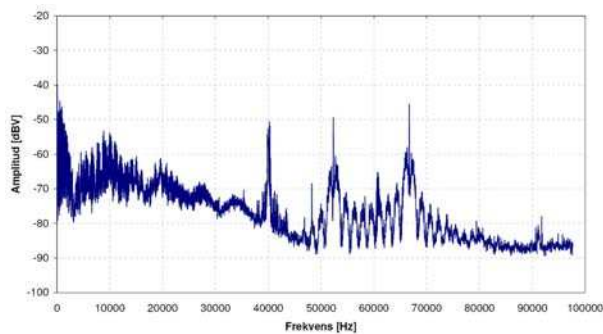
För att studera bakgrundsbruset vid mätpunkten bröts strömmen till koncentratorn i nätstationen, vilket medförde att ingen elnätskommunikation kunde initieras. Figur 5-34 nedan visar bakgrundsbrusets frekvensspektrum, uppmätt då ingen signal fanns i nätet.



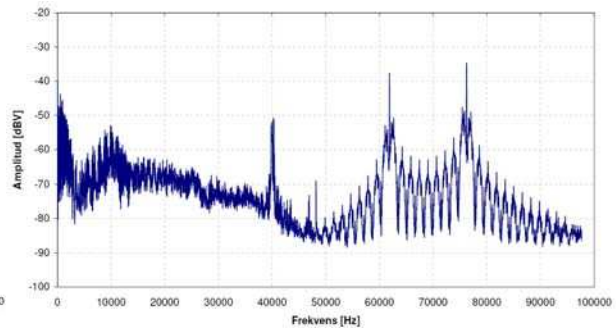
Figur 5-34. Mätning 7: Frekvensspektrum av bakgrundsbrus vid Jungfruvägen 85 A.

Vi ser att bakgrundsbruset ser ut att ligga på en relativt jämn nivå kring –85 dBV (35 dB μ V) i det intressanta intervallet 52–76 kHz. Kring 61 kHz lägger vi dock märke till en frekvenstopp som ligger oroväckande nära en av de fyra frekvenserna där Senea-systemet signalerar, 61,905 kHz. Att identifiera var denna frekvenskomponent kommer ifrån är svårt, men en kvalificerad gissning är det är ett impulsbrus som är synkront med den horisontella uppdateringsfrekvensen hos en TV eller monitor.

För att studera frekvensspektrum vid denna punkt då en transmitter i huset kommunicerar med koncentratorn, lät personal på Falu Elnät kontakta några av dessa transmittar med hjälp av det centrala insamlingssystemet. Figur 5-35 nedan visar hur transmitter 114996 vid denna adress blivit avfrågad av koncentratorn, och försöker överföra data till denna. Vi ser att transmittern sänder på frekvenspar 1, dvs. vid 52,381 samt 66,667 kHz. Efter att ha försökt sända data till koncentratorn utan framgång under ungefär en halv minut, bytte transmittern till det andra frekvensparet vid 61,905 respektive 76,190 kHz, vilket visas i figur 5-36. Efter att ha försökt sända på detta frekvenspar under en liten stund, lyckas transmittern slutligen överföra mätarställningsdata till koncentratorn med framgång.



Figur 5-35. Mätning 8: Frekvensspektrum då transmitter 114996 försöker kommunicera med koncentratorn. Sänder på frekvenspar 1.



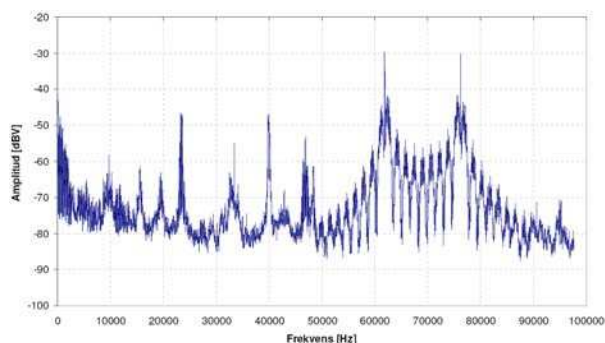
Figur 5-36. Mätning 9: Frekvensspektrum då transmitter 114996 kommunicerar med koncentratorn. Sänder på frekvenspar 2.

Mätning 10–14 vid nätstation T0066 (T4)

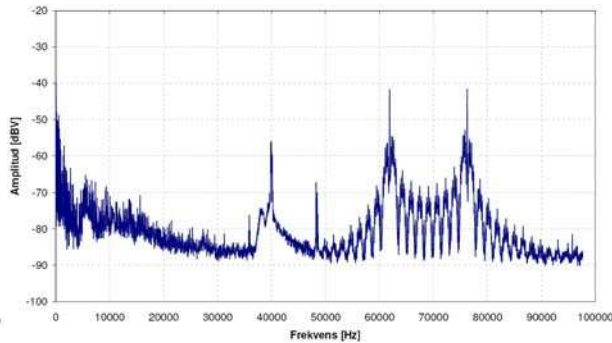
För att få en förståelse för störnings- och dämpningsproblematik som uppenbarligen är omfattande hos Senea-kommunikationen, krävs en bild av den signalmiljö som koncentratorn upplever. Det är intressant att t.ex. jämföra signalnivåer i nätet då en närbelägen respektive avlägsen transmitter sänder data, för att se tecken på eventuell dämpning. Dessutom är det av intresse att vid koncentratorn studera karaktäristiken hos det bakgrundsbrus som kan störa informationsbärande signaler i elnätet. För att skaffa en uppfattning om hur de informationsbärande signalerna hos Senea-systemet ser ut nära den mottagande enheten, dvs. Senea-koncentratorn, så valdes nätstation T4 som representativ mät punkt.

I mätning 4 ovan uppmättes bakgrundsbrusets frekvensspektrum på fas L1 i nätstationen. Figur 5-31 ovan visar bakgrundsbrusets frekvensspektrum, uppmätt då ingen signal fanns i nätet. Vi ser att amplituden hos bakgrundsbruset ligger under -80 dBV (40 dB μ V), förutom två toppar vid $62,04$ respektive $67,4$ kHz, i det intressanta intervallet 52 – 76 kHz. Frekvenstoppen vid $62,04$ kHz ligger nära $61,905$ kHz där Senea signalerar och kan tänkas påverka kommunikationen, men den har inte så stor amplitud att det borde vara någon fara. Dessutom kan systemet, i händelse av störningar vid denna frekvens, byta till det andra frekvensparet för signalering där istället.

För att jämföra den mottagna signalen från olika transmittar hos koncentratorn, lät personal på Falu Elnät kontakta olika transmittar med hjälp av det centrala insamlingssystemet. Inledningsvis kontaktades ett par transmittar vars elnätskommunikation uppvisat god statistisk kvalitet. Den första av dessa har transmitter-ID 115030 och sitter i en lägenhet nära nätstationen. Kabellängden mellan transmittern och koncentratorn är ca 33 m. Transmitterns signaler vid koncentratorn i nätstationen registrerades i mätning 10. Figur 5-37 nedan visar frekvensspektrum för denna mätobservation, där vi ser transmitterns signaler tydligt markerade vid $61,905$ respektive $76,190$ kHz. Signalamplituden vid dessa frekvenser uppgår till ca -30 dBV (90 dB μ V). Vid mätning 11 initierades kommunikation mellan koncentratorn och transmitter 216908. Även denna transmitter har enligt den statistik som förts över systemet, en förhållandevis god kvalitet i sin elnätskommunikation. Denna transmitters kabelavstånd till koncentratorn är ca 86 m, dvs. något längre än transmittern i föregående mätning. Figur 5-38 nedan visar frekvensspektrum för den mottagna signalen hos koncentratorn, i mätning 11. De informationsbärande signalerna från transmittern syns tydligt vid frekvenserna $61,905$ respektive $76,190$ kHz. Signalamplituden vid dessa frekvenser uppgår till ca -42 dBV (78 dB μ V).

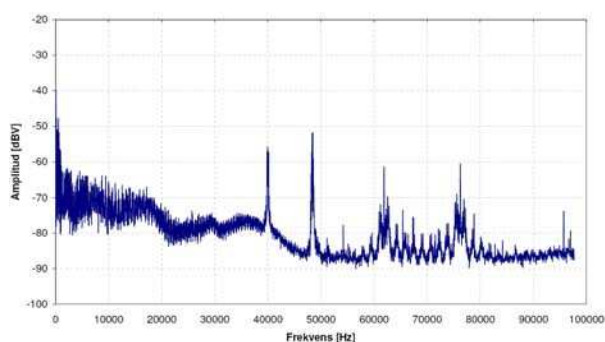


Figur 5-37. Mätning 10: Frekvensspektrum då transmitter 115030 kommunicerar med koncentrator.

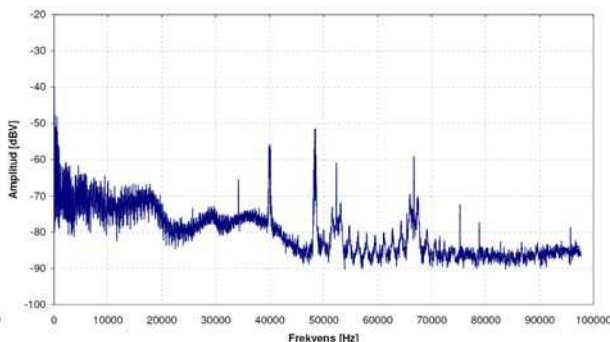


Figur 5-38. Mätning 11: Frekvensspektrum då transmitter 216908 kommunicerar med koncentrator.

I mätning 12 initierades kommunikation med transmitter 115495 som uppvisat dålig statistisk kvalitet i sin elnätssamkommunikation. Denna transmitter har ett betydligt längre avstånd, 211 m, till koncentratorn i nätstationen. Figur 5-39 nedan visar frekvensspektrum med signalering från denna transmitter i elnätet. Dess signaler kan uppfattas vid frekvenspar 2, dvs. 61,905 respektive 76,190 kHz. Signalamplituden är dock jämförelsevis låg, knappt -60 dBV (60 dB μ V). Ur dessa signaler lyckades koncentratorn inte tolka transmitterns mätarställningsdata. Istället började transmittern då sända på det alternativa frekvensparet, vid 52,381 respektive 66,667 kHz. I mätning 13 registrerades denna signal, vars frekvensband syns någorlunda tydligt i figur 5-40 nedan. Signalamplituden är naturligtvis lika låg även vid detta frekvenspar, dvs. knappt -60 dBV (60 dB μ V). Inte heller ur denna signal lyckas koncentratorn detektera den sända mätarställningsdatan från transmittern.



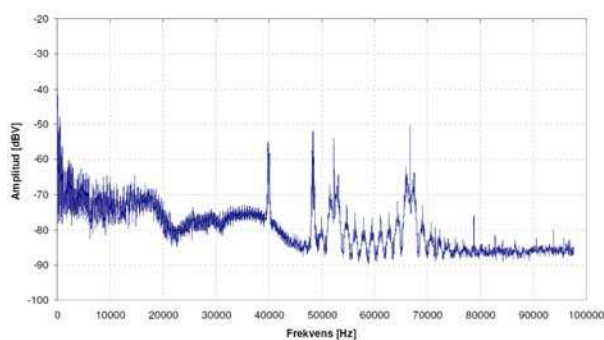
Figur 5-39. Mätning 12: Frekvensspektrum då transmitter 115495 försöker kommunicera med koncentrator. Frekvenspar 2.



Figur 5-40. Mätning 13: Frekvensspektrum då transmitter 115495 försöker kommunicera med koncentrator. Frekvenspar 1.

Det verkar alltså som att signalerna, till följd av dämpning i elledningarna, tappar alltför mycket effekt mellan transmittern och koncentratorn. Detta problem stämmer väl överens med förväntningarna, då statistik visat att kvaliteten hos elnätssamkommunikationen avtar ju längre en transmitter befinner sig från koncentratorn. Däremot fungerar kommunikationen ganska bra vid enstaka transmitttrar som befinner sig långt från koncentratorn, och i mätning 14 studeras signalen från transmitter 115492, som sitter i samma trapphus som transmitter 115495 ovan. Figur 5-41 nedan visar uppmätt frekvensspektrum vid koncentratorn, med signalering från denna transmitter. Den informationsbärande signalen framstår som ganska tydlig vid frekvenspar 1, och har amplitud på ca -52 dBV (68 dB μ V). Vid denna mätning

lyckades transmittern överföra korrekta mätarställningsdata till koncentratorn, så denna signal tycks alltså ha tillräcklig signalstyrka.



Figur 5-41. Mätning 14: Frekvensspektrum då transmitter 115492 kommunicerar med koncentrator.

5.2.3 Resultat från mätningar i Enermet-systemet

Följande tabell 5-5 redovisar vilka mätningar som gjorts i Enermet-systemet, och speciella betingelser som gäller för dessa. Syftet med denna tabell är att på ett enkelt sätt kunna överblicka de mätningar som gjorts. Kommande textavsnitt beskriver resultaten från de enskilda mätningarna.

Mätning nr	Nätstation	Mätpunkt	Systemaktivitet	Tidpunkt
1	T0695	Vägguttag i källaren vid Promenaden 19	Ingen signal i nätet. Bakgrundsbrus.	Ons 22/2 2006 kl 13.54
2	T0695	Vägguttag i källaren vid Promenaden 19	Transmitter vid denna adress kommunicerar med koncentratorn.	Ons 22/2 2006 kl 14.01
3	T0695	Vägguttag i källaren vid Promenaden 19	Transmitter vid denna adress kommunicerar med koncentratorn.	Ons 22/2 2006 kl 14.06
4	T0695	Vägguttag i källaren vid Kvarteret Pilen	Försöker installera transmitter vid anläggningen och få kontakt med koncentratorn.	Ons 22/2 2006 kl 09.54
5	T0695	Vägguttag i källaren vid Kvarteret Pilen	Bakgrundsbrus med frekvensstyrda fläktar och fjärrvärmepumpar i huset frånsagna.	Ons 22/2 2006 kl 13.14
6	T0695	Vägguttag i källaren vid Kvarteret Pilen	Bakgrundsbrus upp till 1,5 MHz.	Ons 22/2 2006 kl 10.34
7	T0695	Fas L1 på plint i nätstation T0695.	Ingen signal i nätet. Bakgrundsbrus.	Ons 1/3 2006 kl 11.15
8	T0695	Fas L1 på plint i nätstation T0695.	Kommunikation mellan koncentrator och transmitter vid Promenaden 19.	Ons 1/3 2006 kl 11.16
9	T0592	Vägguttag intill elmätarna hos Preem Jungfrurondellen	Ingen signal i nätet. Bakgrundsbrus.	Ons 22/2 2006 kl 14.25
10	T0592	Vägguttag intill elmätarna hos Preem Jungfrurondellen	Ingen signal i nätet. Bakgrundsbrus upp till 1,5 MHz.	Ons 22/2 2006 kl 14.26
11	T0025	Fas L1 på plint i nätstation T0025.	Ingen signal i nätet. Bakgrundsbrus.	Ons 22/2 2006 kl 10.13
12	T0025	Fas L1 på plint i nätstation T0025.	Kommunikation mellan koncentrator och transmitter vid Herrhagsvägen 37.	Ons 22/2 2006 kl 10.18
13	T0025	Fas L1 på plint i nätstation T0025.	Kommunikation mellan koncentrator och transmitter vid Herrhagsvägen 37.	Ons 22/2 2006 kl 10.19

Tabell 5-5. Sammanställning av de mätningar som genomförts på Enermet-systemet, samt betingelser för respektive mätning.

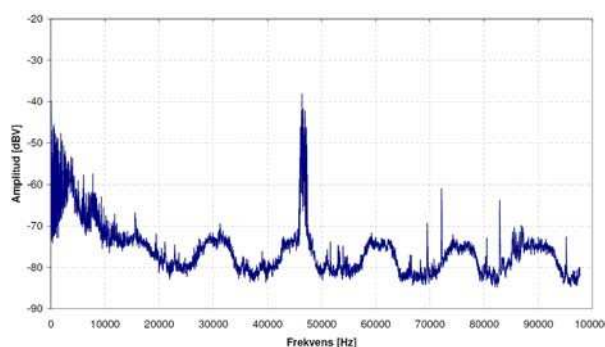
De frekvensspektrum som erhållits vid mätningarna nedan är endera medelvärdesspektrum över ca 10 sekunders mättid eller toppvärdesspektrum under motsvarande tidsperiod. Amplitudskalan hos frekvensspektrummen nedan ges med dBV. Genom att addera 120 dB till visat värde erhålls dB μ V.

Mätning 1–3 vid Promenaden 19

De tre inledande mätningarna i Enermet-systemet genomfördes ur ett vägguttag i ett källarutrymme på Promenaden 19 (se *Appendix, fig. A6* för karta). Vid denna adress sitter en ML10-transmitter med PLT-22-modem för insamling av fastighetens timvärda elförbrukning. Erfarenhet inom Falu Elnät visar att elnätskommunikationen mellan transmittern och koncentratorn fungerar bra vid denna anläggning. För att skaffa en uppfattning om hur de informationsbärande signalerna hos Enermet-systemet ser ut nära den transmitterande källan

vid en anläggning där elnätskommunikationen fungerar bra, utgör just Promenaden 19 ett lämpligt exempel.

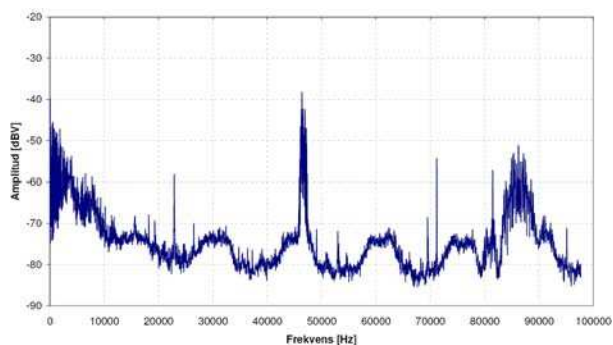
För att studera bakgrundsbruset vid mätpunkten uppmättes frekvensspektrumet då ingen elnätskommunicerande aktivitet pågick i anläggningen. Figur 5-42 nedan visar bakgrundsbrusets frekvensspektrum, uppmätt då ingen signal fanns i nätet.



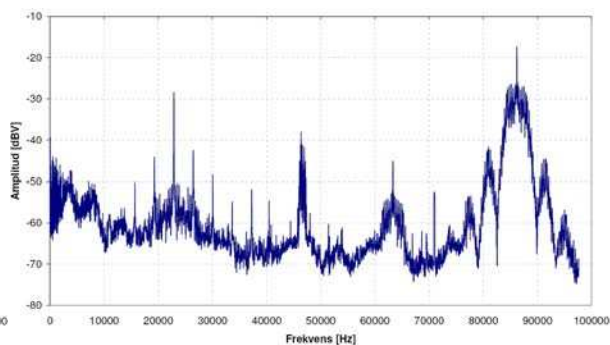
Figur 5-42. Mätning 1: Frekvensspektrum av bakgrundsbrus vid Promenaden 19.

Vi ser att bakgrundsbruset uppvisar puckelliknande former med 15 kHz-repetitioner över hela det uppmätta frekvensbandet. Var dessa synkront återkommande frekvenskomponenter härrör ifrån återkommer vi till i kommande mätresultat. De för Enermet-systemet mest väsentliga störningarna i intervallet 75–86 kHz varierar mellan ca –83 och –70 dBV. Kring ca 46 kHz lägger vi märke till en frekvensspik med stor amplitud, men då denna inte sammanfaller med Enermet-signalernas frekvensband påverkar den heller inte elnätskommunikationen hos systemet.

För att studera frekvensspektrum vid denna punkt då ML10-transmittern i huset kommunicerar med koncentratorn, lät personal på Falu Elnät kontakta denna transmitter med hjälp av det centrala insamlingssystemet. Figur 5-43 nedan visar frekvensspektrum då transmittern blivit avfrågad av koncentratorn, och överför data till denna. Detta spektrum är medelvärdesbildat över ca 5 sekunder. Vi ser att transmittern sänder på den primära frekvensen, dvs. 86 kHz. För att studera den maximala amplituden som signalen når vid kommunikationen mellan transmittern och koncentratorn, studeras även toppvärdesspektrum över ca 20 sekunders mättid i figur 5-44. Där kan vi se att signalamplituden vid datasändning från transmittern maximalt uppnår ca –18 dBV (102 dB μ V) vilket är drygt 50 dBV högre än nivån hos bakgrundsbruset vid denna frekvens.



Figur 5-43. Mätning 2: Frekvensspektrum då transmitter i anläggningen kommunicerar med koncentrator. Medelvärdesspektrum över ca 5 sek.

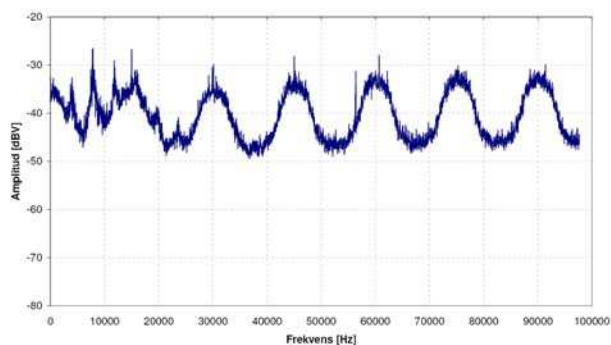


Figur 5-44. Mätning 3: Frekvensspektrum då transmitter i anläggningen kommunicerar med koncentrator. Toppvärdesspektrum över ca 20 sek.

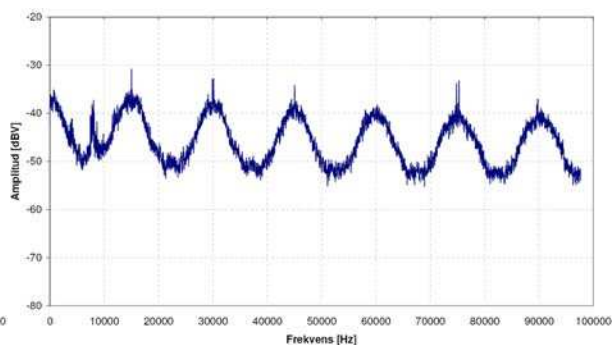
Mätning 4–6 vid Kvarteret Pilen

Mätning 4, 5 och 6 i Enermet-systemet genomfördes ur ett vägguttag vid el-centralen i ett av fyra bostadshus vid Kvarteret Pilen (se *Appendix, fig. A6* för karta). Samtliga av dessa fyra huskroppar har gemensam 0,4 kV-matning från näststation T0695 och denna matning fördelas i ett ställverk i det hus där mätningarna genomfördes. Vid el-centralen där mätningarna ägde rum har man tidigare gjort försök att installera en ML10-transmitter för timvärdesinsamling från fastighetsmätaren. Men dessa installationsförsök har aldrig lyckats, då transmittern indikerat på ”band in use”, dvs. att frekvensbanden för dess elnätskommunikation varit störda.

För att skaffa en uppfattning om hur signalmiljön ser ut i en anläggning där man inte lyckats installera Enermets elnätskommunicerande terminaler, utgör Kvarteret Pilen ett av tre exempel hos Falu Elnät. Figur 5-45 nedan visar uppmätt frekvensspektrum i mätning 4. Mätningen gjordes då en ML10-transmitter monterats på en elmätare och man försökte få den att kommunicera med koncentratorn. Mätningen är gjord på samma fas som transmittern sänder data på, men trots det kan vi inte se några tecken på signalering vid vare sig 75 eller 86 kHz i figur 5-45. Däremot ser vi att signalmiljön är kraftigt störd över hela det uppmätta frekvensbandet. Frekvensspektrumet uppvisar puckelliknande former med 15 kHz synkront återkommande repetitioner. Störningsnivån uppgår till drygt –30 dBV (90 dBμV) i topparna av detta spektrum, och vid 75 respektive 86 kHz där Enermet-systemet signalerar uppgår störningsnivån till ca –30 respektive –40 dBV (90 resp. 80 dBμV). Det uppmätta frekvensspektrumet i mätning 4 är ett medelvärdesspektrum över ca 10 sekunders mättid.



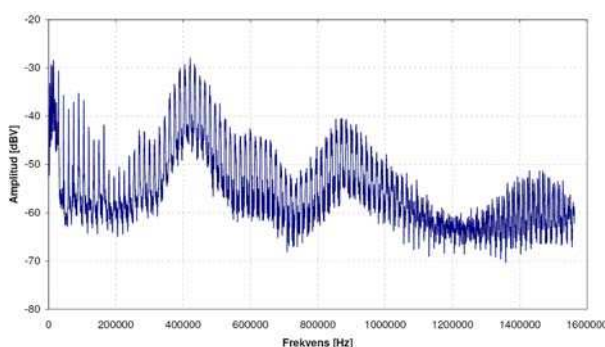
Figur 5-45. Mätning 4: Frekvensspektrum vid försök att installera ML10- transmitter i anläggningen. Medelvärdesspektrum över ca 10 sek.



Figur 5-46. Mätning 5: Frekvensspektrum av bakgrundsbrus i anläggningen med frekvensstyrd utrustning frånslagen. Medelvärdesspektrum över ca 10 sek.

Eftersom det är känt att fläktar för frånluft och fjärrvärmepumpar i de olika huskropparna som bildar Kvarteret Pilen är frekvensstyrda, kan man förmoda att de störningar som syns mätning 4 kommer från denna utrustning. Störningskaraktäristiken uppvisar stora likheter med frekvensspektrum från motordrifter som uppmätts i labbmiljö [14]. Genom att slå ifrån denna frekvensstyrning i huset där mätningen genomfördes, för att i mätning 5 studera eventuella skillnader i signalmiljön med och utan frekvensstyrning, erhöles frekvensspektrum i figur 5-46 ovan. Vi ser att störningarna ligger kvar, även om dess nivå sjunkit något jämfört med i mätning 4. Anledningen att störningarna är kvar i nätet trots att vi stängt av den frekvensstyrda utrustningen i huset, är med största sannolikhet att de kommer från de andra huskropparna i kvarteret, som har samma typ av frekvensstyrd apparatur och som inte var frånslagen vid mättillfället. Dessa störningar tycks alltså fortplanta sig i elnätet till grannhuset där mätningen ägde rum.

Vid mätning 6 vid Kvarteret Pilen studerades bakgrundsbrusets frekvensspektrum upp till 1,5 MHz, för att se hur störningarna ser ut vid högre frekvenser. Figur 5-47 nedan visar detta frekvensspektrum, och vi ser att störningarna är påtagliga även vid högre frekvensområden.



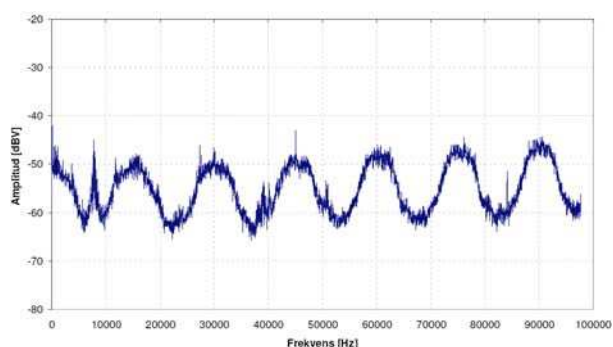
Figur 5-47. Mätning 6: Frekvensspektrum av bakgrundsbrus upp till 1,5 MHz. Medelvärdesspektrum över ca 10 sek.

Mätning 7–8 vid nätstation T0695

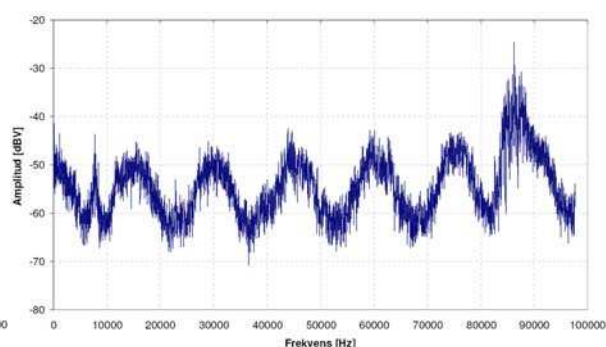
Signalmiljöns frekvensspektrum har även uppmätts vid nätstation T0695 som matar de anläggningar där mätningarna 1–6 ovan genomfördes (se *Appendix, fig. A6* för karta). Syftet med detta är att studera de störningar som koncentratorn i stationen upplever, och som kan påverka kvaliteten hos elnätssamkommunikationen i området.

Vid mätning 7 i nätstationen studerades bakgrundsbruset på fas L1 där signaleringen sker. Figur 5-48 nedan visar ett medelvärdesspektrum av bakgrundsbruset över ca 10 sek. Vi ser att signalmiljön är kraftigt störd över hela det uppmätta frekvensbandet upp till 100 kHz, med ett snarlikt spektrum som erhöles vid mätning 5 ovan. Störningsnivån är något lägre än i mätning 5 och uppgår till drygt –50 dBV (70 dB μ V) i topparna. Vid 75 respektive 86 kHz där Enermet-systemet signalerar uppgår störningsnivån till ca –47 respektive –55 dBV (73 resp. 65 dB μ V).

Vid mätning 8 i samma punkt studerades frekvensspektrumet då kommunikation pågår mellan koncentratorn och en underliggande transmittor. Figur 5-49 nedan visar ett medelvärdesspektrum över ca 5 sek, där signalering sker vid den primära frekvensen 86 kHz. Frekvenstoppen vid 86 kHz är inte så hög i förhållande till bakgrundsbruset, men uppenbarligen tillräcklig för att kunna koncentratorn ska kunna detektera rätt data ur signalen.



Figur 5-48. Mätning 7: Frekvensspektrum av bakgrundsbrus på fas L1 i vid koncentratorn. Medelvärdesspektrum över ca 10 sek.



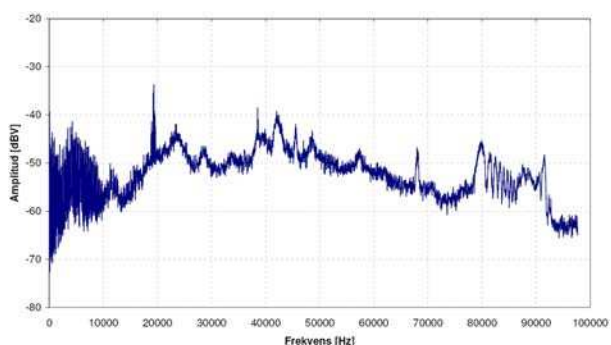
Figur 5-49. Mätning 8: Frekvensspektrum vid kommunikation mellan koncentrator och transmittor. Medelvärdesspektrum över ca 5 sek.

Mätning 9–10 vid Jungfrurondellen

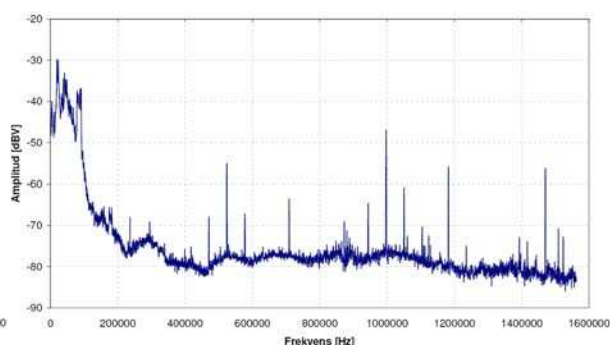
En annan anläggning hos Falu Elnät där man försökt installera Enermets elnätssamkommunicerande terminaler utan framgång är bensinmacken Preem vid Jungfrurondellen i Falun. Följande mätningar genomfördes därför i ett vägguttag invid elcentralen i denna anläggning, för att studera signalmiljön och karaktäristiken hos eventuella störningar.

Vid mätning 9 och 10 studerades bakgrundsbruset i anläggningen. Figur 5-50 nedan visar ett medelvärdesspektrum av bakgrundsbruset över ca 10 sek. Vi ser att signalmiljön är kraftigt störd över hela det uppmätta frekvensbandet upp till 100 kHz, med en jämn brusmatta kring ca –50 dBV (70 dB μ V). Vid 75 respektive 86 kHz där Enermet-systemet signalerar uppgår störningsnivån till ca –57 respektive –54 dBV (63 resp. 66 dB μ V). I mätning 10 studerades bakgrundsbrusets frekvensspektrum upp till 1,5 MHz, för att se hur störningarna ser ut vid

högre frekvenser. Figur 5-51 nedan visar detta frekvensspektrum, och vi ser att störningarna avtar till mer ”normala” nivåer vid frekvenser över 100 kHz. Även detta spektrum är medelvärdesbildat över ca 10 sekunder.



Figur 5-50. Mätning 9: Frekvensspektrum av bakgrundsbrus i anläggningen. Medelvärdesspektrum över ca 10 sek.

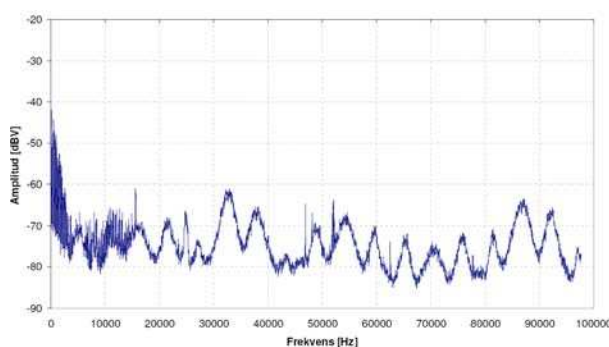


Figur 5-51. Mätning 10: Frekvensspektrum av bakgrundsbrus upp till 1,5 MHz i anläggningen. Medelvärdesspektrum över ca 10 sek.

Mätning 11–13 vid T0025

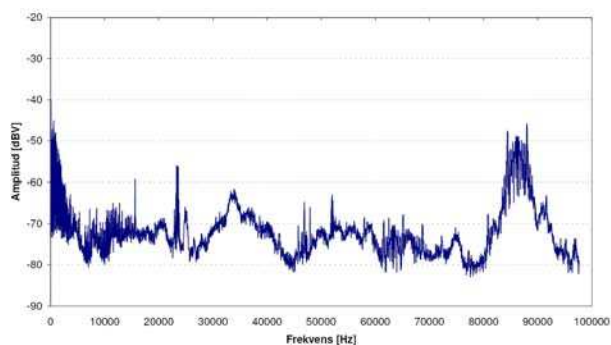
För att studera signalmiljön vid en koncentrator där elnätskommunikationen uppvisar felfri prestanda, har mätningar även gjorts vid nätstation T0025 i bostadsområdet Herrhagen i Falun.

Vid mätning 11 studerades bakgrundsbruset på fas L1 vid denna koncentrator. Figur 5-52 nedan visar ett medelvärdesspektrum av bakgrundsbruset över ca 10 sek. Vi ser att brusnivån är förhållandevis låg, med amplituder på ca –75 respektive –65 dBV (45 resp. 55 dBμV).

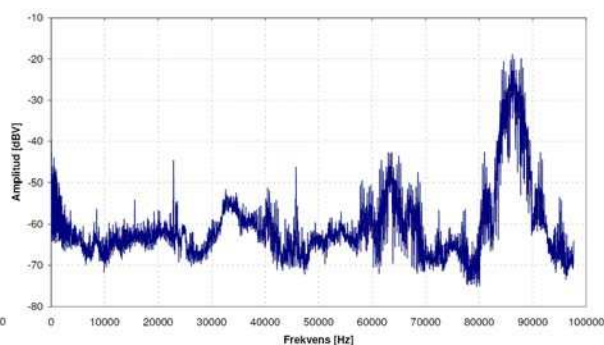


Figur 5-52. Mätning 11: Frekvensspektrum av bakgrundsbrus vid koncentrator i T0025. Medelvärdesspektrum över ca 10 sek.

Vid mätning 12 och 13 i samma punkt studerades frekvensspektrumet då kommunikation pågår mellan koncentratorn och en underliggande transmitter. Figur 5-53 nedan visar ett medelvärdesspektrum över ca 5 sek, där signalering sker vid den primära frekvensen 86 kHz. I figur 5-54 ser vi toppvärdesspektrum över ca 5 sekunders mättid, där signaleringen i elnätet syns tydligt vid 86 kHz.



Figur 5-53. Mätning 12: Frekvensspektrum vid kommunikation mellan koncentrator och transmittor. Medelvärdesspektrum över ca 5 sek.

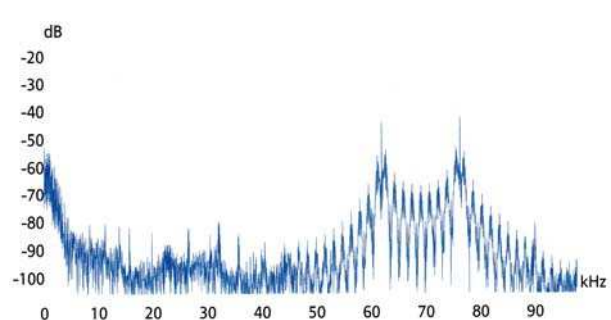


Figur 5-54. Mätning 13: Frekvensspektrum vid kommunikation mellan koncentrator och transmittor. Toppvärdesspektrum över ca 5 sek.

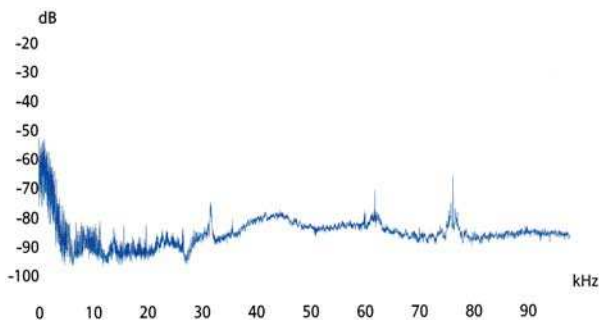
5.3 Jämförelser med liknande tidigare arbeten

Genom kontakt med Gunnar Englund på GKE Elektronik AB, som bistod med hjälp vid mätningar i Senea- och Enermet-systemen, erhöles mätresultat från tidigare mätningar i Senea-systemet som Englund gjort. Dessa mätningar, som gjordes åt Boo Energi, anordnades för att kartlägga problematiken med Senea-systemets elnätsskommunikation i fastigheter med frekvensstyrda fläktar med frekvensomriktare av typ NFO Sinus.

I denna rapport redovisas mätningar i en anläggning där Senea-transmittor sänder data på elnätet. Jämförande mätningar visar frekvensspektrum då frekvensomriktarna är i drift, samt när de är frånslagna. Figur 5-55 nedan visar frekvensspektrum vid Senea-kommunikation i anläggningen och då frekvensomriktarna är frånslagna. De karaktäristiska frekvenstopparna härrörande från Senea-signalerna är tydligt synliga vid 61,905 respektive 76,190 kHz. Figur 5-56 nedan visar uppmätt frekvensspektrum då Senea-kommunikation pågår i anläggningen och då frekvensomriktarna är i drift.



Figur 5-55. Gunnar Englunds mätning i anläggning med Senea-kommunikation, utan frekvensomriktare [12].



Figur 5-56. Gunnar Englunds mätning i anläggning med Senea-kommunikation, med frekvensomriktare [12].

Vi ser en tydlig skillnad i figur 5-56 gentemot då frekvensomriktarna var frånslagna i figur 5-55. En jämn brusmatta kring -85 dBV syns tydligt från ca 30 kHz och uppåt. Senea-signalerna som syns vid 61,905 respektive 76,190 kHz är inte alls lika tydliga som i figur 5-55, vilket emellertid tros bero på att mätningen visar ett medelvärde över en längre tidsperiod, och att sändning inte pågår kontinuerligt [12].

Tack vare Gunnar Englunds mätresultat ser vi hur störningarna från frekvensomriktare kan se ut. Jämför man resultaten från Gunnar Englunds mätningar med de mätresultat som erhållits inom ramen för detta examensarbete, så ser man att mätresultaten i detta arbete inte påvisar någon märkbar störningspåverkan från frekvensomriktare i anläggningarna där Senea-systemet används. Däremot känns störningskaraktäristiken väl igen från de mätresultat som erhöles vid mätning 9–10 i Enermet-systemet vid Preem – Jungfrurondellen, vilket kan tyda på att liknande frekvensstyrd utrustning används vid denna anläggning som i de anläggningar där Englund genomförde sina mätningar.

Inga liknande arbeten eller mätresultat för Turtle- eller Enermet-systemet har kunnat hittas, så dessvärre finns inga möjligheter att jämföra resultaten i detta arbete med andras när de gäller dessa system.

6 Slutsatser

6.1 Allmänna slutsatser

Detta examensarbete visar att elnätet erbjuder ett möjligt, men dåligt anpassat, medium för överföring av informationsbärande signaler. De olika elnätskommunicerande AMR-systemen som utvärderats i detta arbete påverkas i olika omfattning av detta. Kvalitén hos elnätskommunikationen uppvisar stora variationer inom de olika systemen. Faktorer som uppvisar störst störande effekt är signaldämpning till följd av elledningarnas impedans- och lastförhållanden, samt brusstörningar i de frekvensband där systemen signalerar. Dessa störningsproblem är värst i frekvensbandet 9–95 kHz, där störningar från olika sorters elektrisk apparatur inte behöver dämpas enligt dagens EMC-bestämmelser. Störningsrisken hos elnätskommunicerande AMR-system ökar i takt med ett ökat användande av energibesparande frekvensomriktare, lågenergilampor etc. i elnätet [1]. Vid slutskedet av detta examensarbete erhöles även mätresultat från SP (Sveriges provnings- och forskningsinstitut) som visar att anläggningar med elektrisk förbindelse till basstationer för s.k. 3G-telefoni, upplever kraftiga störningar i A-bandet. Att tillämpa signalering i elnätet i allmänhet, och A-bandet i synnerhet, är följaktligen förenat med vissa risker då nätägaren inte kan råda över framtida kundinstallationer och dess generering av störningar i kommunikationsbanden. Problemen med ledningsburet brus kan dock i viss mån avhjälpas genom omsorgsfulla val av de elnätskommunicerande terminalernas placering, identifiering och filtrering av brusstörningar samt nyttjande av signalförstärkande repeater-terminaler.

6.2 Slutsatser kring Turtle

Genom denna fallstudie av Falu Elnäts implementation av Turtle-systemet har vissa slutsatser kring systemets funktion och prestanda kunnat dras. Falu Elnäts utbyggnad av Turtle pågick parallellt med detta examensarbete, och vid examensarbetets avslutande i mars 2006 hade ca 10000 mätpunkter i 12 olika delsystem/koncentratorområden försetts med Turtle-transmittrar. Denna utbyggnad omfattar bara landsbygden och mindre orter i Falu kommun, och inte centralorten Falun.

6.2.1 Slutsatser kring Turtle-statistik

Den statistiska prestanda som Turtle-systemet uppvisar har sammanställts utifrån upprepade observationer av olika parametrar under drygt tre månaders tid. Eftersom Falu Elnäts implementation av Turtle-systemet är ganska omfattande med ungefär 10000 installerade transmittrar och 12 koncentratorer i drift, ger denna analys en rättvis bild av systemets statistiska egenskaper. Det är dock viktigt att komma ihåg att det studerade systemet är

uppbyggt i landsbygdområden och mindre orter, varför denna fallstudie inte bör ses som representativ för systemimplementationer i större städer eller industriområden, där elnätet och dess signalmiljö ser delvis annorlunda ut. Eftersom observationerna i detta examensarbete gjorts under den kallaste tiden på året, mellan november–februari, kan man anta att den sammanställda statistiken motsvarar ett slags ”worst case”-scenario då lasten i elnätet är som störst under denna årstid.

Statistiken som har sammanställts i denna fallstudie av Falu Elnäts implementation av Turtle-systemet, syftar till att kunna studera och dra slutsatser kring

- prestandaskillnader mellan olika delsystem/koncentratorområden
- prestanda vid olika lastförhållanden i elnätet
- förändringar i prestanda efter fysiska omkopplingar i systemet
- punkter i elnätet som utgör intressanta föremål för mätning av signalmiljön.

Utifrån den statistik som presenteras i avsnitt 5.1.1 ovan kan man se att 10 av de 12 koncentratorområdena i Turtle-systemen uppvisar liknande prestanda med i genomsnitt 3 % respektive 1 % transmittar som inte loggat de 3 respektive 7 senaste dygnen. Två koncentratorområden, Falu Norra och Falu Västra, utmärker sig dock med sämre statistisk prestanda. Andelen transmittar som inte loggat, dvs. har dålig elnätskommunikation med koncentratorn, är mycket varierande vid dessa områden. Före omkopplingarna som gjordes i dessa fördelningsstationer hade Falu Norra FS 26 % respektive 9 % transmittar som inte loggat de 3 respektive 7 senaste dygnen, medan Falu Västra FS har 51 % respektive 15 % transmittar som inte loggat de 3 respektive 7 senaste dygnen.

Efter observation 15 i figur 5-1 ser vi att prestandan hos Falu Västra FS förbättras avsevärt, till följd av förändringar i den fysiska kopplingen av de strömtänger som ”avlyssnar” elnätet i fördelningsstationen. I genomsnitt har delsystemet endast 3 % transmittar som inte loggat de 3 senaste dygnen efter denna omkoppling. Denna förbättring syns även i figur 5-2 med andelen transmittar som inte loggat de 7 senaste dygnen.

Efter liknande omkopplingar i Falu Norra FS ser vi att prestandan hos systemet förbättras avsevärt även där. Dessa omkopplingar gjordes efter observation 21 i figur 5-1, varefter man ser ett rejält trendbrott hos andelen transmittar som inte loggat de 3 senaste dygnen, för att i genomsnitt vara 1 %.

Genom att flytta koncentratorns strömtänger från inkommande transformatorfack där all ström till underliggande fack passerar, till de utgående fack under vilka det finns Turtle-transmittar, slipper man ”avlyssna” onödigt ström som inte innehåller några Turtle-signaler. Eftersom lastimpedansen i elnätet är avtagande med ökande ström, och avtagande lastimpedans medför större dämpning av signaler i elnätet, kan vi konstatera att det är fördelaktigt ur signalsynpunkt att ”avlyssna” elnätet vid så låga strömmar som möjligt.

Utifrån statistiken i avsnitt 5.1.1 kan vi också studera detta lastberoende hos prestandan, genom jämförelser mellan andelen Turtle-transmittar som inte loggat och lasten vid den punkt där koncentratorn ”avlyssnar” elnätet. I figur 5-3 och 5-4 ser vi hur andelen transmittar vid Falu Norra FS respektive Falu Västra FS som inte loggat de senaste 3 dygnen uppvisar en viss samvarians med lasten respektive koncentrator ”avlyssnar”. Det framgår tydligt att ökande last medför större svårigheter för Turtle-transmittarna att kommunicera med koncentratorn.

Den statistik som förts över Turtle-systemets prestanda är behäftad med ett allvarligt fel som är viktigt att komma ihåg. Vid observationerna som gjorts av vilka transmittar som inte loggat de 3 eller 7 senaste dygnet, ingår även de transmittar i t.ex. fritidshus som gjorts otillgängliga av kunden genom att slå ifrån huvudströmbrytaren i anläggningen. Det betyder att andelen transmittar som i detta examensarbete sägs uppvisa dålig prestanda är större än vad som verkligen är fallet, eftersom de transmittar som är fränkopplade vid observationstillfället inte behöver ha dålig kommunikation med koncentratorn då den är i inkopplad. Denna ”felkälla” kan dock ses som någorlunda jämnt fördelad mellan de olika koncentratorområdena, så den sammanställda statistiken tjänar sitt syfte med att få en översiktlig bild av systemets prestanda och att jämföra de olika områdena sinsemellan.

6.2.2 Slutsatser kring mätningar i Turtle-systemet

Från de frekvensspektrum som erhållits vid mätningarna i Turtle-systemet kan vissa konkreta slutsatser dras. Signalmiljön i elnätet har observerats vid flera olika punkter där elnätskommunikationen har uppvisat varierande kvalitet. Utifrån mätresultaten är det möjligt att göra jämförande analys och att dra slutsatser om varför kommunikationen i elnätet fungerar bättre eller sämre vid dessa punkter.

Med hjälp av statistik baserad på upprepade observationer av andelen Turtle-transmittar som inte loggat de 3 respektive 7 senaste dagarna, har områden där Turtle-systemet fungerar bra respektive dåligt kunnat ringas in. Vid två av de tolv delsystemen, Falu Norra FS och Falu Västra FS, har särskilt dålig kvalitet hos elnätskommunikationen kunnat konstateras. Mätningar av signalmiljön vid dessa fördelningsstationer har därför genomförts, för att studera störningsproblematiken.

Delsystemet under Falu Västra FS har uppvisat stora problem för koncentratorn att uppfatta de informationsbärande signalerna från underliggande Turtle-transmittar. Mätningar har därför genomförts på precis den signalmiljö som koncentratorn upplever, dvs. på all inkommande last från transformator T4 i Falu Västra FS. Mätning 3 och 4 gav frekvensspektrum för I- respektive Q-kanalen hos den signal som koncentratorn upplever. Dessa spektrum visar att signalmiljön är brusig och det är omöjligt att urskilja vad som är Turtle-signaler och brus i spektrumet. Lasten i mätpunkten var vid båda mättillfällena 8,7 MW. De informationsbärande signalerna kan maximalt ha ca 3 respektive 2,8 μV amplitud i I- respektive Q-kanalen i dessa spektrum. Om vi istället tittar på de frekvensspektrum som erhöles vid mätning 5 så ser vi tydliga spikar i frekvensplanet, motsvarande signalering från varsin Turtle-transmitter. I dessa spektrum ser vi att signalamplituderna är högre än vid mätningarna 3 och 4, och att det omgivande bruset har avsevärt mindre amplitud. Tack vare att mätning 5 skedde på ett utgående fack med en betydligt mindre last än där mätning 3 och 4 genomfördes, ser vi att Turtle-signalerna blir mycket tydligare hos koncentratorn.

Liknande jämförelser av signalmiljön hos inkommande respektive utgående last genomfördes även vid Falu Norra FS och Källtorp FS, som båda upplevt problem då koncentratorn ”avlyssnat” nätet på inkommande fack. Även dessa mätningar bekräftar att signalerna från underliggande Turtle-transmittar är avsevärt tydligare i den mindre lasten på ett utgående fack, än i all last som matar stationen i det inkommande facket. Detta ser vi även i den statistiska utvärderingen av systemet, som uppvisar avsevärt bättre prestanda vid Falu Västra FS och Falu Norra FS efter att ha flyttat koncentratorns ”avlyssning” till utgående istället för inkommande fack. Liknande omkopplingar av koncentratorns strömtänger kan kanske inte ses

som en genrell metod att förbättra Turtle-systemets prestanda i olika implementationer, eftersom interfererande brusstörningar kan komma från samma utgående fack som Turtle-anläggningar.

Slutsatsen härav är att elnätsskommunikationen hos Turtle-systemet får sämre kvalitet med ökande last (ström) i det nätavsnitt där signaleringen sker. Detta konstaterande ligger helt i linje med teorin om signaldämpning i avsnitt 2.1.3.4 där vi såg att dämpningen ökar med strömmen.

Ur de erhållna mätresultaten kan man dra vissa slutsatser om nödvändiga signal-brus-förhållanden (SNR) för att elnätsskommunikationen ska fungera bra, dvs. för att koncentratorn ska kunna detektera rätt information från alla transmittorer ur den signalmiljön som avlyssnas. Vid mätning 7 i Hosjö FS erhöles frekvensspektrum med SNR på ca 4,3 hos både I- och Q-delen av signalen. Eftersom den statistiska prestandan hos delsystemet under Hosjö FS har varit bra, tycks alltså detta signal-brus-förhållande hos koncentratorn vara tillräckligt för att kunna detektera rätt information elnätet. Vid Falu Norra FS har elnätsskommunikationen dock uppvisat sämre statistisk kvalitet. Mätning 1 som genomfördes i den punkt där koncentratorn ”avlyssnar” nätet, visar att signalens I- och Q-del har SNR på ca 3 respektive 2. Detta tycks alltså vara för lite för att detekteringen hos koncentratorn ska fungera utan problem. För att detekteringen ska fungera bra behövs tillräckligt med både reell (I-del) och imaginär (Q-del) information hos den mottagna signalen, och vid Falu Norra FS tycks den mottagna signalen framförallt innehålla för lite imaginär information. Slutsatsen härav är att SNR på 4,3 ser ut att vara tillräckligt för att koncentratorn ska kunna detektera de mottagna Turtle-signalerna, medan SNR på 2–3 ser ut att vara för lite för att kunna uppnå godkänd kvalitet hos elnätsskommunikationen.

Något som är värt att understryka är att de upplevda problemen med Turtle-signaleringen i det analyserade nätet, enligt mätresultaten, framförallt är beroende av dämpning och höga laster. Endast vid en mätpunkt, Källtorp FS, uppmättes i mätning 8 signalmiljöer som ser ut att innehålla rent störande bruskomponenter med stora amplituder i Turtle-signalerings frekvensband. Dessa frekvensstörningar kommer sannolikt från en större industri som matas från denna station, och vi kunde se hur störningarna undviks genom att ”avlyssna” enskilda utgående fack istället för all inkommande last. Utifrån detta kan man alltså konstatera att den främsta källan för brusstörningar kring Turtle-frekvenserna (100 Hz) utgörs av större industrier, vilka oftast kan uteslutas ur Turtle-koncentratorns ”avlyssnade” last. Hur störningskaraktäristiken kring 100 Hz-bandet ser ut vid olika kundanläggningar är däremot en fråga som inte besvaras i detta arbete, men som vore intressant att studera. Vi vet dock att EMC-föreskrifterna förbjuder ansluten utrustning att generera jämna övertoner i nätet, dvs. övertoner vars frekvens är jämna multiplar av nätfrekvensen 50 Hz (se avsnitt 2.1.3.2 *Övertoner*). Eftersom Turtle-signaleringen sker kring 100 Hz, vilket är en jämn överton av nätfrekvensen, är kommunikationen i viss mån skyddad från interfererande toner från ansluten elektrisk apparatur, med hjälp av EMC-reglerna.

6.3 Slutsatser kring Senea CustCom

Genom denna fallstudie av Falu Elnäts implementation av Senea CustCom-systemet har vissa slutsatser kring systemets funktion och prestanda kunnat dras. Falu Elnäts utbyggnad av Senea-systemet omfattade vid examensarbetets avslutande i mars 2006 ca 1080 mätpunkter i 6 olika delsystem/koncentratorområden. Denna utbyggnad omfattar bara bostadsområdet Bojsenburg i Falun, och mätpunkterna sitter i enskilda lägenheter och lokaler i hyreshus. Elnätskommunikationen sker bara i lågspänningsnätet mellan mätpunkterna och koncentratorn som sitter i den matande nätstationen.

6.3.1 Slutsatser kring Senea-statistik

Den statistiska prestanda som Senea-systemet uppvisar har sammanställts utifrån upprepade observationer av olika parametrar under drygt tre månaders tid. Observationerna har gjorts i två omgångar om 14 respektive 12 observationstillfällen. Eftersom Falu Elnäts implementation av Senea-systemet omfattas av drygt 1000 transmittar och 6 koncentratorer i nätområden med samma karaktäristik vad gäller laster och störkällor, ger denna analys en bild av systemets statistiska egenskaper som inte kan ses som representativ för ett generellt elnät.

Eftersom observationerna i detta examensarbete gjorts under den kallaste tiden på året, mellan november–februari, kan man anta att den sammanställda statistiken motsvarar ett slags ”worst case”-scenario då lasten i elnätet är som störst under denna årstid.

Statistiken som har sammanställts i denna fallstudie av Falu Elnäts implementation av Senea-systemet, syftar till att kunna studera och dra slutsatser kring

- prestandaskillnader mellan olika delsystem/koncentratorområden
- prestandaskillnader mellan olika punkter inom ett delsystem
- punkter i elnätet som utgör intressanta föremål för mätning av signalmiljön.

Genom att använda Seneas centrala insamlingssystem för hantering av alla mätpunkter, har systemprestandan kunnat jämföras mellan olika delsystem och olika anläggningar i nätet. Genom att observera vilka transmittar som av systemet tilldelats status DÅLIG, vilket indikerar problem för koncentratorn att kommunicera med denna transmitt, kan man ringa in områden med stor eller liten andel transmittar som har problem.

Figur 5-5 i avsnitt 5.1.2 visar jämförelser mellan de sex olika delsystemen, baserat på dessa observationer. De två observationsomgångarna (observation 1–14 resp. 16–27) återfinns i samma figur. Vid båda observationsomgångarna ser man att delsystemen under nätstation T3 och T4 uppvisar sämst prestanda, med en hög andel transmittar som av systemet tilldelats status DÅLIG, dvs. av någon anledning har problem att kommunicera med sin koncentrator. Varför just dessa delsystem ser ut att fungera sämre än de andra fyra är svårt att säga. Det kan bero på skillnader i signalmiljön hos de olika delsystemen, vilket visserligen är osannolikt eftersom de är i det närmaste identiska ur last- och störningssynpunkt.

Vi ser att andelen transmittar med status DÅLIG hos delsystemen T3 och T4 skiljer sig mycket mellan de två observationsomgångarna. Vid den första observationsomgången är denna andel betydligt större för T3 och T4 än vid den andra observationsomgången. Vad denna skillnad beror på är svårt att säga, men en tänkbar anledning är att många transmittar

under dessa områden kan ha övergått från status DÅLIG till status FÖRLORAD, och därmed inte räknats med i denna statistik. Självklart är det ju också möjligt att prestandan har förbättrats hos dessa delsystem efter den första observationsomgången. Något som dock talar emot detta är att andelen transmittar med status DÅLIG i de övriga 4 delsystemen snarare har ökat än minskat mellan observationsomgångarna.

Hos övriga delsystem verkar elnätssammanställningen fungera något bättre, med mellan 1–15 % transmittar som av systemet tilldelats status DÅLIG. Denna andel varierar mycket mellan observationstillfällena, men ser ut att ligga inom samma intervall vid de två observationsomgångarna.

Statistik har även bildats utifrån 10 observationer av andelen transmittar som inte loggat, dvs. kommunicerat med sin koncentrator, de senaste 7 dygna. Figur 5-6 i avsnitt 5.1.2 illustrerar denna statistik, och vi ser att även denna sammanställning indikerar på problem med elnätssammanställningen hos framförallt områdena T3 och T4.

För att jämföra kvaliteten hos elnätssammanställningen hos anläggningar som befinner sig nära respektive långt ifrån koncentratorn, har statistik även sammanställts för att identifiera enskilda adresser med särskilt bra och dålig prestanda. Denna sammanställning visar ett klart samband mellan kabellängden från koncentratorn till transmittar, och den statistiska prestandan hos elnätssammanställningen. Anläggningar i de yttre ändarna av nätstationsområdena tenderar att ofta ha en större andel transmittar med status DÅLIG, än anläggningar som ligger nära nätstationen. Detta tyder på att signaleffekten dämpas i ledningsriktningen, vilket ger för låga SNR hos koncentratorn för att detektering av sänd information ska kunna genomföras. Dämpningen kan vara en konsekvens av den ökande impedansen i ledningsriktningen, samt förluster som uppstår vid skarvar i kabelskåp mellan nätstationen och kundanläggningen.

Jämförelserna mellan enskilda Senea-transmittar visar också att ett trapphus i ett hus kan ha stor andel kundanläggningar vars transmittar har status DÅLIG, medan andra trapphus i samma huskropp kan vara i det närmaste störningsfritt. Ett fenomen som blir tydligt när man jämför Senea-systemets prestanda i olika trapphus i samma fastighet, är att den ofta är bättre i det trapphus där husets anslutningspunkt till nätet finns. Det kan tyda på två saker. Dels att de störningar som påverkar elnätssammanställningen finns inom huset, dvs. att de härrör från kundernas anläggningar. Dessutom kan det tyda på att den informationsbärande signalen från systemets transmittar blir dämpad och tappas mycket effekt i serviskabeln mellan lägenheten och husets anslutningspunkt, eftersom transmittar med kortare avstånd till denna anslutningspunkt uppvisar bättre funktion. Detta kan mycket väl tänkas bero på de EMC-filter som installerats i husen med Senea-anläggningar för att filtrera bort störningar från frekvensstyrda fläktar. Eftersom dessa filter tar bort störningar i de frekvensband där Senea-systemet signalerar, bör de även dämpa de informationsbärande signalerna i viss mån.

6.3.2 Slutsatser kring mätningar i Senea-systemet

Från de frekvensspektrum som erhållits vid mätningarna i Senea-systemet kan vissa konkreta slutsatser dras. Signalmiljön i elnätet har observerats vid flera olika punkter där elnätssammanställningen har uppvisat varierande kvalitet. Utifrån mätresultaten är det möjligt att göra jämförande analys och att dra slutsatser om varför kommunikationen i elnätet fungerar eller inte fungerar vid dessa punkter.

För att bilda sig en uppfattning om varför de sex olika delsystemen uppvisar så varierande statistisk prestanda vad gäller elnätskommunikationen, har mätningar av frekvensspektrum genomförts vid var och en av de olika nätstationerna. Avsikten med dessa mätningar var att jämföra bakgrundsbruset som de olika koncentratorerna upplever, och se om det finns några utmärkande störningar kring de frekvenser som Senea-systemet tillämpar sin signalering. Mätresultaten visade att brusnivån vid de frekvenser där elnätskommunikationen sker ser låg ut hos alla sex nätstationer, och ligger vid ungefär samma amplitud. Signalmiljön vid de sex koncentratorerna ser alltså ut att vara i stort sett identisk vid de intressanta frekvenserna, och det bör således inte finnas några kvalitetsskillnader hos de olika delsystemens elnätskommunikation. Det går med andra ord inte att utifrån dessa mätresultat dra några konkreta slutsatser kring varför de olika delsystemen uppvisar så olika statistisk prestanda.

För att studera signaleringen från enskilda transmittar i systemet som uppvisat bra respektive dålig status i statistiken, genomfördes några olika mätningar vid delsystemet under nätstation T4. Frekvensspektrum uppmättes vid nätstationen, på den fas som signaleringen sker, vid olika systemaktivitet i nätet. Dels studerades kommunikationen mellan koncentratorn och transmittar vid närbelägna anläggningar i mätning 5 och 6. Det resulterade i tydliga toppar i frekvensspektrumen, motsvarande transmittarnas informationsbärande signaler. I mätning 7 och 8 uppmättes frekvensspektrum vid kommunikation med en transmitter som sitter i en kundanläggning i utkanten av nätstationsområdet. Då man jämför frekvensspektrumen från mätning 5 och 6 med mätning 7 och 8 syns tydliga amplitudskillnader hos de uppmätta signalerna från transmittar med olika avstånd från koncentratorn (mätpunkten). Signalerna från de transmittar som sitter långt ifrån koncentratorn har tappat mycket effekt i elledningarna, och blir för svaga för att kunna detektera hos koncentratorn. Impedansen i kabeln ökar så pass mycket med längden, att vi får en stor dämpning av signaler från avlägsna transmittar. En annan orsak till dämpningen kan tänkas vara de EMC-filer som installerats i området för att ta bort brus från de frekvensstyrda fläktarna i husen. Då signalerna sprids i alla riktningar i nätet passerar de även dessa EMC-filer, vars syfte är att ta bort frekvensinnehåll i de band där Senea-kommunikationen sker.

Vad som är anmärkningsvärt i detta resonemang, är att vissa transmittar med samma ledningslängd till koncentratorn som de i mätning 7 och 8, uppvisar god elnätskommunikation. Vid mätning 9 studerades signaleringen från en transmitter i samma trapphus som den vid mätning 7 och 8. De uppmätta signalerna från denna transmitter i mätning 9 har en högre amplitud än signalerna i mätning 7 och 8, och man kan konstatera att en signalamplitud på -60 dBV (1 mV) är otillräcklig medan -50 dBV (3 mV) verkar räcka för att koncentratorn ska kunna detektera informationen i signalen.

Slutsatsen kring de mätresultat som erhållits är att problemen med elnätskommunikationen hos Falu Elnäts implementation av Senea-systemet inte tycks bestå av störningar i form av brus vid kommunikationsbanden, utan snarare är det på dämpning av signaleffekt i nätet som reducerar prestandan hos systemet. Det är anmärkningsvärt att denna dämpningseffekt blir för stor för Seneas elnätskommunikation redan vid drygt 200 meters kabellängd.

6.4 Slutsatser kring Avalon X-Base från Enermet

Genom denna fallstudie av Falu Elnäts implementation av Enermet-systemet har vissa slutsatser kring systemets funktion och prestanda kunnat dras. Falu Elnäts utbyggnad av Enermet-systemet omfattade vid examensarbetets avslutande i mars 2006 ca 200 mätpunkter i 61 olika delsystem/koncentratorområden. Ungefär en fjärdedel av Falu Elnäts Enermet-implementation består av den äldre PLT-30-tekniken, medan tre fjärdedelar använder den nyare PLT-22-tekniken för elnätskommunikation. Eftersom systemet enbart används för storkonsumenter av el, omfattar Falu Elnäts utbyggnad bara centralorten Falun och industrier i utkanten av staden.

6.4.1 Slutsatser kring Enermet-statistik

Den enda statistik som har kunnat bildas för att ge en uppfattning av prestandan hos Falu Elnäts implementation av Enermet-systemet, grundas på uttalade erfarenheter från tekniker på mätaravdelningen hos Falu Elnät. Endast vid 3 av 199 anläggningar i nätet har man inte lyckats installera ML10-transmittrar för insamling av elförbrukningsdata via elnätet, vilket ger en procentuell andel på 1,5 %. Detta måste anses bra med tanke på att systemet bara används i stadsmiljö där störningar på nätet är vanligare än på landsbygden.

Vid de tre anläggningar som man inte lyckats installera ML10-terminaler har man provat både PLT-30- och PLT-22-teknik, men misslyckats med båda. I övrigt så tycks både PLT-30 och PLT-22 fungera bra i de anläggningar där man en gång lyckats installera en transmitter.

6.4.2 Slutsatser kring mätningar i Enermet-systemet

Från de frekvensspektrum som erhållits vid mätningarna i Enermet-systemet kan vissa konkreta slutsatser dras. Signalmiljön i elnätet har observerats vid flera olika punkter där elnätskommunikationen har uppvisat varierande kvalitet. Utifrån mätresultaten är det möjligt att göra jämförande analys och att dra slutsatser om varför kommunikationen i elnätet fungerar eller inte fungerar vid dessa punkter.

Med hjälp av erfarenheter från tekniker vid mätaravdelningen på Falu Elnät har områden där Enermet-systemet fungerar bra respektive dåligt kunnat ringas in. Två av de punkter där man upplevt störst problem med systemet och aldrig fått elnätskommunikationen att fungera, är Kvarteret Pilen och bensinmacken Preem vid Jungfrurondellen i Falun. Mätningar av signalmiljön vid dessa punkter har därför genomförts, för att studera störningsproblematiken.

Vid Kvarteret Pilen, som består av fyra elektriskt sammanbundna huskroppar med samma byggnadsår, observerades kraftiga störningar i det frekvensband som Enermet-systemet signalerar. Med största sannolikhet härrör dessa störningar från den ofiltrerade frekvensstyrda apparatur som reglerar varvtalen hos husets fläktsystem och fjärrvärmepumpar. Denna hypotes kunde inte kontrolleras fullt ut genom att slå ifrån samtliga frekvensomriktare i anläggningen, utan det fanns bara möjlighet att slå ifrån denna utrustning i den huskropp som mätningarna genomfördes. Detta resulterade i något lägre nivåer hos störningarna, men eftersom intilliggande huskroppar använder samma apparatur som fortfarande var i drift vid mätning 5, finns störningarna kvar i nätet. De frekvensspektrum som erhöles vid mätningarna

4 och 5 i Kvarteret Pilen ger båda en bild av hur signalmiljön kan se ut i en punkt där Enermet-systemets elnätss kommunikation inte fungerar.

Även vid bensinmacken Preem vid Jungfrurondellen gjordes mätningar för att kunna dra slutsatser kring varför elnätss kommunikationen inte fungerar tillfredställande. Mätresultaten visar frekvensspektrum av bakgrundsbruset som har hög energi kring de frekvenser där Enermet-systemet signalerar. Någon säker källa till dessa brusstörningar har inte kunnat identifieras i anläggningen, men den karaktäristik som frekvensspektrumet uppvisar tyder på att någon form av frekvensomriktare utan EMC-filtrer används i byggnaden. Bakgrundsbrusets frekvensspektrum som erhöles vid mätningarna 9 och 10 i Jungfrurondellen ger ytterligare en bild av hur signalmiljön kan se ut i en punkt där Enermet-systemets elnätss kommunikation inte fungerar.

Sammantaget från mätningarna vid Kvarteret Pilen och Jungfrurondellen kan man konstatera att en brusnivå med medelvärden omkring -60 dBV, motsvarande 60 dB μ V eller 1 mV, vid de frekvenser där Enermet-systemet signalerar, är tillräcklig för att elnätss kommunikationen inte ska fungera.

Mätningar har även genomförts vid två andra punkter i samma nätstationsområde som Kvarteret Pilen, för att studera utbredningen av störningarna från denna anläggning och om elnätss kommunikationen påverkas vid andra anläggningar under samma delsystem. Vid koncentratorn, som sitter i nätstation T0695, erhöles i mätning 7 frekvensspektrum med störningar som har stora likheter med dem i Kvarteret Pilen, dock med något lägre amplitud. Även i mätning 1 vid Promenaden 19, syns spår av störningarna från Kvarteret Pilen, trots att kabellängden mellan dessa anläggningar är ca 300 m. Elnätss kommunikationen hos övriga Enermet-transmittrar under nätstationen fungerar emellertid oftast bra, varvid vi t.ex. kan konstatera att en brusnivå hos transmittern på ca -75 dBV, motsvarande 45 dB μ V eller $0,18$ mV, vid de frekvenser där Enermet-systemet signalerar, är tillräckligt låg för att elnätss kommunikationen ska fungera. Vid koncentratorn kan brusnivån till och med vara så hög som -55 dBV, motsvarande 65 dB μ V eller $1,8$ mV, och ändå fungerar kommunikationen med underliggande transmittrar. Man ska dock komma ihåg att signalstyrkan trots allt är relativt hög i förhållande till brusnivån i mätning 7, eftersom amplitudskalan är logaritmisk. Signalnivån uppgår till ca -25 dBV = $0,056$ V och bruset till -55 dBV = $0,0018$ V, vilket ger ett SNR på 31.

Inalles kan konstateras att gränsen för vilken nivå bakgrundsbruset får ha i en anläggning för att man ska kunna använda en elnätss kommunicerande ML10-transmitter från Enermet med PLT-22-teknik, ligger någonstans mellan -75 och -60 dBV, motsvarande $0,18$ – 1 mV, kring de frekvenser där systemet signalerar. Överskrids denna gränsvå kan transmittern överhuvudtaget inte installeras i anläggningen, eftersom den då indikerar på ”band in use”.

7 Referenser

Tryckta källor

- [1] Ahnland, R. (2003). Störningar på nätet hot mot avläsning av elmätare. *Energimagasinet*. Häfte 2, s. 18–19. Februari 2003. ISSN 0348-9493.
- [2] Berglund, S-E., Englund, G., Gustavsson, R. & Åkerlund, J. (2004). *Frekvensomriktare – guide för elanvändare och allmänt sakkunniga inom elområdet*: Elforsk rapport 04:44. Stockholm 2004.
- [3] Bollen, M. (2000). *Övertonsdistorsion*: kursmaterial i kursen Elkvalitet och symmetriska komponenter vid Chalmers Tekniska Högskola juni 2001. November 2000.
- [4] Cavdar, H. (2004). Performance Analysis of FSK Power Line Communications Systems Over the Time-Varying Channels: Measurements and Modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 19:1, s. 111–117. Januari 2004. ISSN 0885-8877.
- [5] CENELEC (2001). *Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148,5 kHz*: europeisk standard EN 50065-1. Bryssel. Juli 2001.
- [6] CENELEC (1999). *Spänningens egenskaper i elnät för allmän distribution*: europeisk standard EN 50160. Bryssel. November 1999.
- [7] Dostert, K. (2001). *Powerline Communications*. Prentice-Hall, New Jersey. ISBN 0-13-029342-3.
- [8] Dostert, K., Götz, M. & Rapp, M. (2004). Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design. *IEEE Communications Magazine*. Vol. 42:4, s. 78–86. April 2004. ISSN 0163-6804.
- [9] Dostert, K. & Zimmermann, M. (2002). A Multipath Model for the Powerline Channel. *IEEE Transactions on Communications*. Vol. 50:4, s. 553–559. April 2002. ISSN 0090-6778.
- [10] Downay, W. & Sutterlin, P. (). *Power Line Communication – Technology Update*: Powerpoint-presentation från Echelon.
- [11] Elfving, G. (1993). *ABB Handbok Elkraft*. Wallin & Dalholm Tryckeri AB, Lund. Juni 1993. ISBN 91-970956-2-1.

- [12] Englund, G. (2004). *Senea och NFO Sinus, störnivåer i 10 – 100 kHz bandet*: Mätrapport från GKE Elektronik AB utförd åt Boo Energi. 4 mars 2004.
- [13] Ericsson Cables (1999). *Kraftkabelhandboken*. Strålin's Tryckeri AB, Grycksbo. LZT 143 541. Juni 1999.
- [14] Ferreira, H.C., Grové, H.M., Hooijen, O. & Han Vinck, A.J. (1996). Power Line Communications: An Overview. *IEEE AFRICON Conference*. Vol. 2, s. 558–563. 1996.
- [15] Gustavsson, R. (2003). *Praktisk Elkvalitet*. 1 uppl. ISBN 91-974844-0-7.
- [16] Hill, L.W. (1992). *Frequency hopping time-diversity communications systems and transceivers for local area networks*. Patent, patentnr: 5 448 593. Juli 1992.
- [17] Hooijen, O. (1998). A Channel Model for the Residential Power Circuit Used as a Digital Communications Medium. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. Vol. 40:4, s. 331–336. November 1998. ISSN 0018-9375.
- [18] Hunt, L., & Hunt, P. (1995). Using ultra narrow bandwidth to overcome traditional problems with distribution line carrier. *1995 Rural Electric Power Conference*. Kat. nr. 95CH3477-7, s. D3/1–8. 1995. ISSN 0734-7464.
- [19] Hunt Technologies/Hunt, P. (1999). *Low frequency bilateral communication over power distribution lines*. Patent, international publication number: WO 99/16160. April 1999.
- [20] Miller, W. & Newbury, J. (2001). Multiprotocol Routing for Automatic Remote Meter Reading Using Power Line Carrier Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 16:1, s. 1–5. Januari 2001. ISSN 0885-8977.
- [21] Moritz, B. (2005). Anteckningar från möte med Bertil Motitz, HM Power AB. Västerås. 14 oktober 2005.
- [22] Oppenheim, A. & Willsky, A. (1997). *Signals & Systems*, 2:nd edition. Prentice-Hall, New Jersey. ISBN 0-13-651175-9.
- [23] Phillips, H. (2001). A Hardware Simulator for Powerline Communication Channels. *Proc. 5th Int'l. Symp. Power-Line Commun. And Its Applications*, s. 241–46. Malmö, Sverige. 2001.
- [24] Proakis, J. & Salehi, M. (2002). *Communication Systems Engineering*, 2:nd edition. Prentice-Hall, New Jersey. ISBN 0-13-095007-6.
- [25] Schickhuber, G. & McCarthy, O. (1997). Control using power lines – a European view. *Computing & Control Engineering Journal*, s. 180–184. Augusti 1997.
- [26] Sördin, B. (2005). Material från Björn Sördin, Senea AB. 31 oktober 2005.

Elektroniska källor

- [27] Capelon. *Elnätsskommunikation med LonWorks*: Powerpoint-presentation från Capelon. CENELEC-standarder/normer. [e-post] <liang@capelon.se>. E-brev på förfrågan från Liang Liem på Capelon. 4 november 2005.
- [28] Echelon. *PLT-22 Power Line Transceiver Model 20090-03*: Datablad från Echelon [www]. Hämtat från <<http://www.echelon.com/support/documentation/datashts/50090.pdf>>. Hämtat november 2005.
- [29] Echelon. *PLT-30 Power Line Transceiver Model 50100-01*: Datablad från Echelon [www]. Hämtat från <<http://www.echelon.com/support/documentation/archive/datasheets/50100-01.pdf>>. Hämtat november 2005.
- [30] Enermet (2000). *Avalon X-base Mätvärdesinsamling Kurs 200*: Kurspärm från Enermet.
- [31] Enermet. *Terminal Unit ML10*: Informationsblad från Enermet [www]. Hämtat från <http://www.enermet.com/en/metering/factsheets/ML10_GB_Fact_Sheet.pdf>. Hämtat februari 2006.
- [32] Ericsson Cable. *Medium Voltage Cables – Product Literature*: Informationsblad med Ericsson Cables mellanspänningskablar [www]. Hämtat från <http://www.ericsson.com/products/literature/Medium_voltage_cables_literature.shtml>. Hämtat januari 2006.
- [33] Meel, J. (1999). *Spread Spectrum (SS) introduction* [www]. Hämtat från De Nayer Instituut, Belgien. <http://www.sss-mag.com/pdf/Ss_jme_denayer_intro_print.pdf>. Publicerat december 1999. Hämtat november 2005.
- [34] HM Power AB. *Turtle-sändare*: Informationssida om Turtle-transmittern [www]. Hämtat från <<http://www.turtle.nu/Produktbeskrivning/sandaren.html>>. Hämtat oktober 2005.
- [35] HM Power AB. *Turtle-mottagaren*: Informationssida om Turtle-koncentratoren [www]. Hämtat från <<http://www.turtle.nu/Produktbeskrivning/receiver.html>>. Hämtat oktober 2005.
- [36] HM Power AB. *Kapitel 2 – Mottagare*: Informationsblad om Turtle-koncentratoren [www]. Hämtat från <<http://www.turtle.nu>> (inloggning krävs). Hämtat oktober 2005.
- [37] Hunt Technologies. *TS1 Standard Transmitter*: Informationsblad om Turtle-transmittern [www]. Hämtat från <<http://www.hunttechnologies.com/pdf/TS1Transmitter.pdf>>. Hämtat oktober 2005.
- [38] Hunt Technologies. *TS1 Receiver*: Informationsblad om Turtle-koncentratoren [www]. Hämtat från <<http://www.hunttechnologies.com/pdf/TS1Receiver.pdf>>. Hämtat oktober 2005.
- [39] Loberg, M. (2000). *Tillägg till X43 handboken, CM3250 (H47) CM3150 (I47)*: Användarmanual från Enermet. [e-post] <Michael.Loberg@capelon.se>. E-brev på förfrågan från Michael Loberg på Capelon. 10 januari 2006.

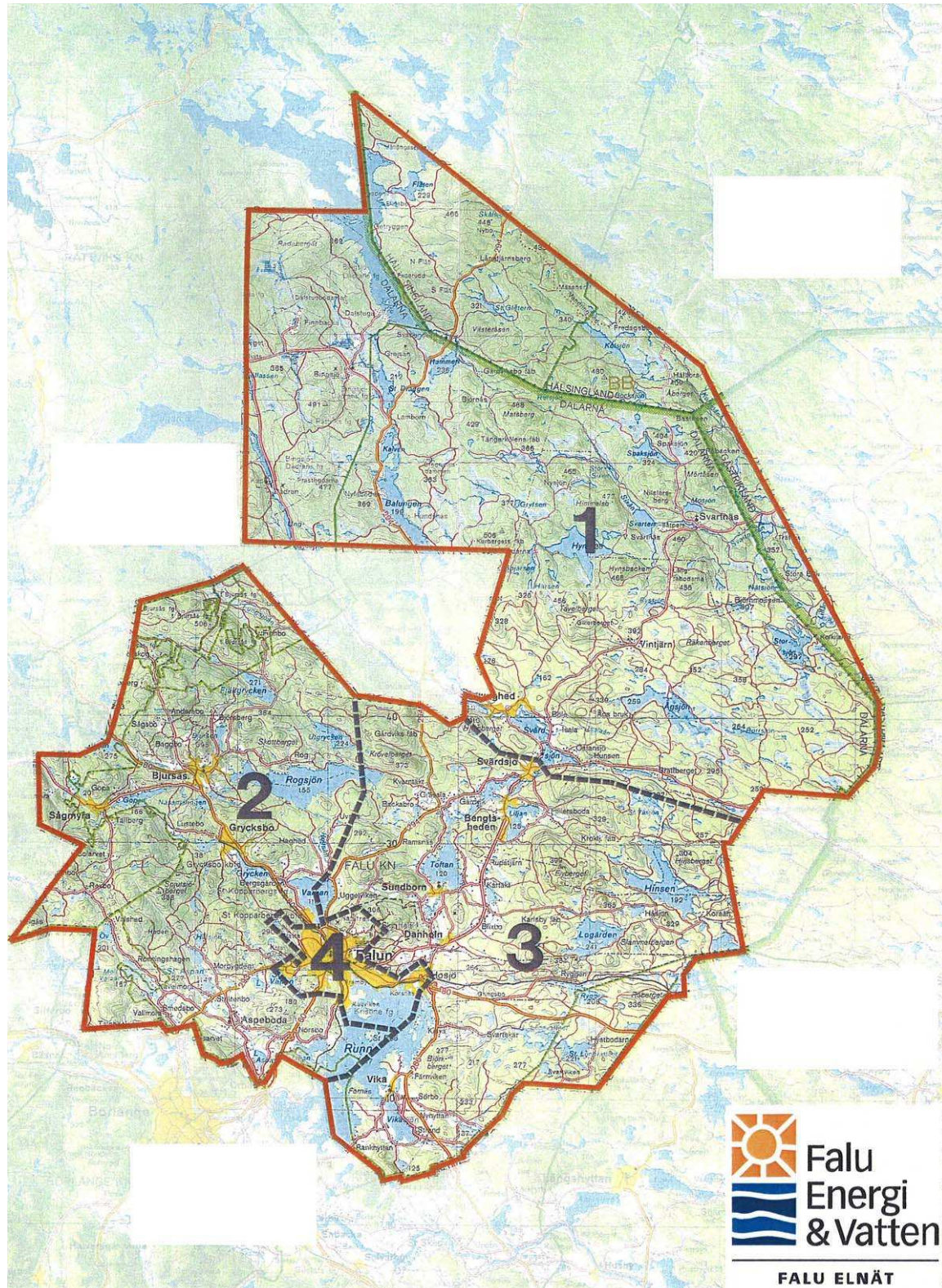
[40] National Semiconductor Corporation (1995). *ICSS1001, ICSS1002 and ICSS1003 – IC/SS Power Line Carrier Local Area Network Chip Set*: Datablad från National Semiconductor [www]. Hämtat från <<http://www.ortodoxism.ro/datasheets/nationalsemiconductor/DS011727.PDF>>. Hämtat november 2005.

[41] Seneca AB. *Kundterminal – Counter PLC för elnätbaserad kommunikation*: Informationsblad från Seneca [www]. Hämtat från <http://www.seneca.se/UserMedia/Documents/2-Counter%20PLC_632724178938397538.pdf>. Hämtat oktober 2005.

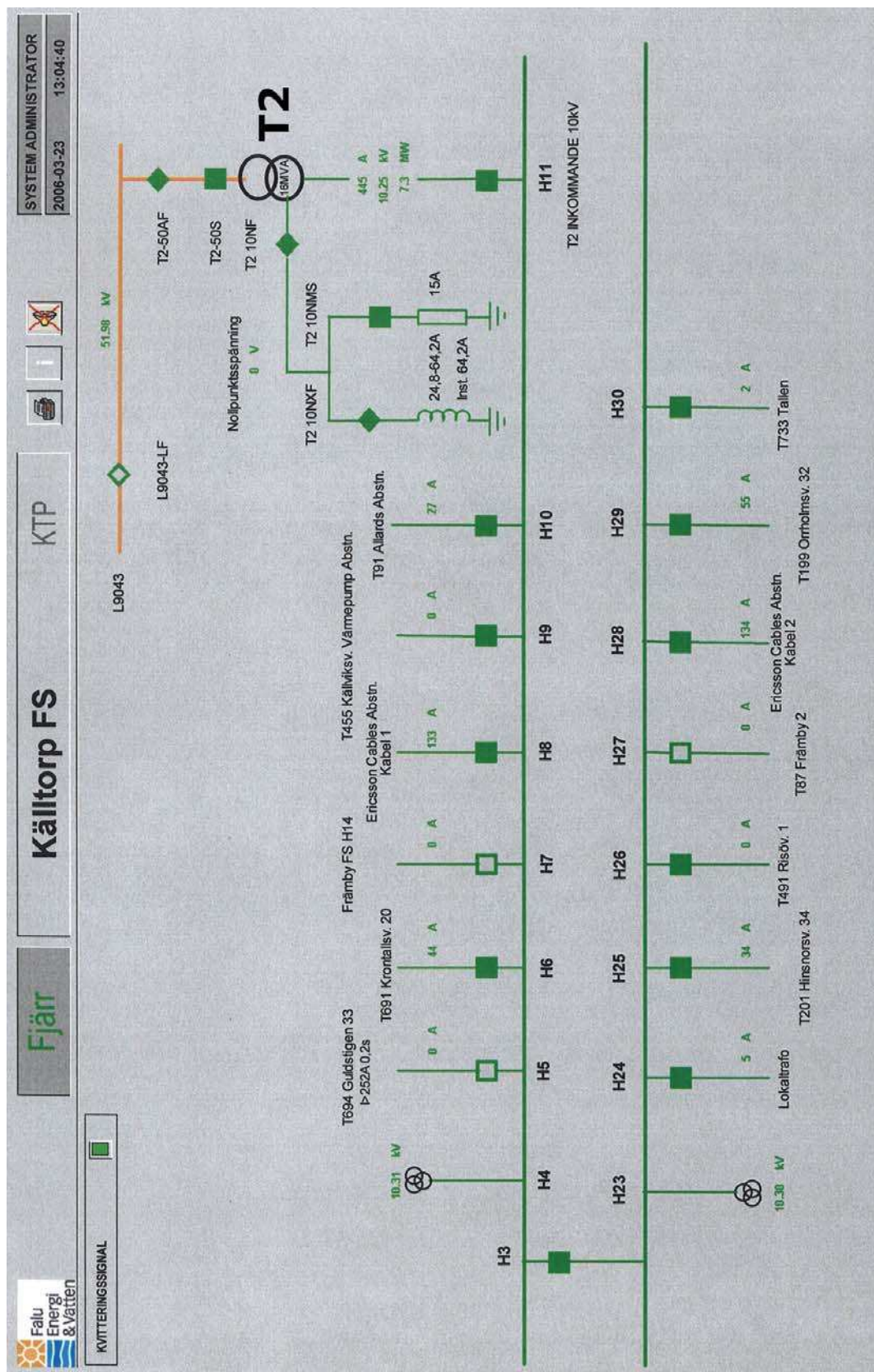
[42] Seneca AB. *Koncentrator – Collector PLC för elnätbaserad kommunikation*: Informationsblad från Seneca [www]. Hämtat från <http://www.seneca.se/UserMedia/Documents/4-CollectorPLC_632678169793223955.pdf>. Hämtat oktober 2005.

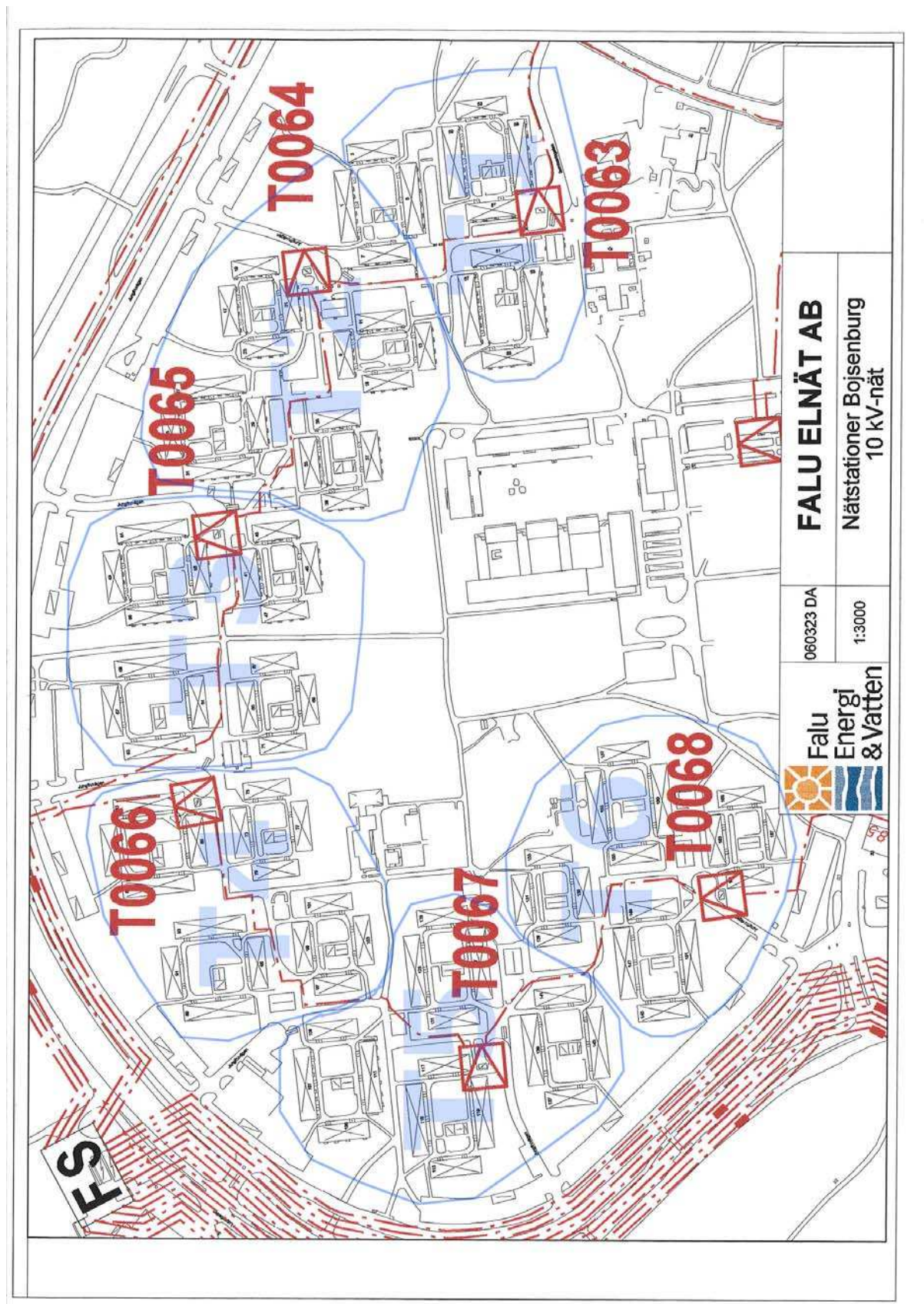
[43] Skoglund, M. (2004). *LECTURE 7 – Digital Carrier Modulation*: föreläsningsmaterial i kursen Digital Kommunikation vid KTH hösten 2004 [www]. Hämtat från <<http://www.s3.kth.se/signal/edu/komteori/04/slides/lecture7.pdf>>. Publicerad september 2004. Hämtad 13 september 2004.

Appendix

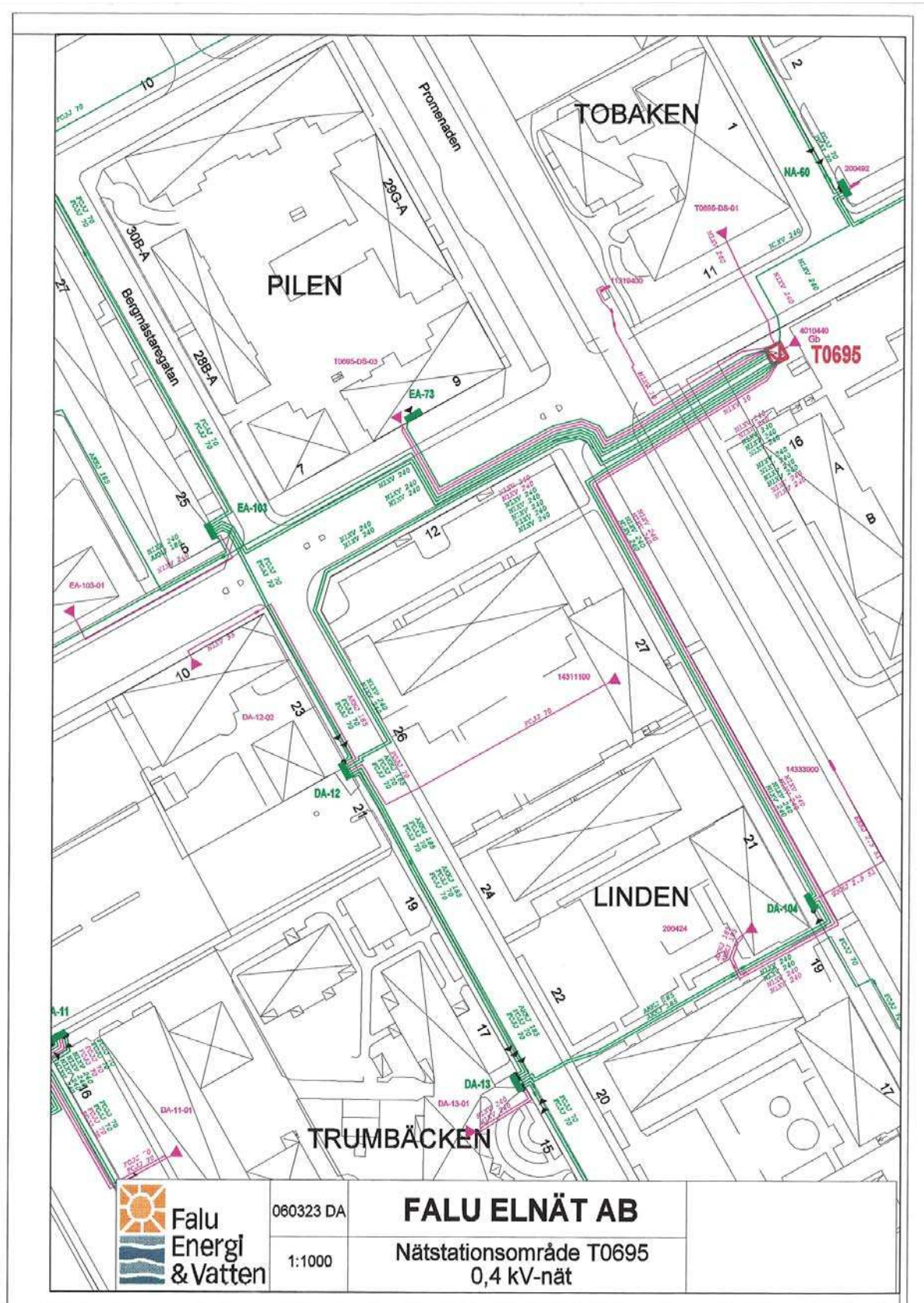


Figur A1. Karta över Falu Elnäts nätområde.





Figur A5. Bojsenborg med de sex olika Senea-delsystemen T1–T 6.



Figur A6. Nätstationsområde T0695 med bl.a. Kvarteret Pilen och Promenaden 19.