



SYDDANSK UNIVERSITET Det Tekniske Fakultet Mads Clausen Instituttet, Odense

IoT-baseret overvågning af håndpumper beliggende

i afrikanske landdistrikter

Afgangsprojekt Diplomingeniør i Elektronik og Datateknik

Studerende

Emil Schier Christiansen Jes Rydall Larsen

Vejleder

Kjeld Jensen

I samarbejde med

Ingeniører Uden Grænser

Projektperiode

1/9/2019 - 2/1/2020

Abstract

Water supply systems in Sierra Leone that are supposed to provide clean potable water are breaking down and notifications to conduct repairs are slow. This paper aims to develop a low power Internet-of-Things monitoring device in collaboration with Engineers Without Borders Denmark to solve this problem. The IoT device is meant to monitor water points in rural areas in Sierra Leone and collect data that can be utilized to determine breakdowns and perform analytics. Data transmission is accomplished using LoRa technology to build a mesh-network that connects the IoT devices. A concept for a data transmission window has been developed to allow devices to be run in low power mode for longer periods to save on power consumption. Prototypes of this device have been shown to have a current draw of less than 4,2mA in an active state and as little as 128µA in sleep mode. Software for the IoT devices has been developed to the degree of a first draft. This, however, will need improvement as a full test has failed due to bugs occurring during runtime. Further development is needed to optimize the functionality of the device before this is a deployable solution for monitoring water points in Sierra Leonne.

Forord

Afgangsprojektet er udarbejdet af to ingeniørstuderende på 7. semester af Elektronik og Datateknik på Syddansk Universitet i samarbejde med Ingeniører Uden Grænser. Projektet forløb fra den 1. september 2019 til den 2. januar 2020. Målgruppen for rapporten er ingeniører og ingeniør-studerende indenfor det elektroniske fagområde, og rapporten fører et sprog, som forventer et dertilhørende kompetenceniveau fra læseren.

Vi ønsker at give et stort tak til Kjeld Jensen for solid vejledning gennem projektforløbet, for hans løbende feedback og for at stå til rådighed for spørgsmål undervejs. Vi ønsker desuden at takke Kristian Husum Therkildsen for vejledning angående rapporten, samt Jan Nikolajsen for korrekturlæsning på dele af rapporten. Til slut et stort tak til Ingeniører Uden Grænser.

Indholdsfortegnelse

1	Intr	Introduktion				
1.1 Baggrund for projektet og problemanalyse				2		
1.2 FN's verdensmål			erdensmål	3		
	1.3	Definit	ion af Internet of Things	4		
1.4 Eksisterende system: EWB Monitor-system			erende system: EWB Monitor-system	4		
1.5 Udvikling af system til monitorering af håndpumper			ing af system til monitorering af håndpumper	4		
	1.6	Relate	ret arbejde	5		
		1.6.1	SweetSense	6		
		1.6.2	SatWater fra Water Mission	6		
		1.6.3	Low Power Global Area Network (LPGAN) med Hiberband	7		
		1.6.4	FossaSat-1	8		
	1.7	Projek	tmål	8		
	1.8	Forven	tede resultater	8		
	1.9	Kravsa	nalyse og kravsspecifikation	9		
	1.10	Afgræi	nsning	12		
	1.11	Løsnin	gsmodel	13		
		1.11.1	Projektets løsningsmodel	14		
_	т	nplementeringstrin 16				
2	Imp	lement	seringstrin	16		
2	1mp 2.1	Arbejc	sproces	16 17		
2 3	2.1 Net	olement Arbejc værk	seringstrin	 16 17 18 		
2 3	2.1 Net 3.1	Arbejd værk Netvæ	seringstrin sproces	 16 17 18 18 		
3	2.1 Net 3.1	Arbejd værk Netvæ 3.1.1	sproces	 16 17 18 18 19 		
3	2.1 Net 3.1	Arbejd værk Netvæ 3.1.1 3.1.2	sproces	 16 17 18 18 19 20 		
3	1mp 2.1 Net 3.1	Arbejd værk Netvæ 3.1.1 3.1.2 3.1.3	sproces	 16 17 18 18 19 20 23 		
3	1mp 2.1 Net 3.1	Arbejd værk Netvæ 3.1.1 3.1.2 3.1.3 Netvæ	sproces	 16 17 18 18 19 20 23 25 		
3	2.1 Net 3.1	Arbejd værk Netvæ 3.1.1 3.1.2 3.1.3 Netvæ 3.2.1	sproces	 16 17 18 19 20 23 25 26 		
3	 Imp 2.1 Net 3.1 3.2 3.3 	Arbejd værk Netvæ 3.1.1 3.1.2 3.1.3 Netvæ 3.2.1 Synkro	sproces	 16 17 18 18 19 20 23 25 26 29 		
3	 1mp 2.1 Net 3.1 3.2 3.3 	Arbejd værk Netvæ 3.1.1 3.1.2 3.1.3 Netvæ 3.2.1 Synkro 3.3.1	sproces	 16 17 18 18 19 20 23 25 26 29 31 		
3	 Imp 2.1 Net 3.1 3.2 3.3 3.4 	Arbejd værk Netvæ 3.1.1 3.1.2 3.1.3 Netvæ 3.2.1 Synkro 3.3.1 Impler	sproces	 16 17 18 18 19 20 23 25 26 29 31 31 		
3	 Imp 2.1 Net 3.1 3.2 3.3 3.4 	Arbejd Arbejd værk Netvæ 3.1.1 3.1.2 3.1.3 Netvæ 3.2.1 Synkro 3.3.1 Impler 3.4.1	sproces	 16 17 18 19 20 23 25 26 29 31 31 		
3	 Imp 2.1 Net 3.1 3.2 3.3 3.4 	Arbejd Arbejd værk Netvæ 3.1.1 3.1.2 3.1.3 Netvæ 3.2.1 Synkro 3.3.1 Impler 3.4.1	sproces	 16 17 18 19 20 23 25 26 29 31 31 32 		
3	 Imp 2.1 Net 3.1 3.2 3.3 3.4 	Arbejd værk Netvæ 3.1.1 3.1.2 3.1.3 Netvæ 3.2.1 Synkro 3.3.1 Impler 3.4.1 3.4.2	sproces	 16 17 18 18 19 20 23 25 26 29 31 31 32 36 		
3	 Imp 2.1 Net 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 	Arbejd Arbejd værk Netvæ: 3.1.1 3.1.2 3.1.3 Netvæ: 3.2.1 Synkro 3.3.1 Impler 3.4.1 3.4.2 Gatew	sproces	 16 17 18 19 20 23 25 26 29 31 31 32 36 37 		

4	IoT	-baser	et elektronisk LPWAN-enhed	39	
	4.1 Eksisterende LPWAN-enheder med fokus på et lavt effektforbrug				
		4.1.1	Kommercielt LPWAN-produkt	39	
		4.1.2	Forskning i LPWAN-boards og teknologi	39	
	4.2	Mikro	controlleren	42	
		4.2.1	Valg af mikrocontroller	42	
		4.2.2	Test og optimering af ATmega328P-PU's strømforbrug	45	
		4.2.3	Krystal og clock-hastigheder	50	
		4.2.4	Sammenligning mellem ATmega1284P og ATmega328P	51	
	4.3	Non-ve	olatil hukommelse	53	
		4.3.1	Valg af non-volatil hukommelse	53	
	4.4	Kreds	øb og valg af komponenter	54	
		4.4.1	Real Time Clock (RTC)	54	
		4.4.2	Solpaneler	56	
		4.4.3	Lade- og afladningskredsløb	57	
		4.4.4	Spændingsregulator	61	
		4.4.5	General purpose sensor interface	62	
		4.4.6	Kontakter til tilkobling af sensorer og moduler $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	63	
		4.4.7	LoRa-modul	65	
		4.4.8	GSM-modul	65	
		4.4.9	Energilagring	66	
		4.4.10	Kredsløb til måling af superkapacitorens spænding	74	
	4.5 Proof of concept-test af system		of concept-test af system	74	
	4.6 Produceret mikrocontroller-board		76		
	4.7	Delkor	nklusion	76	
5	Test og karakterisering af mikrocontroller-board 78				
	5.1	Test a	f enhedens strømforbrug	78	
	5.2	Simule	eringstest under virkelige forhold	80	
		5.2.1	Kode til forsøg	81	
		5.2.2	Samlede observationer om forsøget	86	
6	\mathbf{Dis}	kussior	1	87	
7	Kor	ıklusio	n	88	
Li	ttera	tur		97	
A	A Sammenligning af RTC-komponenter				

INDHOLDSFORTEGNELSE

в	Sammenligning af regulatorer	II
\mathbf{C}	Opsætning af bootloader og fuses på ATmega 328P/1284P	\mathbf{V}
D	Tests af ATmega328P's strømforbrug	VIII
Е	Proof of concept-test af første prototype	Х
F	Måling af samlet strømforbrug i forskellige stadier	XVI
\mathbf{G}	Test af startup-tid fra sleep mode	XXII
н	Test af transmissionstider ved brug af Radiohead Mesh bibliotek	XXIV
I	Samlet flowchart for udviklet software	XXIX

1 Introduktion

Denne rapport er resultatet af et afgangsprojekt på uddannelsen Elektronik og Datateknik fra Syddansk Universitet. Afgangsprojektet er udarbejdet i samarbejde med den tekniskhumanitære non-profit organisation Ingeniører Uden Grænser, som er en del af den internationale organisation Engineers Without Borders International.

I Sierra Leone er der installeret vandforsyningssystemer bredt omkring i landet, som skal sikre at befolkningen har en kilde til drikkevand og vand til sanitet. Vandforsyningssystemer kan fx være vandtårne eller vandpumper, som skal pumpe vand op med håndkraft. Vandforsyningssystemerne kan blive dysfunktionelle. Når det sker, går der ofte mere end en måned før en reparation er fuldført. De enkelte indbyggeres alternativ til de installerede vandforsyninger, er overfladevand, som er en kilde til potentielt livsfarlige diarré-sygdomme, eller at bruge tid og ressourcer på at fragte vand fra andre vandforsyningsposter.

Projektets formål er at udvikle en elektronisk enhed, som kan monitorere håndpumper i Sierra Leone ved at rapportere data indsamlet af sensorer, placeret på selve håndpumpen, hjem til Danmark. Målet er at skabe et bedre overblik over håndpumperne, så tiden pumperne er dysfunktionelle minimeres. På figur 1a ses et eksempel på en håndpumpe, som kunne overvåges. Projektets elektroniske enhed inkluderer ikke i sig selv nogle sensorer, men kan aflæse en bred vifte af sensortyper. Et eksempel kunne være en vandflows-sensor, som kan rapportere en pumpes vandforbrug. Hvis vandflowet ved en pumpe falder drastisk, kan det betyde, at pumpen har problemer som skal løses, hvilket kan rapporteres til de personer, som kan sikre at pumpen bliver ordnet.

Sierra Leone's klima, geografi og infrastruktur sætter krav til den elektroniske enhed. Enheden designes til at have et lavt strømforbrug for at gøre den uafhængig af den lokale elforsyning eller af større solpaneler. Enheder er forsøgt designet til at kunne sende sensordata gennem andre enheder, således at data fra enheder placeret væk fra etablerede netværk, såsom fx mobilnetværket, kan afrapportere sine målinger til en enhed, som har en form for netværksdækning. På figur 1b ses den elektroniske enhed, som er blevet produceret under projektet. Enheden er ved rapportens aflevering fortsat i udviklingsfasen.

I resten af introduktions-afsnittet følger en beskrivelse af baggrunden for projektet, en analyse af dets problemstillinger og en gennemgang af relateret arbejde. Herefter følger projektmålene, hertil forventede resultater, en kravsanalyse og kravsspecifikation og en afgrænsning. En løsningsmodel præsenteres sammen med en række implementeringstrin.



(a) På billedet ses en håndpumpe, som kan pumpe vand op til en landsby. Det er et eksempel på den type af pumper, som projektets elektroniske enhed skal monitorere. Billedet er lånt fra Ingeniører Uden Grænser.[54]



(b) På billedet ses den elektroniske enhed, som er resultatet af projektet.Det er denne enhed, som skal placeres ved pumpen og aflæse de sensorer, som kan blive installeret.

Figur 1

1.1 Baggrund for projektet og problemanalyse

Ingeniører Uden Grænser, forkortet IUG, er blandt andet med til at sikre drikkevand for udsatte befolkningsgrupper i mindre landsbyer i Sierra Leone. I samarbejde med den lokale befolkning har IUG udført boringer til brønde, opsat vandtårne og skabt vandposter til i alt 25 vandforsyningssystemer. De sikrer en tilgængelig kilde til drikkevand, således at landsbyernes beboere ikke skal leve af overfladevand eller alternativt gå flere kilometer for at få adgang til vand. Overfladevand er en kilde til sygdomme, herunder diarré som er en af Sierra Leones tre mest forekommende dødsårsager.[1]

En opgørelse foretaget i 2016 af Ministeriet for vandressourcer i Sierra Leone viste at 65,5% af de i alt 31.345 vandposter i Sierra Leone var i brug. 6055 vandposter var i stykker i en sådan grad, at de ikke var funktionelle, mens 3873 vandposter var for forurenede til at de blev benyttet. 813 vandposter var under konstruktion. Et geografisk overblik over vandposterne fra opgørelsen kan ses på figur 2. Når en vandpost gik i stykker, gik der i 31,6% af tilfældene mere end en måned før en reparation var fuldført, mens der i 28,9% af tilfældene gik over et år.[85]

En anden analyse[16], udført i 2017, undersøgte hvorfor 41.716 vandposter fra 6 lande i Afrika, Asien og central Amerika var blevet dysfunktionelle. Resultatet viste at i 6% af tilfældene skyldtes det dårlig ledelse fra lokal side. Her citeres direkte fra analysen en række af årsagerne: "...'lack of funds for repairs', 'communities failed to raise funds for repair', 'no



Figur 2: På figuren ses et overblik over funktionaliteten af vandposter i Sierra Leone. Grønne prikker angiver fungerende vandposter, mens røde prikker angiver vandposter, som er i stykker. Figuren er lånt fra[86].

funds for buying spares', 'committee are corrupt and failed to do their work', 'the water source committee not active', 'poor management of the scheme', and 'embezzlement of funds'...".[16] Andre årsager er tekniske sammenbrud, dårlig vandkvalitet, tyveri og hærværk. Af de førnævnte årsager er der, uanset den specifikke årsag til nedbruddet, et behov for direkte overvågning af som minimum vandposternes funktionalitet, således at donorer og NGO'er i samarbejde får muligheden for at løse de lokale problemer ved hver individuel vandpost hurtigere.

1.2 FN's verdensmål

SDU har vedtaget, at FN's verdensmål for bæredygtig udvikling skal være omdrejningspunktet for universitets virke.[68] Dette afgangsprojekt understøtter verdensmål 6.1 og 6.2[50], som her citeres:

- 6.1: Inden 2030 skal der opnås universel og lige adgang til sikkert drikkevand til en overkommelig pris for alle.
- 6.2: Inden 2030 skal der opnås lige adgang til egnet sanitet og hygiejne for alle, og ordentlige toiletforhold for alle, med særlig opmærksomhed på kvinder og pigers behov, og på mennesker i sårbare situationer.

Afgangsprojektet er med til at støtte udviklingen for at sikre udsatte befolkningsgrupper lige og universel adgang til sikkert vand, som kan benyttes som drikkevand og til sanitet og hygiejne.

1.3 Definition af Internet of Things

Internet of Things, forkortet IoT, er et hyppigt brugt ord indenfor elektronik- og softwarebranchen. Begrebet IoT fortolkes generelt løst, og der er derfor brug for en præcisering, af hvordan denne rapport fortolker IoT.

Et IoT-netværk er et netværk af enheder, som hver har et unikt id. IoT-enheder er hardware enheder der har sin egen mikroprocessor, indgange til en eller flere sensorer, samt indbygget hardware til at kommunikere med andre IoT-enheder på netværket. IoT-enheder er gerne autonome i den forstand, at de, efter at være blevet indsat i et netværk, i høj grad fungerer uden menneskelig indblanden. Hver enhed deler sin indsamlede sensordata med en gateway, som sender dataen videre til en server for databehandling og analyse. Der kan på serversiden være en brugerflade, som præsenterer den indsamlede data for slutbrugeren. Hver individuel enhed behøver altså ikke at have direkte adgang til internettet for at enheden, inden for denne rapport, kan defineres som en IoT-enhed.

1.4 Eksisterende system: EWB Monitor-system

IUG har allerede implementeret IoT-monitorering af vandforsyningssystemer ved tre vandtårne. Systemerne er i brug i dag, hvor vandtårnene overvåges kontinuerligt. Via satellit sendes der en daglig opgørelse over vandforbruget. Skulle forsyningen gå ned, kan donorerne af vandforsyningssystemet informeres og en reparation kan påbegyndes. På figur 3 ses en skitse af det nuværende system. EWB monitor-enheden, som består af et mikrocontroller board og et iridium satellitmodem, overvåger et flowmeter. Flowmeterets data aflæses og sendes til en server.

1.5 Udvikling af system til monitorering af håndpumper

IUG ønsker at kunne overvåge de enkelte vandpumper, samt få en billigere løsning end det nuværende EWB Monitor-system. Det nuværende systems pris og energiforbrug gør det uhensigtsmæssigt til at overvåge mindre og manuelle vandpumper. Prisen skyldes i høj grad, at hver enhed i systemet er baseret på et irridium satellitmodem, som både er dyrt og har løbende udgifter til dækning. En alternativ løsning er GSM-netværksmoduler. Praktiske erfaringer fra IUG, som kan bekræftes af et netværksdækningskort (se figur 4) viser, at der ikke er garanti for GSM dækning i landområderne i Sierra Leone. IUG ønsker således en enhed udviklet til overvågning af vandpumperne, som kan dele sin indsamlede



Figur 3: Det nuværende EWB monitor-system, hvor sensordata sendes til en webserver med en Irridium satellit-forbindelse. Slutbrugeren modtager dagligt en e-mail med data. Figuren er lånt fra Ingeniører uden grænser [20].

data energieffektivt og billigt. Sekundært ønskes løsningen at være open source, med det formål at lokale interessenter eller virksomheder kan videreudvikle og udbrede løsningen.

1.6 Relateret arbejde

I afsnittet gennemgås eksisterende produkter, som har relevans for projektet eller kan indgå som inspiration til problemløsning.



Figur 4: Kortet viser udbyderen Africell's GSM dækning i Sierra Leone. Det kan ses at det langt fra er hele landet der har dækning. Kortet er lånt fra GSMA [51].

1.6.1 SweetSense

Firmaet SweetSense har udviklet en proprietær produktserie med lavenergi sensorplatforme kaldet SweetSense til overvågning af fx huse, vandtårne og håndpumper.[75] Deres produktserie består blandt andet af en kommunikationsboks med enten satellit eller GSM forbindelse, som kombineres med forskellige sensorer efter behov. Produktet koster 300 til 800 amerikanske dollars afhængigt af den enkelte applikation, samt et månedligt beløb på enten fem eller 20 dollars, afhængigt af om enheden opkobles til et GSM eller et satellitnetværk. Enhederne kommer med et solpanel. Der er ikke angivet nogle informationer vedrørende brug af batterier. Som en del af produktet er der en online brugerflade, hvor slutbrugeren kan aflæse data, kalibrere en enhed og ændre en enheds indstillinger. SweetSense er udbredt i Kenya og Etiopien.[74]

1.6.2 SatWater fra Water Mission

Non-profit organisationen Water Mission har udviklet et system SatWater, som er specialiseret helt specifikt inden for monitorering af vandsystemer. Water Mission tilbyder en modulær pakke, som indeholder et flow meter, 24V DC strømforsyning (drevet af 16 AA batterier), en kommunikator og sensorer der kan til- eller fravælges efter behov.[66][67] SatWater kræver, udover produktprisen, en månedlig betaling. Initialiseringsprisen er minimum 906 USD, med en udgift på mindst 1681 USD efter ti år.¹ Et eksempel på et samlet system ses på figur 5.

SatWater Communicatoren benytter sig af satellitforbindelse til at sende information til deres proprietære Monitoring and Alerting Platform (MAP). Det er en online service, hvor informationer om vandposterne er tilgængelige. Her kan alarmer også sættes op, således at hvis en pumpe holder op med at være funktionel, vil en mail automatisk blive sendt til de ansvarlige for den beskadigede pumpe.

¹Se filen 'SatWater/SatWater priser.png' i afleveringsmappen. Filen er stillet til rådighed af Kjeld Jensen.



Figur 5: Her ses et overblik over SatWater's forskellige sensorpakker. Denne figur giver samtidig et godt overblik over hvad systemet kan. Figuren er lånt fra SatWater Meter and Communicator Installation Manual.[66]

1.6.3 Low Power Global Area Network (LPGAN) med Hiberband

Hiberband, tidligere Magnitude Space, er et hollandsk selskab, der distribuerer et Low Power Global Area Network (LPGAN). Selskabet ejer to såkaldte nanosatelitter, som ligger i en lav bane cirka 600km over jordens overflade. For 1500 USD sælger selskabet en LoRa og LoRaWAN klasse A kompatibel gateway med satellitopkobling, som kan servicere op til 50 end devices. Alternativt sælger de en enhed, som kan sende direkte til en satellit fire gange om dagen.[14] Prisen er ikke annonceret på deres hjemmeside. En beskrivelse af LoRa og LoRaWAN kan læses i afsnit 3.1. Gateway'en har et LiFePO4-batteri og mulighed for tilkobling af to solpaneler. Den kan operere i mellem -20°C og 60°C. Når en satellit flyver over en gateway, vil gateway'en vågne op fra en dvaletilstand for at sende sin data, men kun én uplink besked til en nanosatellit er tilladt per dag. Hiberband lover, at der kan sendes flere beskeder i fremtiden.[19][33] Hiberband er et proprietært netværk med dertilhørende proprietært hardware og cloud services.

Der er installeret enheder i regioner uden internet, herunder Peru, Sri Lanka og Tanzania, hvor der måles temperatur, nedbør og luftfugtighed. Formålet er at give bedre muligheder for at planlægge landbruget i regionerne.[44]

1.6.4 FossaSat-1

FossaSat-1 er en open source picosatellit (5 kvadratcentimeter) med indbygget LoRatransceiver styret fra en ATmega328P. Solpaneler fungerer som strømforsyning, hvor transmissionsstyrken løbende bestemmes ud fra den tilgængelige energi. Satellitten er udviklet af nonprofit-organisationen Fossa Systems, og den kom i kredsløb d. 28/11 2019. Kommunikation med satellitten er gratis.[25][24]

1.7 Projektmål

Det overordnede projektmål er at udvikle et EWB Monitor-system, som kan benyttes til overvågning af blandt andet vandforbruget hos individuelle håndpumper lokaliseret i landbrugsområder i Sierra Leone.

For at opnå målet, er følgende delmål opstillet. Enheder skal:

- være simple og billige.
- fungere i Sierra Leones klima.
- forsynes med strøm fra en vedvarende energikilde.
- kunne lagre energi nok til strømkrævende aktiviteter, såsom datakommunikation.
- have et ultra lavt strømforbrug under søvn på maksimalt $50 \mu \mathrm{A}.$
- kommunikere ved brug af højst 100mW.

1.8 Forventede resultater

Ved afslutningen af projektet forventes følgende resultater:

- Der er udviklet et simpelt kredsløb, som kan holde enheden forsynet med strøm via et eller flere små solpaneler, samt lagre energi nok i et mindre batteri, en superkapacitor eller lignende til at enheden kan:
 - fortsætte drift i kortere perioder uden sol. En kort periode er fx en nat, såfremt at enheden er fuldt eller tæt på fuldt opladet.
 - trække en større belastning i perioder hvor det er nødvendigt, for eksempel under transmission af data.
 - være nem at reparere i tilfælde af skader.

- Der er valgt passende komponenter til kredsløbet på baggrund af grundige analyser af deres strømforbrug.
- Der er gennemført en optimering af en valgt mikroprocessors strømforbrug.
- Der er valgt en netværkstopologi, som er blevet implementeret på en valgt netværksteknologi. Der er enten tilpasset en open source-protokol eller udviklet en ny protokol til teknologien. De valgte løsninger sikrer, at monitoreringsenheder i områder uden GSM-dækning kan kommunikere med mindst én enhed, der har forbindelse til internettet.
 - Enhederne er kun aktive på netværket, når de skal sende data. Der er derfor implementeret et løsningsforslag til, hvordan enheder kan udveksle data, når de ikke ved hvornår andre enheder er aktive, samt kort beskrevet alternative metoder.
 - Netværket er testet i lille skala.

1.9 Kravsanalyse og kravsspecifikation

Nedenfor gennemgås en analyse af forholdene i Sierra Leone, samt hvilke krav disse forhold sætter til projektets produkt. Derefter uddybes en kravsspecifikation for netværksteknologi, pris og stabilitet.

Klima

Sierra Leone har et tropisk klima, hvilket betyder, at der er en tør vinter og monsun om sommeren. I Freetown er temperaturen ensformig, med temperaturer som månedligt varierer 2,6°C i gennemsnit. Den gennemsnitlige temperatur er omtrent 26°C, mens den maksimale temperatur er cirka 30°C. Det gælder uanset måned. Freetown ligger ved kysten, men inde i landet kan temperaturen nå 40°C. Luftfugtigheden er generelt lav, da vinden ofte blæser tør luft ind fra Sahara. Der falder meget regn en del af året på grund af monsunen. I august falder der gennemsnitligt 944mm regn, mens der til sammenligning falder 7mm regn i februar. Under monsunen er der primært overskyet.[27] [13]

Dagene er kortest i midten af december, hvor dagene er 11 timer og 38 minutter lange i Freetown. Det giver 12 timer og 22 minutters nat.[28]

Klimaet sætter både krav til elektronikken og til beskyttelsen af elektronikken:

• Alle komponenter skal kunne operere normalt med en omgivelsestemperatur på 40°C.

- Al elektronik skal være beskyttet i en lukket kasse, som beskytter mod vand og støv. Kassen skal have en IP rating på minimum IP65, som betyder at elektronikken er beskyttet mod indtrængende støv og vand. Kassen skal være beskyttet overfor UVstråling.
- Et solpanel skal kunne generere strøm i dårlig belysning, eftersom der er overskyet en stor del af året.
- Systemet skal kunne køre i 12-13 timer uden at blive tilført ny energi, hvilket svarer til den daglige tid, hvor det er delvist eller helt mørkt.

Geografi

Sierra Leones størrelse er 71.740km². Den vestlige del af landet er fladt, mens den østlige del af landet har et bjerglandskab. Det højeste punkt er Mount Bintumani, som har en højde på 1945 meter.[13] Sierra Leone består af 38,45% skovområde.[12] Især bjerge kan forhindre en enhed i at kommunikere med andre enheder, men også bygninger og træer betyder at en enhed skal transmittere med et stærkere signal for at kommunikere. Geografien sætter krav til netværket:

- Enheder skal kunne sende data over mindst én kilometer.
- Det bør tilstræbes, at enheder tilpasser deres sendestyrke til kommunikationen med den nærmeste gateway, så der ikke bruges energi på at sende et unødvendigt stærkt signal.
- Netværket skal være redundant og fortsat fungere, selvom enheder kan forsvinde midlertidigt fra netværket.
- Enheder bør placeres højt, hvis muligt:
 - Når et transmitteret signal rammer en hård overflade, vil der opstå refleksioner af signalet, som vil ramme modtageren ude af fase. Det svækker signalet.
 Refleksionstabet mellem en sender og en modtager kan udregnes med Fresnel zoner[21], hvilket dog ikke er inde for rammerne af dette projekt.

Netværksteknologi

Følgende er en række af krav, som skal kunne opfyldes af en valgt netværksteknologi:

- Netværket skal kunne implementeres som et IoT-netværk, hvor de individuelle enheder har mulighed for at sende deres opgørelser af fx målinger til en gateway, som kan give adgang til fx en webserver på internettet.
- Løsningen skal være skalérbar, så flere enheder kan tilføres til netværket.
- Kommunikation skal foregå energieffektivt over en afstand på mindst én kilometer.
 - Hver individuel enhed skal kunne opnå en rækkevidde på mindst én kilometer i fri linje.
- Netværket skal bygge på ikke-proprietær teknologi i så høj grad som muligt.
- Netværket skal ligge på ulicenserede frekvensbånd.

IoT-enhed

Det ønskes at udvikle en IoT-enhed der er nem for andre at arbejde videre med. Det ønskes at udvikle en general purpose platform, der ikke binder sig fast på at benytte nogle specifikke kommunikationsmoduler eller sensorer. Dette betyder også at der skal være mulighed for at slutbrugeren kan udnytte enhedens I/O porte efter eget valg, når enheden skal implementeres til at løse en given opgave.

Enheden skal opbygges modulært, så eksterne moduler, fx kommunikationsmoduler, kan til- og fravælges for hver enhed. Herudover skal enheden forsyingskredsløb være adskilt fra enheden, så den ikke låser sig til én type forsyning.

Enheden skal kunne repareres. Det betyder at komponenter skal kunne udskiftes, enten ved lodning, eller ved at komponenten eller modulet er forbundet til enheden via en pin header.

Pris

En håndpumpe fra IUG kan have et budget på cirka 38.800 DKK for materialer og opsætning.[87] Prisen på et IoT-baseret overvågningsprodukt skal være billigt set relativt i forhold til prisen for en pumpe. Prisen er afgørende, da fonde eller andre givere af vandpumper skal kunne se værdien i at betale en ekstra andel for overvågning af pumpen. Produktet skal være så billigt som muligt uden at gå på kompromis med de andre krav i kravsspecifikationen.

Den samlede pris for en enhed skal ligge indenfor 2% af prisen for en pumpe. Prisen må således maksimalt være omkring 775 DKK.

Stabilitet og driftsikkerhed

Det samlede netværkssystem skal være stabilt, og enkelte enheders stabilitet skal ikke være afgørende for om hele netværkssystemet er fungerende. Det er plausibelt at enkelte enheder af forskellige årsager kan gå ned på enkelte dage, hvilket er tilladt og forventeligt. Hver enhed skal være i stand til at tilkoble sig netværket igen, hvis enheden har været offline.

- Èn daglig resultatopgørelse fra hver individuel enhed er ikke et krav.
 - Det er et krav at hver enhed kan tilgå netværket igen, efter enheden har været offline, uafhængigt af menneskelig hjælp.

Åbenhed

Hele systemet skal være open source, herunder både kode og printudlæg. Formålet er at gøre enhederne let tilgængeligt for produktion, service og videreudvikling af lokale interessenter i Sierra Leone. Det skal ligeledes tilstræbes at koden er skrevet i et udbredt sprog, og at printudlæg er tilgængelige fra en gratis platform.

1.10 Afgrænsning

For at kunne leve op til kravsspecifikationen, er projektet afgrænset til ikke at arbejde med følgende punkter:

- Sensordata sendes til en SMS, men der implementeres ikke en gateway til fx en webserver.
- Der opbygges ikke en webserver med en database, som kan præsentere den indsamlede sensordata fra aktive enheder i netværket eller konfigurere indstillinger hos de enkelte enheder.
- Valg og implementering af sensorer er ikke en del af projektet.
- Valg af kasse til beskyttelse af elektronikken er ikke en del af projektet.

• Selvom der skal vælges en netværksteknologi, som kan kommunikere over en lang distance, vil rækkevidden af transmissioner hos den valgte teknologi ikke blive optimeret eller efterprøvet.

1.11 Løsningsmodel

Først præsenteres delelementerne for en IoT-enhed og et IoT-netværk. Herefter præsenteres projektets løsningsmodel for at give et overblik over projektets delelementer.



Figur 6: Blokdiagram over de mest basale delelementer, som en IoT-enhed typisk består af.

Minimal IoT-enhed

På figur 6 kan en minimal IoT-enhed ses. Den består essentielt af en forsyning (fx et batteri), en spændingsregulering til enhedens komponenter, en mikrocontroller til styring, en eller flere sensorer og et kommunikationsmodul til at sende data ud.

Netværkskommunikation for IoT-enheder

IoT-enheder er kendetegnet ved at enheder kan kommunikere via en form for netværk. Det kan være ved direkte kontakt til internettet eller ved et internt netværk mellem flere enheder.

Netværksmodel

Der er flere muligheder for, hvorledes et IoT netværk kan opsættes. Den mest almindelige metode består af en gateway, der har forbindelse til en netværksserver og en række end devices, son kan kommunikere asynkront med gatewayen, og derigennem sende data til serveren (se figur 7a). Et end device kan have forbindelse til flere gateways, som blot sender beskeden videre.





(a) Et star-netværk med en gateway der forbinder alle ne
end devises med netværksserveren. Her skal alle enheder de
have direkte kontakt med gatewayen.

(b) Mesh-netværk hvor de grønne enheder har forbindelse til netværks-server, og de blå enheder kun har adgang til det lokale netværk. Her behøver alle IoT-enheder ikke at have direkte forbindelse til en gateway. Desuden er der flere veje en besked kan tage igennem netværket, hvis en enhed fejler.

Figur 7

En anden mulig løsning er at opbygge et mesh-netværk, se figur 7b, der består af en række IoT-enheder. Nogle af disse enheder vil have enten et GSM-modul eller satellitmodem, afhængigt af dækningen, og disse enheder vil fungere som gateways, som er netværkets forbindelse udadtil. Hvis en enhed vil sende en besked til netværksserveren, vil den sende beskeden ud på netværket, og andre enheder vil route beskeden videre til en gateway-enhed der har forbindelse til serveren. Hvis en enhed forlader netværket grundet strømsvigt eller andre årsager, vil der formentlig altid være en vej for beskeden at blive routed til en af de rette enheder, der kan sende den videre. En mere dybdegående beskrivelse findes i afsnit 3.2.

1.11.1 Projektets løsningsmodel

For at give et overblik over de forskellige dele af projektet, er den implementerede løsningsmodel opstillet. Modellen viser hvordan systemet hænger sammen. I den resterende del af rapporten beskrives delelementerne.

Blokdiagram af systemets enkeltdele

Figur 8 viser et blokdiagram, der beskriver sammenhængen mellem delelementerne for de individuelle enheder i netværket. Et solpanel omdanner solenergi til strøm, som en-



Figur 8: Til venstre ses et blokdiagram der beskriver enhedens energiflow, fra solpanel til superkapacitor, videre til spændingsregulatoren og derfra fordelt til alle elementer af enheden. Det skal bemærkes at GSM-modulet er forsynet udenom spændingsregulatoren. Til højre ses et digram over kommunikationsforbindelserne i enheden. Mikroprocessoren styrer al kommunikation mellem de forskellige komponenter.

ten lagres i en superkapacitor eller øjeblikkeligt forbruges af enheden. Superkapacitoren må ikke oplades over dens maksimalt angivet opladespænding. Derfor implementeres et overspændingsbeskyttelses-kredsløb parallelt med kapacitoren. Når superkapacitoren aflades, reguleres dens udgangsspænding af en spændingsregulator, til en spænding som er passende for mikrocontrolleren og de andre komponenter og moduler i enheden. Mikroprocessoren er centrum for enhedens styring og kommunikation, hvilket kan ses til højre på figur 8. Den samler og behandler data fra tilsluttede sensorer, og videresender målt data, enten via LoRa eller GSM-forbindelse. LoRa gennemgås senere i afsnit 3.1.2. Ultimativt skal dataen sendes til en database på en webserver. Mikroprocessorens strømforbrug er minimeret så meget af tiden som muligt, ved at den er sat i deep-sleep tilstand. Det indebærer at mikroprocessoren slukker for alle funktioner af processoren, inklusiv sin krystal, hvilket medfører at al funktionalitet, som afhænger af timing, mistes. I stedet implementeres et Real Time Clock-modul, forkortes RTC, som kan vække processoren op med faste intervaller og på bestemte tidspunkter af dagen. Herudover er alle enheder i netværket udstyret med et LoRa-modul, og kun udvalgte enheder med GSM-modul til kommunikation ud af netværket.

Tilslutning af moduler og sensorer har en effekt på strømforbruget, da tilsluttede dele har lækstrømme. Der er derfor kontakter mellem tilsluttede sensorer og moduler, hvilket ikke er taget med i blokdiagrammerne.

2 Implementeringstrin

For at implementere løsningsforslaget, opdeles det i en række implementeringstrin som er opdelt i fire faser. Først er der en introducerende fase, hvor relateret arbejde og netværksteknologier er blevet undersøgt. De sidste tre faser beskæftiger sig med henholdsvis den elektroniske enhed, opbygning og implementering af netværket og til sidst test af produktet. Trinene er fulgt delvist kronologisk, men der har været arbejde af flere trin, som er forløbet parallelt.

Introducerende fase

- Undersøgelser af relateret arbejde
- Analyse og valg af netværksteknologi og topologi

IoT-baseret elektronisk enhed

- Analyse og valg af mikrocontroller, samt optimering af microcontrollerens strømforbrug
 - Små tests af strømforbruget i forskellige opsætninger
- Analyse og valg af batteritype, samt dimensionering af valgt type
- Analyse og valg af komponenter
 - Test af solcellepanel
 - Valg af RTC
 - Valg af spændingsregulator
- Kredsløb
 - Udvikling af lade- og afladekredsløb
 - Udvikling af mikrocontrollerkredsløb

• Proof of concept-test af en samlet enhed

Netværk

- Implementering af netværkstopologi
- Test af netværkets transmissionstider

Afsluttende tests

• Tests og karakterisering af strømforbruget af det samlede system

I rapporten er netværk beskrevet før den IoT-baserede elektroniske enhed. Det skyldes at analyse og valg af netværkstopologi blev besluttet før elektronikken blev udviklet, og at løsningsmodellen for elektronikken afhænger af valget af netværkstopologi.

2.1 Arbejdsproces

Gennem SCRUM-værktøjet Jira, som kan ses på figur 9, er arbejdet af hvert implementeringstrin blevet koordineret. Cirka hver uge er der påbegyndt en sprint af en række opgaver. Opgaverne er blevet udvalgt og defineret til et ugentligt planlægningsmøde. Med Jira har gruppen kunnet koordinere de enkelte opgaver mellem medlemmerne. Hvis ét af medlemmerne har haft et større problem, har vi begge forsøgt at hjælpes ad for at løse problemet. Undervejs er løste opgaver, for så vidt muligt, løbende blevet dokumenteret i rapporten. En backlog, som indeholder samtlige opgaver, samt information omkring hvem og hvornår den pågældende opgave er blev løst, kan findes i afleveringsmappen i filen 'Jira/Backlog_gennemførte ogpaver'. Et roadmap, eller overordnet tidsplan, kan findes i filen 'Jira/Roadmap'. Roadmap'et er løbende blevet justeret, såfremt det har været vurderet som nødvendigt. Rettelser af roadmap'et er aftalt ved de ugentlige planlægningsmøder af sprints.



Figur 9: På billedet ses Jira Board, hvor gruppemedlemmerne har kunnet påtage sig ansvaret for individuelle opgaver. Her er ligeledes et overblik over både de opgaver, som endnu ikke er løst, og de opgaver, som midlertidigt er blevet udsat.

3 Netværk

For at kunne implementere netværket, undersøges flere forskellige netværksteknologier og netværkstopologier. En netværksteknologi og netværkstopologi vælges. I afsnittet beskrives også hvordan den udvalgte teknologi og topologi implementeres.

3.1 Netværksteknologien LPWAN

Low-power wide-rea network, forkortes LPWAN, er et lavenergi trådløst kommunikationsnetværk, som har en bred rækkevidde. Kommunikationen mellem enheder på netværket foregår ved en lav bit rate, så transmittere kan benytte så lidt energi som muligt. Beskeder på netværket kan kun indeholde en beskeden datamængde, og der kan være begrænsninger på frekvensen af datatransmissioner mellem enheder.[59]

Herunder præsenteres to organisationer inden for netværksteknologien, som er valgt på baggrund af deres globale geografiske udbredelse.[78][69]

3.1.1 Sigfox

Sigfox er et fransk selskab, der udbygger og faciliterer proprietære lavenergi-netværk i hele verdenen. Princippet bag netværket ses på figur 10. På netværket sender de enkelte enheder, kaldet objekter, beskeder asynkront. En række base stations modtager beskederne ad hoc. Beskeder sendes til alle base stationer indenfor objektets rækkevidde. Når en besked er modtaget, sendes den til Sigfox' cloud, hvorefter den vil blive tilgængelig hos slutbrugeren gennem en IT platform.

Sigfox benytter Ultra Narrowband med en modulation kaldet D-BPSK, som giver en ultra kort båndbredde. Signaler er modstandsdygtige mod støj, da signalerne kan da opnå en tilstrækkelig signal-to-noise ratio med et svagt signal. Et signals styrke kan ikke være stærkere end 22dBm, hvilket kan udsendes ved brug af en lav effekt fra transmitteren. En besked på netværket er 100Hz bred og transmitteres ved mellem 100 og 600 bits per sekund. Beskeder sendes med en protokol med et minimalt overhead, der holder beskederne korte, så energiforbruget ved en transmission er minimeret. Antallet af beskeder et objekt kan sende er begrænset til 140 per dag, og hver besked har en payload på op til 12 bytes. En besked med en payload på 12 bytes vil i alt indeholde 26 bytes på grund af overhead.[70] Netværket og dets enheder har en bred vifte af applikationsmuligheder, herunder kan systemet med de korrekte sensorer benyttes til at overvåge fx vandniveauer i tanke, tryk, pH-værdier og drikkevand m.m..[84]



Figur 10: Et overblik over de fire forskellige typer enheder der findes i Sigfox' netværks princip. Deriblandt det trademaked Sigfox CLOUD der er bindeledet mellem sigfox stations og kundens egen IT. Objects sender beskeder asynkront til Sigfox Stations, som kan sende beskederne videre til Sigfox CLOUD. Billedet er lånt fra en Sigfox video [71].

3.1.2 LoRa & LoRaWAN

LoRa, en forkortelse for Long Range, er et andet lavenergi-netværk med ligeledes en lang rækkevidde. Netværket er udviklet til batteridrevne enheder, ligesom Sigfox' system. LoRa består af to lag, henholdsvis et fysisk lag der benytter Chirp Spread Spectrum modulation kaldet CSS, og et MAC protokol-lag. Det fysiske lag er proprietært, og modulationsteknikken er udviklet og ejet af firmaet Semtech.[10] I stedet for Ultra Narrowband, bruges spread spectrum technique. [72] Signaler bliver spredt ud over en bred båndbredde, hvilket gør signalerne svære at detektere, interferere med, aflytte eller demodulere. Da signalet er bredt, kan det transmitteres ved færre watts per hertz sammenlignet med når Narrow Band transmitteres. Det betyder også at signalet bliver maskeret af baggrundsstøj, hvilket gør detektering af signalet besværligt. Både spread spectrum signaler og Narrow Band signaler kan desuden transmitteres på det samme bånd med minimal interferens. [89] De opererer i de licensfrie bånd, hvilket fx er 863 til 870 MHz i Europa. [42] Der kan sendes et ubegrænset antal beskeder. Data raten kan nå op til 50 Kbps, hvis der benyttes FSK modulation, og 27 Kbps ved LoRa-modulation. En payload kan maksimalt være 243 bytes. [46] Data sendes via LoRa som en række symbols der hver repræsenterer otte bits. Et symbol er repræsenteret af en række chirps. Disse Chirps er signaler der sweeper hele båndbredden, enten med stigende frekvens, upchirp, eller faldende frekvens, downchirp. Begrebet Spredningsfaktor beskriver hvor mange chirps der benyttes til at beskrive et symbol. [73] Højere spredningsfaktor giver en længere rækkevidde, men beskeden vil også være længere i luften, som er såkaldt Time On Air. Skalaen går fra 7 til 12.[18]

Almindeligvis bruges LoRa med et MAC protokol-lag kaldet LoRaWAN. LoRaWANs lag kan ses på figur 11a. LoRaWAN er en netværksprotokol, der er udviklet til at forbinde batteridrevne enheder. Protokollen understøtter duplex kommunikation, end-to-end sikkerhedskommunikation og lokaliserings services.[88] Bag protokollen står LoRa Alliance, som er en åben nonprofit forening. En af foreningens formål er at standardisere LoRa kommunikation gennem en åben og global standard.[2]

LoRaWAN benytter star-of-stars topologi. Det betyder at netværksarkitekturen består af tre typer af enheder, henholdsvis end devices, LoRa gateways og LoRa network-servere. Arkitekturen kan ses på figur 11b. End devices er typisk enheder udstyret med sensorer, som gennem en eller flere gateways med internetadgang kan sende sin sensordata til en server. Gateways er protokol-konverteringen mellem LoRa og fx 3G eller ethernet, mens selve netværksserveren har til opgave at dekode datapakkerne.[10] The Things Network er et åbent decentraliseret LoRaWAN-netværk, som er gratis at bruge, hvor certificerede LoRaWAN-enheder kan benytte eksisterende infrastruktur i netværket, såsom gateways.[77] The Things Network er ikke udbredt i Sierra Leone.[78]





(a) Et overblik over de forskellige netværkslag i LoRaWAN. Det tre forskellige klasser som enheder kan indeles i, hver enhed kan kun være medlem af en klasse ad gangen da denne bestemmer enhedens opførsel på netværket. Figuren er lånt fra [37].

(b) En afbilleding af en typisk arkitetktur af et LoRaWAN-netværk af en LoRa-netværksserver, bestående af en række gatewayes og en antal end devises. Et end devise kan godt være forbundet til mere end én gateway, i et sådan tilfælde vil alle forbunde gatewayes vidersende enhedens data til netverksserveren der her frasortere duplikerede beskeder. figuren er lånt fra [10].

Figur 11

I LoRaWAN findes der tre enhedstyper, som kan kommunikere ved forskellige metoder. En klasse A enhed benytter pure ALOHA-protokol til uplink, hvor enheden sender ét frame til gateways, så snart enheden har data at sende. Herefter lytter enheden efter et svar i to downlink vinduer. I praksis betyder det at enheden kun kan modtage data efter at enheden har sendt data til gateways, og kun i ét af downlink vinduerne . Metoden giver det mindste strømforbrug. Klasse B enheder synkroniserer med en gateway ved hjælp af periodiske signaler sendt fra en gateway. Herved kan en gateway definere tidspunkter, hvor downlink vinduer skal åbne hos enhederne. En gateway kan kommunikere med en enhed uden først at skulle have haft en uplink transmission fra enheden. Downlink vinduerne og synkroniseringen øger enhedernes strømforbrug. En klasse C enhed vil altid lytte til netværket, medmindre enheden er ved at transmittere en besked. Klasse C enheder har det største strømforbrug.[3]

Begrænsninger ved LoRaWAN-teknologi

- Det er kun muligt at sende og modtage små datapakker ved en maksimal data rate på 50 Kbps fra end devices. Det betyder at datatunge applikationer ikke kan betjenes med LoRaWAN. En sådan applikation kan være videoovervågning, som ved lavkvalitets MJPEG coding bruger 130 Kbps.[3]
- Realtids operationer og operationer hvor responstiden ikke må være høj, er problematiske ved LoRaWAN-teknologi. Tiden et signal er i luften, er fx 40ms ved kun 10 bytes og en spredningsfaktor på 7. Det kan heller ikke deterministisk afgøres hvor lang tid det tager at sende en besked, da andre enheder kan besætte samme kanal i en periode, og derved tvinge et end device til at vente før det forsøger at sende en besked igen.[3]
- Rækkeviden af en LoRaWAN-enhed er 5km i urbane zoner og 20km i landbrugszoner.
 [46] Men rækkevidden er afhængig af hindringer, som er i vejen for den direkte linje mellem en gateway og et end device. Faseforskudte signaler fra overfladerefleksioner der når frem til modtageren af signalet sænker den modtagne signalstyrke. Udregninger af tabet af signalstyrken, og derved rækkevidden, kan beregnes ved brug af Fresnel zoner.[29]

Fair use-grænser

I EU er der defineret en række fair use-grænser for operation på de licensfrie frekvensbånd.[22] Omend at frekvensbåndene er uregulerede i Sierra Leone, bør båndbredden og tiden på et netværk ikke misbruges, da kontinuerlig brug er til skade for kommunikationen mellem andre enheder.

På flere af de Europæiske kanaler er den maksimale duty cycle afgrænset til 1%. Duty cycle er den tid, som en enhed maksimalt kan besætte en kanal. Besætter en enhed en kanal i 1 sekund, skal enheden nu vente i 99 sekunder før den kan besætte kanalen igen.

The Things Networks Public community network har en Fair Access Policy,[41] som begrænser uplink tid til 30 sekunder per 24 timer per enhed, og antallet af downlink beskeder til 10 beskeder per dag per enhed. På private netværk gælder politikken ikke, men lokale love og regulativer skal overholdes.

3.1.3 Valg af netværksteknologi

En sammenligning af udvalgte parametre for Sigfox, LoRaWAN og LoRa kan ses i tabel 1. I Sierra Leone findes der endnu ikke et Sigfox-netværk.[69] En indledende investering på 4000€ for en base station vil være nødvendig, og det vil give dækning i et begrænset område af 40km radius omkring stationen. Private netværk er endvidere ikke tilladt. Sigfox ville være oplagte at bruge, hvis selskabet havde haft netværksinfrastruktur i Sierra Leone, da hver enhed har en bedre rækkevidde end LoRa/LoRaWAN-enheder.

LoRa/LoRaWAN tillader private netværk med den begrænsning, at alle end devices skal bruge et proprietært chipset fra firmaet Semtech. Både LoRa/LoRaWAN og Sigfox er skalérbare løsninger, som har fokus på et minimalt strømforbrug hos netværkets enheder. Ved LoRa skal et MAC lag implementeres, hvilket giver mulighed for at implementere andre netværkstopologier, fx mesh-netværk. Det er ikke muligt ved LoRaWAN og Sigfoxnetværk, som udelukkende benytter star topologi-netværk.

Muligheden for at opbygge et billigt og privat netværk uafhængigt af etablerede base stationer, samt friheden til at vælge netværkstopologi, vurderes som de vigtigste parametre, hvilket LoRa lever op til. LoRa lever også op til kravsspecifikationens krav, fra afsnit 1.9, om at den valgte netværksteknologi skal kunne implementeres som et IoT-netværk, være skalérbart, have energieffektiv transmission og være baseret på licensfrie frekvensbånd. Derfor vælges LoRa som netværksteknologi.

	Sigfox	LoRaWAN	LoRa
Netværkstopologi	Star	Star	Afhængigt af imple-
			mentering
Modulationsteknologi	BPSK	CSS	CSS
Frekvensbånd	Ulicenserede bånd	Ulicenserede bånd	Ulicenserede bånd
Båndbredde	100Hz	$125 \mathrm{kHz}$ og $250 \mathrm{kHz}$	125kHz og 250kHz
Maksimalt antal be-	140 uplink beske-	Ubegrænset	Ubegrænset
skeder per dag	der og 4 downlink		
	beskeder		
Maksimal payload	12 bytes uplink og 8	243 bytes	
	bytes downlink		${\sim}243$ by tes. Afhæn-
			gigt af implemente-
			ring
R lpha k k e v i d d e	10km i urbane om-	$5~\mathrm{km}$ i urbane om-	$5~\mathrm{km}$ i urbane om-
	råder og 40 km i	råder og 20 km i	råder og 20 km i
	landbrugsområder	landbrugsområder	landbrugsområder
Private og lokale	Nej	Ja	
netværk er tilladt			Ja
Standardisering	Sigfox, i samarbejde	The LoRa Alliance	Ingen
	med The European		
	Telecommunications		
	Standards Institute		
	(ETSI)		
Pris for en station	4000€ (base station)	>100€ (gateway på	
		lokalt netværk) /	Afhængig af imple-
		>1000€ (base sta-	mentation
		tion)	

Tabel 1: Sammenligning af tre LPWAN-teknologier. Både Sigfox og LoRaWAN benytter startopologi, mens der i LoRa kan implementeres andre topologier. Sigfox har en længere rækkevidde end LoRaWAN/LoRa i landbrugsområder, mens LoRaWAN/LoRa tillader private netværk. Tabellen indeholder blandt andet udvalgte parametre fra Table 1 i [46].

3.2 Netværkstopologi

Der findes fire hovedkategorier for netværkstopologier, og heraf et antal variationer af hver.[26] De fire kategorier, bus, star, ring og mesh, samt nogle underkategorier, kan ses på figur 12. Bus-topologier er ofte benyttet i kablede netværk, og kendetegner sig ved at alle



Figur 12: Her ses syv forskellige netværkstopologier. Topologien 'Fully connected' er en form for mesh-netværk. 'Line' er meget lig en 'Ring'-topologi, idet enhederne kun har forbindelse til deres umiddelbare nabo til hver side. 'Tree' er en underkategori af 'Star'. Den kaldes også for 'Star of Stars' da det er en sammenhæng af star-topologier. Figuren er lånt fra [52].

enheder er koblet til det samme kabel. Ethernet er en type netværk der benytter denne topologi. Star-topologier er navngivet efter den form, som forbindelserne danner når de kortlægges. Topologien er kendetegnet ved at alle enheder i netværket er forbundet til én central enhed. Da det er begrænset hvor mange enheder en sådan central enhed vil kunne håndtere, forbindes disse centrale enheder ofte til andre enheder der har samme funktion, og dette kan kaldes et træ eller en udvidet star-topologi. I ring-topologier er hver enhed forbundet til to sidemænd, og data sendes rundt i ringen igennem disse. I mesh-topologier er enheder forbundet internt, og der er ofte flere veje informationer kan bevæge sig gennem netværket. Det gør mesh-netværket smidigt, sammenlignet med de andre topologier, da der er redundante forbindelsesveje gennem netværket, som gør det muligt at til- eller frakoble enheder. Nogle store netværk, som internettet, består af en kombination af flere af topologierne.

LoRaWAN benytter star-topologi med en central gateway med flere direkte forbundne end devices. Det har den fordel, at hvert end device har en direkte forbindelse til en gateway som er garanteret internetforbindelse. Det er samtidig nemt at tilføje end devices til netværket, da de arbejder uafhængigt af andre enheder på netværket. En ulempe ved denne topologi er udbredelse af dækning. Man er begrænset til det område hvor gatewayen har rækkevidde til at sende og modtage data, hvor der kan være elementer i landskabet der forstyrrer signalet. Der kan derfor ikke garanteres dækning, selvom et end device befinder sig inden for gatewayens teoretiske rækkevidde. Begge disse problemer kan løses ved at opsætte flere gateways i forskellige positioner med overlappende dækningsområder. Det gør dog implementering af netværket dyrere.

Et netværk med en mesh-topologi ville kunne minimere disse problemer. Et mesh-netværk vil have redundante forbindelser, således at hvis et end device befinder sig et sted hvor der i den ene retning er noget der blokere signalet, kan den formentlig få forbindelse til et andet device i den anden retning og sende data igennem denne ud på netværket. Topologien vil kunne udvide det geografiske område som netværket dækker. Dette er tilfældet da et end device i den ene ende af netværket ikke behøver en direkte forbindelse til en enhed i den anden, så længe enhederne i netværket er placeret tæt nok sammen til at hver har forbindelse til de nærtliggende enheder.

Et forsøg foretaget over et campus-areal med et LoRa-opbygget netværk med en enkelt gateway, som fulgte mesh-topologien, viste at dette forbedrede netværkets evne til at levere pakker.[38] I forsøget blev 19 enheder placeret rundt omkring på et campus-område, både indendørs og udendørs. Forsøget viste at enheder der ikke kunne oprette kontakt direkte til gatewayen nu kunne sende data til denne, hvilket gjorde det muligt at samle data fra positioner der før ikke var muligt uden at opsætte flere gateways.

3.2.1 Valg af netværkstopologi

For at vælge en topologi til opbygning af netværket, er det vigtigt at have besluttet hvilke krav der stilles til netværket og hvilke egenskaber der ønskes fra det. Ud fra de stillede krav i kravspecifikationen, afsnit 1.9 og 1.9, kan en række krav opstilles.

Krav til netværk:

- Det skal være ukompliceret at tilføje flere enheder til netværket.
- Netværket skal kunne håndtere at enheder nogle gange ikke er aktive.
- Netværket skal kunne strække sig over et større geografisk område.
- Netværket skal kunne overkomme terrænmæssige forhindringer der kan svække signalet, som træer og mindre bygninger.

Ud fra disse krav er det muligt at begynde udvælgelsesprocessen af en netværkstopologi. Herunder gennemgås henholdsvis Star og Mesh-topologierne for at vurdere hvor godt hver af disse lever op til de stillede krav.

Star

Det skal være ukompliceret at tilføje flere enheder til netværket.

Tilføjelse af end devices er simpelt, hvis de bliver opstillet inden for rækkevidde af en gateway. Ønskes en enhed tilføjet udenfor rækkevidden af eksisterende gateways, skal der opsættes en ny gateway, hvilket komplicerer og fordyrer opsætningen.

Netværket skal kunne håndtere at enheder nogle gange ikke er aktive.

End devices kan være aktive og inaktive uden at det skaber problemer. Der modtages så bare ingen data fra inaktive enheder. Hvis en gateway til gengæld er ude af drift, vil det resultere i at alle end devices, der var forbundet til denne, ikke kan sende data selvom de måtte være aktive.

Netværket skal kunne strække sig over et større geografisk område.

Netværket kan udbedes til store geografiske områder ved at implementere flere gateways.

Netværket skal kunne overkomme terrænmæssige forhindringer der kan svække signalet, som træer og mindre bygninger.

For at overkomme forhindringer i landskabet, og dermed skabe god dækning, er det nødvendigt at implementere flere gateways med overlappende dækningsområder. Det er for at sikre at hvis en enhed er blokeret i den ene retning pga. terrænmæssige forhindringer, kan en anden gateway modtage dens data.

Over ordnet

Som det fremgår er en af fordelene ved dette netværk simplicitet. Hver enhed skal kun kommunikere med én anden enhed, nemlig gatewayen. Dette betyder at det er simplere at opbygge og udvikle netværket. En af ulemperne er dog at hvis en gateway går ned, vil det betyde at op til flere funktionelle enheder ikke kan levere data, fordi en enhed er inaktiv. Dette kan løses ved at opsætte flere gateways med overlappende dækning, hvilket formentlig alligevel skal gøres for at få dækning på trods af terrænet. Den øgede mængde gateways der kræves, øger omkostninger for opsætning af netværket, selvom det gør det nemmere at tilslutte end devices. Placering af gateways er en vigtig faktor i hvor stort et område der kan dækkes. Dette betyder at der skal lægges tanke i hvor gateways placeres.

Mesh

Det skal være ukompliceret at tilføje flere enheder til netværket.

Tilkobling af enheder har i teorien blot det ene krav, at den nye enhed skal være inden for kommunikations-rækkevidde af en af de eksisterende enheder i netværket. Dette betyder at det er simpelt at tilføje nye enheder til netværket. I praksis kan der dog være nogle få overvejelser der skal foretages afhængigt af mulige begrænsninger der måtte være på netværket. Disse begrænsninger kan for eksempel være begrænsninger på antal hop en besked må foretage og hvor mange beskeder en enkelt enhed må videresende.

Netværket skal kunne håndtere at nogle enheder nogle gange ikke er aktive.

Hvis en eller flere enheder i netværket er inaktive, vil de resterende enheder i netværket kunne finde en anden vej for kommunikationen gennem netværket. Hvis en af de enheder der fungerer som gateway er nede, vil enhederne kunne diregere data til en af de andre gateway-enheder, og dermed opretholde forbindelsen.

Netværket skal kunne strække sig over et større geografisk område.

I teorien er den geografiske udbredelse af denne type netværk ikke begrænset, så længe de enkelte enheder har en indbyrdes forbindelse. I så fald vil netværket kunne strække sig over store områder, hvor hver enhed kan kommunikere med alle andre igennem en række andre enheder i netværket. I praksis vil der være nogle begrænsninger, i form af en begrænsning i hvor mange gange en besked må videresendes og hvor mange adresser der kan gemmes i enhedernes routing tabeller. For at modvirke disse begrænsninger, skal gateway-enhederne spredes ud i netværket for at sikre forbindelse og redundans.

Netværket skal kunne overkomme terrænmæssige forhindringer der kan svække signalet, som træer og mindre bygninger.

Enheders evne til at forbinde til hinanden gør det muligt for enheder, der ikke kan sende direkte til en gateway-enhed, enten grundet afstand eller forhindringer, at sende deres data til en nærliggende enhed i en anden retning, der har bedre forbindelse til gateway enheden, og dermed overkomme forhindringen. Dette gør netværket mere robust, og betyder at placeringen af gateways er mindre vigtig.

Over ordnet

Mesh-topologien stiller krav til enhederne i netværket, da hver enhed skal foretage flere

transmissioner når beskeder videresendes. Enhederne har behov for hukommelse til opbevaring af routing tables. Kravene til enhederne føres derfor over på udviklere der laver enheder til netværket. Netværket er mere kompliceret end star-topologinetværk, men tilbyder til gengæld redundans i form af andre veje for data.

Star og mesh-topologier har forskellig kompleksitet. Der findes begrænsninger for begge netværkstyper. Det vil blandt andet være begrænset hvor mange andre enheder i meshnetværket hver enhed kan have gemt i sin routing tabel. Det vil ligeledes være begrænset hvor mange enheder en gateway kan have forbundet i star-topologien uden at der skal udvikles anden hardware til gateways end de andre enheder, hvilket vi gerne vil undgå.

Da det er et projektmål at drive enhederne fra en vedvarende energikilde, som angivet i afsnit 1.7, er det nødvendigt at tage højde for at alle enheder kan have en ustabil levetid og kan være offline, inklusivt gateways. hvis de fx er drevet fra solpaneler. Det betyder at der er brug for et netværk der i høj grad kan håndtere dette. Redundans i form af forbindelse til mindst en aktiv gateway er derfor vigtigt. Dette tilbyder mesh-topologier i højere grad sammenlignet med star-topologier. Hvis en gateway er offline ved star-topologi, vil de enheder der var forbundet til denne alle være afbrudt forbindelse.

Redundans og evnen til at håndtere mere ustabile enheder, er grundlaget for valget af at benytte mesh-topologi.

3.3 Synkronisering af gateway og end devices

I dette afsnit undersøges metoder til at spare energi ved at lade enhederne sove i den tid, hvor de ikke behøver at være vågne og lyttende på netværket.

Enhederne har begrænset energi-kapacitet, og det kan være problematisk for enheder at være kontinuerligt aktivt lyttende på et netværk, som det normalt gøres når en mesh-topologi implementeres, hvor enheder skal videresende data for andre enheder. For at overkomme dette problem, foreslås en løsning hvor enhederne nøjes med at være aktivt lyttende i et dagligt dataudvekslingsvindue, hvor al kommunikation skal foregå. Lavenergi 'Real Time Clock'-moduler, kaldet RTC-moduler, holder styr på tiden for hver enkelt enhed på netværket. Enheder er konfigureret til at tilgå netværket på et udvalgt tidspunkt, fx kl. 12:00:00. Ved hjælp af et interrupt-signal fra hver enheds RTC, vil enheden vågne op på det valgte tidspunkt. Alle data udveksles i tidsvinduet. Herunder opdateres den nuværende tid for hver enhed også. Princippet kan ses på figur 13. Hvis en enhed under dataudvekslingsvinduet ikke modtager en acknowledgment-besked som svar på afsendte beskeder, vil den



Figur 13: Her ses et eksempel på hvorledes dataudvekslingsvinduet fungerer. Samtidig ses det hvordan en enhed der af den ene eller anden grund har en forkert tid bliver synkroniseret igen. Her er det End device 2 der ikke er synkroniseret, og derfor vågner på et andet tidspunkt end de andre enheder. End device 1 ved dog at den har forbindelse, da den fik respons på beskeder i løbet af dataudvekslingsviduet. Derfor broadcaster denne tiden på netværket på tidspunkter hvor den alligevel er vågen for for eksempel at foretage en sensor-måling. Enheder broadcaster dog kun tiden, hvis de er tæt på fuldt opladet.

begynde at lytte aktivt på netværket efter et broadcast der indeholder tiden. Enheden vil ikke foretage sig andet indtil tiden er modtaget. Enheder der fik acknowledgment beskeder ved at de havde kontakt, og dermed at de er synkroniseret med andre enheder. Disse synkroniserede enheder vil på tidspunkter, hvor de er vågne, for eksempel for at tage en sensor måling, broadcaste den nuværende tid ud på netværket, såfremt de er tæt på fuldt opladet. Når en lyttende enhed modtager et sådan broadcast, vil den opdatere tiden i sin RTC og gå tilbage til normal operation.

For at forhindre at enheder bruger al deres energi på at broadcaste tiden, vil kun enheder der er tæt på opladet gøre det. Enheder tjekker selv deres egen forsyning intervalvist. Det er vigtigt at forhindre en enhed i at skulle videresende så mange beskeder, at den vil bruge alt sin energi. Det er derfor nødvendigt at indføre nogle begrænsninger, som skal lægges på de enkelte noder. De skal begrænses i hvor mange beskeder de må videresende i løbet af et dataudvekslingsvindue. Et problem ved dataudvekslingsvinduet er, at vinduet skal være længere jo flere enheder der er i netværket, da hver enhed vil tilføje en besked der skal nå igennem netværket. En løsning på dette problem vil være at tilføje flere gatewayes. Dette vil betyde at data ikke skal bevæge sig den lange vej igennem netværket, og derved gennem færre enheder.

3.3.1 Alternativer til RTC-styret dataudvekslings vindue

To alternativer til synkroniseringsvindue-princippet gennemgås kort.

Wake-up Receivers

I det senere afsnit 4.1.2 præsenteres en LPWAN-platform kaldet KRATOS. Hardwaren i platformen har en en wake-up Receiver, forkortet WuRX, som kan aflæse indkommende datapakker udelukkende for deres modtager, og afgøre om enheden selv er modtager af dataen. WuRX gennemgås senere.

Med en WuRX på sovende gateways, kan end devices kommunikere til en gateway asynkront med star topologi. Fx kan end devices sende deres data, når de har en passende mængde oplagret energi. En gateway kan dog ende med at blive vækket ofte. Skal Meshtopologi bruges, skal alle enheder i netværket have en WuRX.

Lyssensor

Et andet alternativ er at forsøge at synkronisere enhederne ved hjælp af en lyssensor (lysafhængige modstande eller fotodioder), som måler fx solopgangen eller når der er nået en bestemt lysstyrke for dagen. Hvis sensordata om natten kan undværes, kan energikapaciteten til en enhed dimensioneres mindre.

3.4 Implementering af Mesh-netværkstopologi

Til at implementere den valgte netværksteknologi og den valgte netværkstopologi, er det valgt at benytte Radiohead, som er et radio-kommunikations-bibliotek til mikrocontrollere. I dette afsnit vil bibliotekets Mesh-klasses funktionalitet kort gennemgås, transmissionstider undersøges, og en protokol for payload vælges.

Mike McCauley har udviklet et mikroprocessorbibliotek, [55] der indeholder drivere til en række radiomoduler, herunder Semtech SX1276. Biblioteket hedder RadoHead, og det indeholder blandt andet en klasse, RHMesh, som kan konfigurere et mesh-netværk af flere enheder. Mesh-netværkets virkemåde er kort beskrevet herunder. Hver node har et routing table til en allerede givet destination node. En destination node vil i dette projekt altid være en gateway. Når en node skal sende en vilkårlig besked, vil den først søge i sit routing table for adressen på dens ønskede destination node. Kan adressen ikke findes, fx hvis den
selv er en ny node i netværket, vil den i stedet udsende en route discovery request. Alle andre nodes, som modtager en route discovery request, vil først skrive sig selv ind i den, til route discovery message, medfølgende liste over besøgte nodes, og herefter videresende selvsamme request med den opdaterede liste. Hvis en node modtager en sådan request, hvor den allerede er skrevet ind i den medfølgende liste, vil den ignorere denne request, således at requesten ikke overbebyrder netværket eller går i ring. Videresendelsen af route discovery request fortsætter indtil den ønskede destination node vil modtage requesten. Når det sker, vil destination node sende et route discovery respond retur indeholdende den endelige liste over ruten, og alle nodes på listen vil opdatere deres routing tables, når de modtager respons'et. Der kan opstå race conditions i netværket, hvis der findes flere veje til den ønskede destination node. Her vil det altid være routing table fra den sidst udsendte route discovery request der vil være gældende.

I det senere afsnit 4.2.1 vælges en mikrocontroller ATmega328P som projektets mikrocontroller. Radiohead's mesh-bibliotek kræver 2KB dynamisk RAM, hvilket er præcist den mængde SRAM, en ATmega328P har tilgængeligt. Biblioteket er testet på to ATmega328P enheder, hvilket resulterede i et ekstremt ustabilt netværk, hvor transmission og modtagelse af beskeder kun sjældent fungerede. Enhederne frøs efter få sekunder. Det skyldes sandsynligvis at den sidste dynamiske RAM er blevet opbrugt i runtime, hvorefter der sker et stack overflow. Biblioteket er derefter blevet testet på to Arduino Mega boards, som har mikroprocessoren ATmega2560 med 8KB SRAM. Enhedernes beskedudveksling fungerede her uden fejl med samme kode. Arduino Mega'erne forblev desuden stabile, hvilket verificerer antagelsen om at ATmega328P ikke kan drive biblioteket. Da der skal bruges SRAM til andre og fremtidige funktioner, er det blevet vurderet at det ikke kan svare sig at optimere biblioteket til at køre på en ATmega328P. I stedet er en anden mikroprocessor med mere SRAM blevet valgt. Udvælgelsen uddybes senere i afsnit 4.2.4.

3.4.1 Rækkevidde af RFM95 ved forskellige standard konfigurationer med Radiohead biblioteket

Radioheads bibliotek har fire forskellige konfigurationer for standardopsætning af LoRatransceiveren RFM95, som er blevet uddelt i løbet af projektet. Konfigurationerne kan ses i tabel 2. Bw er båndbredde, Cr er code rate, Sf er spredningsfaktor og CRC er cyclic redundancy check.

ModemConfigChoice	, Enumerator
Bw125Cr45Sf128	$\mathrm{Bw}=125~\mathrm{kHz},\mathrm{Cr}=4/5,\mathrm{Sf}=128\mathrm{chips/symbol},\mathrm{CRC}$ on. Default medium range
Bw500Cr45Sf128	$\mathrm{Bw}=500$ kHz, $\mathrm{Cr}=4/5,\mathrm{Sf}=128\mathrm{chips/symbol},\mathrm{CRC}$ on. Fast+short range.
Bw31_25Cr48Sf512	$\mathrm{Bw}=31.25$ kHz, $\mathrm{Cr}=4/8,\mathrm{Sf}=512\mathrm{chips/symbol},\mathrm{CRC}$ on. Slow+long
Bw125Cr48Sf4096	Bw = 125 kHz, Cr = 4/8, Sf = 4096 chips/symbol, CRC on. Slow+long

Tabel 2: Standard ModemConfigChoice som der kan vælges i Radiohead biblioteket.[56]

Radiohead-bibliotekets forfatter har udført små prøver af rækkevidden mellem to RFM95 moduler ved forskellige konfigurationer. En klient base station har været forbundet til en VHF discone-antenne i 8 meters højde fra jorden. Klienten har sendt data til en server station, som har været forbundet med en 17,3cm 1/4 bølgelængde antenne i 1 meters højde fra jorden. Der er i alle prøver transmitteret ved 434MHz med en båndbredde på 125kHz. Signalet er gået gennem en skov med tæt vegetation. Resultaterne kan ses i tabel 3.[57]

Formål	Konfiguration	Opnået rækkevidde
	Tx power = 20 dBm	
Mellem rækkevidde	$\mathrm{Cr}=4/5$	9lm
(med standard opsætning)	${ m Sf}=128~{ m chips/symbol}$	28111
	CRC on	
	Tx power = 13 dBm	
Stor rækkevidde og langsom	$\mathrm{Cr}=4/8$	0]rm
beskedtransmission	$\mathrm{Sf}=4096~\mathrm{chips/symbol}$	28111
	CRC on	
	$\mathrm{Tx} \ \mathrm{power} = 20 \mathrm{dBm}$	
Stor rækkevidde og langsom	$\mathrm{Cr}=4/8$	3km, hvor 12 octet beskeder
beskedtransmission	$\mathrm{Sf}=4096~\mathrm{chips/symbol}$	tager 2 sekunder at transmittere
	CRC on	

Tabel 3: Test af RFM95 modulers rækkevidde ved forskellige konfigurationer foretaget af forfatterne bag Radiohead-biblioteket. Den opnåede rækkevidde er gennem en skov med tæt vegetation.

Når der transmitteres med et 20dBm signal, svarende til 100mW, kan en besked ifølge testen sendes 2km med RFM95's standardkonfiguration. Det er ikke dokumenteret hvor lang tid det i så fald tager at sende en besked. For at opnå en længere rækkevidde på 3km, skal spredningsfaktoren sættes højere, hvilket i testens tilfælde medfører at beskeder tager 2 sekunder at transmittere. Jo kortere tid beskedtransmissionerne tager, jo mindre energi skal der til for at transmittere.

Da optimering af rækkevidden ikke er inden for dette projekts tidsramme, udregnes der ikke et link budget. Ovenstående er angivet for at give et eksempel på hvilken rækkevidde der forventes at kunne opnås med forskellige konfigurationer. Beskeder skal dog generelt holdes korte, således at energiforbruget for en beskedtransmission er minimeret.

Time on air og LoRa aktiv tid ved sendt besked

For at bestemme hvilken Radiohead-konfiguration, som skal benyttes, samt bestemme længden af datatransmissions-vinduet, undersøges transmissionstiderne for de forskellige konfigurationer. Sekundært undersøges det hvorvidt der er en tidsgevinst ved at drive mikrocontrolleren ved 16MHz i stedet for 8MHz under transmission. Forsøget er beskrevet detaljeret i bilag H.

Transmissionstiden, såkaldt Time On Air, TOA, er blevet udregnet for de fire gængse konfigurationer i Radiohead biblioteket.[34][40] Udregningerne for én beskedtransmission tager udgangspunkt i et pakkeformat bestående af 8 symbol preamble, en eksplicit header af 4 octets (TO, FROM, ID, FLAGS) og mellem 0 og 251 octets data. CRC benyttes og håndteres internt af RFM95 modulet.[58]

I filen EW_Monitor_nodes/test/transmissiontime_tests/transmissiontime_tests.ino i afleveringsmappen ses koden, som er blevet brugt til at måle den reelle tid, som det tager at transmittere en besked. Den resulterende tid inkluderer TOA, som estimeres til at være det samme som den tid der reelt bruges på at transmitteres af RFM95. Den resulterende tid inkluderer også den tid hvor mikrocontrolleren facilitere en transmission, samt venter på at få et acknowledgement på at data er modtaget af destinationen. Med andre ord er tiden som det tager at sende eller forwarde en besked blevet målt.

Payload'en består af 8-bit i alle tilfælde. Første besked er inklusiv en discovery message besked og tager derfor længere tid. Netværket består af to nodes med samme konfiguration, så den målte tid er den kortest mulige for en discovery message besked. I tabel 4 ses udvalgte resultater for den korte og mellemlange rækkevidde. Resultater for den store rækkevidde er ikke taget med, da beskeder her som minimum tager 1600ms, men resultaterne kan ses i bilaget. Den sidste indstilling, Bw125Cr48Sf4096, er desuden ustabil. Det kan skyldes at den første lange route discovery message fejler, fordi at signalet når at blive forstyrret. Når konfigurationer, som resulterer i en lang transmissionstid benyttes, skal et Radiohead timeout forlænges. Eksempler på timeout forlængelse kan ses i koden.

Konfiguration og formål	Konfiguration	TOA [ms]	Brugt tid i alt [ms]
Bw500Cr45Sf128: Kort rækkevidde og hurtig beskedtransmission	Båndbredde = 500kHz Code rate = 4/5 Spredningsfaktor = 128 chips/symbol	Besked: 9,0 Ack: 6,5 I alt: 15,5	8MHz: Første besked: 59-60 Almindelig besked: 24-27 16MHz: Første besked: 55 Almindelig besked: 23-24
Bw125Cr45Sf128: Mellem rækkevidde	Båndbredde = 125kHz Code rate = 4/5 Spredningsfaktor = 128 chips/symbol	Besked: 36,1 Ack: 25,9 I alt: 62,0	8MHz: Første besked: 207 Almindelig besked: 88 16MHz: Første besked: 204-205 Almindelig besked: 86

Tabel 4: Transmissionstider ved to konfigurationer af RFM95 styret fra henholdsvis en 8Mhz og en 16MHz mikrocontroller. Første besked er altid en route discovery-besked, som skal klarlægge routing tables for de to enheder i testen. Derfor tager den længere tid end de efterfølgende beskeder. Bw125Cr45Sf128 er Radiohead-bibliotekets standardkonfiguration.

Testens resultater viser, at der er en beskeden gevinst på transmissionstiden af beskeder på få millisekunder ved at styre RFM95 modulet fra en mikrocontroller, som kører ved 16MHz. For default konfigurationen vindes der 2ms på en almindelig besked og 2ms til 3ms på første besked. Resultatet er forventeligt, da RFM95 har sin egen dedikerede mikrocontroller, hvis hastighed ikke kan styres. Til gengæld viser testen også, at konfigurationer med lang rækkevidde ikke egner sig til et kort tidsvindue. De enkelte konfigurationers rækkevidde er ikke undersøgt, men følges Radioheads undersøgelse af rækkevidde fra tabel 3, kan en række på to kilometer forventes for standardkonfigurationen. Det lever op til kravsspecifikationens krav om rækkevidde på mindst én kilometer fra afsnit 1.9. Derfor vælges det fremover at benytte default konfiguration, som giver en mellem rækkevidde og en hurtig transmissionstid sammenlignet med konfigurationerne for den store rækkevidde.

Valg af tidsvindue ud fra målinger ved 8 byte payload

Tidsvinduet skal tage udgangspunkt i antal enheder i netværket i forhold til antallet af gateways. Herudover skal vindues vælges på baggrund af at discovery messages kan nå at blive sendt gennem flere nodes inden for tidsvinduet. Der er ikke blevet beregnet på et passende tidsvindue, da den reelle beskedtransmissionslængde er svær at forudsige. I tilfælde af at to enheder forsøger at kommunikere samtidig, vil de begge vente i en tilfældig periode. I stedet vælges der et arbitrært tidsvindue på 10 sekunder, som er betydeligt mere tid end de målte beskedtransmissionstider i tabel 27.

3.4.2 Valgt protokol for payload

Payload er den datapakke, som afsenderen af en besked ønsker at modtageren skal modtage. En payload kan fx indeholde målte sensordata fra en række sensorer. En payload skal være så lille som mulig, således at den er hurtigere at sende. Cayenne Low Power Protocol (CayenneLPP) er en bredt benyttet protokol til at pakke data. Protokollen er direkte integreret i fx TheThingsNetwork/myDevices[49]. Protokollen understøtter sensor-enheder med flere forskellige typer kanaler. Det vil sige at sensordata kan kodes og sendes optimalt for flere forskellige datatyper. Datatyperne følger IPSO Alliance Smart Objects Guidelines, som identificerer datatyper med et objekt ID.

I CayenneLPP er objekt ID'et konverteret til at fylde én byte. Alt efter datatypen kan der herefter bruges én eller flere bytes til selve dataen. Når modtageren dekoder en payload med CayenneLPP, kan den dekodes til en JSON string, som indeholder information omkring hvilken sensortype der er brugt, samt enhedstypen af den aflæste værdi. Et eksempel kan ses på figur 14, hvor et analogt input er blevet aflæst. Dekodningen vil typisk ske på en webserver. I tabel 5 og 6 kan det ses hvordan CayenneLPP pakkes og dekodes. Der er



Figur 14: En oversat JSON string fra en pakket CayenneLPP payload. Her er modtaget data fra kanal 0 af typen 2 der svarre til analogt input, og værdien 0.44V.

et lille overhead ved CayenneLPP sammenlignet med at sende data i råt format. Hvis enhederne i fremtiden skal aflæse forskellige typer sensorer, og evt. flere af samme sensor

Type	IPSO	LPP	HEX	Data størrelse	Data opløsning pr bit
Digital input	3200	0	1	1	1
Digital output	3201	1	1	1	1
Analog input	3202	2	2	2	0,01 Signed
Analog Output	3203	3	3	2	0,01 Signed

Tabel 5: Fire datatyper fra CayenneLPP kan ses i tabellen. De enkelte datatyper, som tager udgangspunkt i en standard kaldet IPSO, oversættes i CaynneLPP til en byte. Størrelsen af datatyperne er forskellige.[11]

Payload (hex)	03 67 01 05 67 00 FF				
Data kanal	Туре	Værdi			
$03 \rightarrow 3$	$67 \rightarrow$ Temperatur	$0110 = 272 \rightarrow 27.2^{\circ}\mathrm{C}$			
$05 \rightarrow 5$	$67 \rightarrow$ Temperatur	$00\mathrm{FF} = 255 {\rightarrow} 25.5^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$			

Tabel 6: Et eksempel på hvordan bytes kan dekodes til to sensormålinger.[11]

på forskellige kanaler af samme enhed, så er CayenneLPP en effektiv metode til at pakke den aflæste data.

CayenneLPP er implementeret i projektets produkt.

3.5 Gateway

Radiohead's Mesh-netværk udgør et lukket netværk, hvor lukket betyder at kun andre enheder med både LoRa-moduler og Radiohead Mesh kan kommunikere indbyrdes på netværket. For at få data ud af netværket, skal dataen sendes ud gennem en gateway. Gateway'en skal give enhederne adgang til en webserver med en database, hvor slutbrugeren kan hente sensordataen ud. Opbygning af en webserver og repræsentation af sensordata er ikke en del af projektet.

SIM800L GSM-modul

Til at sende data ud af det lukkede netværk benyttes GSM/GPRS-modulet SIM800L. Modulets formål er at fungere som gateway til en webserver. Ved hjælp af fx en SMS-gateway service kan en SMS videresendes fra et GSM-netværk til en webserver eller alternativt en e-mail. Selve webserveren og en SMS-gateway service er ikke implementeret indenfor tidsrammen af dette projekt.

Alternative muligheder for gateways

Et alternativ til GSM-modulet, er et irridium satellit-modul. De sikrer dækning overalt, men er dyre og har et højere strømforbrug end GSM-moduler.

Protokol for udgående data

Når gateway'en modtager data fra enhederne, har enhederne tilføjet deres egen adresse til dataen. Et eksempel på en udgående datastring kan ses i tabel 7.

Udgående data:					
0102ABCD0203EFABCD					
Adresse	LPP payload længde	LPP payload			
1 byte	1 byte	[Payload længde] bytes			
01	02	ABCD			
02	03	EFABCD			

 Tabel 7: Et eksempel på en udgående datastring med data fra to enheder hvor en sender to

 bytes data og den anden sender tre bytes.

3.6 Delkonklusion

En analyse og sammenligning af de fremtrædende LPWAN-teknologier LoRa, LoRaWAN og Sigfox er gennemført. LoRa er blevet valgt som projektets netværksteknologi, da LoRa giver mulighed for at bygge et uafhængigt privat netværk, hvor egen netværkstopologi kan implementeres. En metode til synkronisering af enheder er udtænkt, således at enheder ikke behøver at være aktive på netværket hele tiden. Dette er gjort for at spare strøm. Metoden består af benyttelsen af RTC-moduler til tidsmåling, der gør det muligt at vække alle enheder på det samme tidspunkt for her at have et fast tidsinterval til dataudveksling. Endvidere er gængse netværkstopologier gennemgået og sammenlignet. Ud fra en række krav er Mesh blevet valgt som topologi. Begrundelsen for valget er at det er ukompliceret at tilføje nye enheder, netværket er redundant og det kan dække et større geografisk område med færre gateways end fx Star-topologien. Mesh implementeres med Radiohead, som er et mikroprocessorbibliotek. Ud fra implementeringen, er transmissionstiderne for forskellige LoRa-konfigurationer blevet undersøgt, og heraf er en LoRa-konfiguration og perioden for et tidsvindue valgt. For at gøre beskeder så korte som muligt, pakkes sensordata i CayenneLPP format inden det bliver sendt fra de enkelte enheder.

4 IoT-baseret elektronisk LPWAN-enhed

Det er først undersøgt hvilke laveffekts IoT og LPWAN-enheder der allerede eksisterer, hvor fokus er på forsknings og kommercielle enheder. Herefter beskrives implementeringen af enkeltdelene i løsningsmodellen fra figur 8 på side 15. En mikrocontroller er blevet valgt og testet. Der er lavet analyser og valg af de enkelte nødvendige komponenter for en LPWAN-enhed. Til slut er der beregnet på den nødvendige energikapacitet for enheden, før at systemet kan holdes kørende over en hel nat.

4.1 Eksisterende LPWAN-enheder med fokus på et lavt effektforbrug

Et kommercielt LPWAN-produkt præsenteres, samt løsninger fra to forskningsartikler.

4.1.1 Kommercielt LPWAN-produkt

Her præsenteres et kommercielt LPWAN-produkt. Produktet er valgt på baggrund af dets strømforbrug i deep-sleep og pris.

Produktet er det nye LPWAN-board kaldet Heltec CubeCell Dev-board, hvor de første enheder blev sendt ud omkring midten af oktober 2019. Cubecell board har ifølge producenten et strømforbrug på 11µA i deep sleep tilstand, når boardet er forsynet fra et batteri. CubeCell har en PSoC 4000 series 48 MHz ARM Cortex M0+ mikroprocessor med 128KB FLASH og 16KB SRAM, samt et indbygget LoRa SX1262-modul til kommunikation.[17] LoRa SX1262 er fra den nyeste serie af LoRa transceivere fra firmaet Semtech.[76] Boardet er Arduino kompatibelt, og prisen er 13 USD per enhed.[17] Boardet er ikke open source, omend der er offentliggjort dele af schematic[31] og dele af koden på Heltecs Git-Hub side.[32]. Et board, som fx Heltec CubeCell, kunne have været valgt i begyndelsen af projektet. Det havde holdt prisen minimal, mens det ville have frigjort tid til at forbedre netværksløsningen, som præsenteres senere i denne rapport. Ulempen ved at vælge et eksisterende board, såsom fx CubeCell board, er at boardet ikke nødvendigvis kan opfylde alle krav der er opstillet i afsnit 1.9. CubeCell har fx ingen angivet temperaturkarakteristik og der er kun seks GPIO pins. Der er heller ingen mulighed for at videreudvikle nye funktioner direkte til boardet.

4.1.2 Forskning i LPWAN-boards og teknologi

Her præsenteres løsninger fra to forskningsartikler.

Dramco Uno

Forskere fra Katholieke Universiteit Leuven har udgivet en artikel[80], som præsenterer deres open-source LPWAN-platform med et board kaldet Dramco UNO.[35] Boardet kan opnå et effektforbrug på 25,2µW, når enheden er i sleep-mode. Ifølge artiklens forfattere er der udviklet mange biblioteker til kontrol af sensorer, samt hardware-designs og udviklingsværktøjer, som er open source. De fleste af de gratis værktøjer er, ifølge artiklens forfattere, designet til at være kompatible med Arduino Uno, hvilket implicerer at der fx er en USB connector og ekstern 12V forsyningskilde-indgang tilgængeligt på et givent board. Det giver mulighed for at facilitere hurtig udvikling af prototyper, men er sjældent ideelt når et ultra lavt strømforbrug ønskes.

Dramco Uno benytter mikrocontrolleren ATmega328P, som er Arduino kompatibel, således at mange Arduino biblioteker kan bruges. Mikrocontrolleren har, ifølge artiklen, et effektforbrug på ned til 0.3μ W.

Deres enhed benytter en LoRa-transceiver SX1276, som har flere forstærkere, herunder en ureguleret forstærker kaldet HF-AP. Den uregulerede forstærker bruger 24mA under transmission, hvilket er mere energieffektivt end de andre forstærkere, som derimod kan udsende på både høje og lave frekvensbånd. Transceiveren har sin egen dedikerede mikrocontroller, som øger strømforbruget. Funktionalitet, såsom MAC funktionaliteter, er derfor flyttet til ATmega328P mikrocontrolleren. Beskeder transmitteres med CayenneLPP (Cayenne Low Power Payload) format, som pakker beskederne i enkelte bytes. De transmitterede bytes kan dekodes til kanal, datatype og værdi hos modtageren.

Hele systemet er drevet af tre AA alkaline batterier. Ud fra et forsøg er den forventede levetid af deres foreslåede enhed blevet sammenlignet med andre, ifølge artiklens forfattere, lignende enheder. Batteriernes selvafladning er ikke medregnet. Alkaline batterier taber 30% ladning over fem år i rumtemperatur, og har et endnu større tab ved højere temperaturer, så de forventede levetider, som kan ses i figur 15, er i realiteten lavere.

KRATOS

En anden open source platform er KRATOS[15][53], som der også sammenlignes med på figur 15. KRATOS er en software og hardware platform udviklet af forskere fra Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH Zürich) og Fondazione Bruno Kessler. Platformen bygger på LoRa og ContikiOS, udviklet med det formål at give forskere et værktøj



Figur 15: Den forventede levetid i forhold til antal sendte beskeder per dag for forskellige boards. Spreading factor 7 er øverste linje, og spreading factor 12 er nederste linje for hver farve/board. Der sendes en 20 byte payload. Dramco Uno er 'Proposed Solution', og det ses at boardet har en længere levetid end tre ud af fire andre boards, som der sammenlignes med. Figuren er lånt fra Katholieke Universiteit Leuven[80].

til hurtigt at teste og implementere IoT netværk. KRATOS bygger på mikrocontrolleren MSP430FR5969, som er valgt på grund af et lavt strømforbrug på 0,3µA i sleep mode og en kort opvågningstid på 7µs, samt indbygget non-volatilt FRAM hukommelse i tilfælde af at enheden skulle slukke. Hardware-designet har desuden en Wake-up Receiver (WuRX), hvilket ifølge artiklen gør KRATOS til den første open source platform med WuRX. WuRX'en bruger 1,8µW i standby tilstand, hvor den lytter efter et signal i 868MHz båndet. En PIC12LF1552 mikrocontroller dekoder modtagede signalers adresse, så hele enheden ikke vækkes unødvendigt op af beskeder til andre modtagere. I figur 16 ses et eksempel på KRATOS effektforbrug over 0,8 sekunder.

Hovedpointer fra analysen af eksisterende laveffekts LPWAN-enheder

Her følger kort en sammenfatning af de informationer, som kan videreføres til denne rapports projekt.

Dramco UNO benytter mikroprocessoren ATmega328P, som har et lavt effektforbrug i power-down mode. CayenneLPP er benyttet til dette projekts enhed, som beskrevet i afsnit 3.4. Valget af en specifik forstærker på LoRa-modulet er interessant, men er ikke



Figur 16: Målinger af effektforbruget af KRATOS enhed, her kaldet mote, og dens WuRX og LoRa-modul under brug af forskellige operationer. Som det kan ses benytter enheden meget lidt strøm på at lytte efter beskeder på netværket og aktivere først når den har modtaget en besked. Figuren er lånt fra [53].

undersøgt inden for tidsrammen af dette projekt. Dramco Uno fungerer kun i et netværk af topologien star, hvor hver enhed kan vågne asynkront og sende sin data til en hovedenhed, som altid er klar til at modtage en datatransmission. Star-topologi er uddybet i afsnittet 3.2.

KRATOS bruger et andet princip til kommunikation. En KRATOS-enhed har en WuRX tilknyttet, som tillader asynkron kommunikation mellem enheder. En enhed kan altid vække en anden enhed, som også har et WuRX modul tilknyttet.

4.2 Mikrocontrolleren

Hver enhed i et IoT-netværk er styret fra en mikrocontroller, som blandt andet aflæser sensordata, faciliterer brugen af kommunikationsmoduler og eventuelt holder styr på timing. I dette afsnit analyseres og begrundes valget af en mikrocontroller. Den valgte mikrocontroller er desuden blevet testet og optimeret for dens strømforbrug.

4.2.1 Valg af mikrocontroller

Der tages udgangspunkt i en række krav for mikrocontrolleren, som skal være opfyldt. Kravene er at den valgte mikrocontroller skal:

• være let tilgængeligt for køb og være en allerede udbredt model.

- have en lav pris.
- være let at bruge og programmere, samt allerede være brugt af mange, således at det er tilgængeligt for flest mulige privatpersoner eller virksomheder at videreudvikle på projektets open source kode.
- have et lavt strømforbrug, både i aktiv tilstand og i sleep mode.

To udbredte mikrocontrollere er valgt til sammenligning. Henholdsvis ATmega328P og STM32L010. Begge er tilgængelige for køb ved en lav pris. Disse to mikrocontrollere er valgt da de begge hver især repræsentere en udbredt brugerbase. ATmega328p er den mikrocontroller der benyttes i mange Arduino boards og er derved meget udbredt og nem for de fleste at gå til. STM32L010 kommer ud af en stor serie af STM32 processorer der er vidt udbredt og benyttet i industrien, endvidere er det et produkt der er specielt designet til low power-applikationer. En opsummeret sammenligning kan ses i tabel 8.

Ultra low power mikrocontrolleren STM32L010C6 fra STMicroelectronics kører på en Arm 32-bit Cortex-M0+ processor. Den har et strømforbrug på 115µA/MHz i aktiv tilstand og 3.2µA i sleep mode.² Prisen for 1 styk ligger fra 1.04€ til 2.21€, alt efter model.[47]

ATmega328P er en bredt tilgængelig og billig mikrocontroller fra Atmel. Prisen er 1,76€ ved køb af et styk i PDIP-28 package fra Mouser. ATmega328P er udviklet til at kunne optimeres for enheders strømforbrug ved forskellige processorhastigheder. Ifølge databladet for ATmega328P-PU har mikrocontrolleren et strømforbrug ned til 0,1µA ved 1MHz, 1,8V og 25°C i power-down tilstand og 0,2mA i aktiv tilstand.³ Den er blandt andet brugt i Arduino Uno, som er et populært mikrocontroller development board fra Arduino. Uno'en har en række funktioner, som gør den til en general purpose enhed. Der er blandt andet LED'er, en spændingsregulator og et USB interface, som benytter strøm. Grundet Arduino's popularitet, er ATmega328P kendt af mange, og der findes meget information omkring mikroprocessoren på internettet og på Arduino's eget forum. ATmega328P er en lille mikrocontroller med begrænset clock hastighed, hukommelse og antal I/O pins. I løbet af projektet har det vist sig, at mikrocontrolleren ikke kan udføre de ønskede opgaver, da kapaciteten af SRAM hukommelsen er for lille. To nye mikrocontrollere med mere hukommelse er fundet, og en ny mikrocontroller er valgt ud fra disse. Herunder gennemgås en sammenligning af de to.

²Datablad i afleveringsmappen i filen 'Datablade/STM32L010C6.pdf', table 3, s. 16.

³Datablad i afleveringsmappen i filen 'Datablade/ATmega328P.pdf, s. 2.

Parameter	ATmega1284P-PU	STM32L010C6
Pris	1,76€	1,35€
Strømforbrug	200µA ved 1MHz /	115µA ved 1MHz $/$
(aktiv / sleep mode)	0,1µA	3,2µA
Stort community omkring brug	Ja	Nej

Tabel 8: Sammenligning mellem to udbredte og billige mikrocontrollere.

STM32L0-serien har et stort udvalg i mikrocontrollere med vidt forskellige specifikationer, hvor enhederne har det til fælles, at de har et lavt strømforbrug. Èn fra serien er udvalgt, og den sammenlignes med ATmega1284P, som er en anden udbredt mikrocontroller i ATmega-serien. Sammenligningen kan ses i tabel 9. STM32-mikroprocessoren har

Parameter	ATmega1284P-PU (8-bit)	STM32L071RBT6 $(32-bit)$
Pris	39,75 DKK[61]	28,748 DKK v. køb af 5 stk.[62]
Minimums indgangsspænding	1,8V	1,65V
Strømforbrug	0,4mA ved 1,8V og 1MHz $/$	93µA pr. MHz $/$
$({\rm aktiv} \; / \; {\rm sleep \; mode})$	$0,1\mu\mathrm{A}$ ved 1,8V	0,29µA
Processor has tighed $/$	$20 \mathrm{MHz}$ /	$32~\mathrm{MHz}$ /
med intern clock kilde	8MHz	16MHz
Antal general purpose I/O pins	32	51
Antal ADC kanaler	8	16
Flash hukommelse / SRAM	$128\mathrm{Kb}~/~16\mathrm{Kb}$	$128\mathrm{Kb}~/~20\mathrm{Kb}$

Tabel 9: Sammenligning af to mellemklasse mikrocontrollere.

generelt bedre specifikationer og en lavere pris end ATmega-mikroprocessoren. Der findes dog ikke en specifik STM32 IDE. Det er derfor mindre tilgængeligt at starte med STM32 mikroprocessoren. Udvikling af programmer til mikroprocessoren vil herudover også typisk starte på et dedikeret development board. De fleste af STM32 mikrocontrollerne har 3,3V som maksimal indgangsspænding, hvilket medfører at udvikleren ikke kan uploade programkode fra en USB. Udvikleren er afhængig af at have enten et FTDI board til formålet eller at have lavet et kredsløb med en niveauskifter. Til slut skal der findes eller skrives en såkaldt Arduino Core for den specifikke mikrocontroller, som kan importeres til Arduino IDE's board manager før at en computer kan skrive til og interface med mikrocontrolleren, såfremt at der skal være adgang til alle Arduino's ressourcer. Sådanne Arduino cores findes kun for et udvalg af STM32 mikroprocessorerne.

Det er muligt at benytte en STM32L0 mikroprocessor i stedet for en ATmega-processor, men det øger kompleksiteten af det samlede projekt, som har en overordnet ramme om at være bredt tilgængeligt for videreudvikling. Da en STM32 mikrocontroller vil give en mindre besparelse på cirka 10 til 25 DKK per enhed, er det værd at overveje muligheden for at skifte til STM32L0-serien, men det er, med tidsrammen og den øgede kompleksitet i mente, ikke blevet prioriteret i dette projekt.

4.2.2 Test og optimering af ATmega328P-PU's strømforbrug

Før ATmega1284P blev valgt som projektet mikrocontroller, var der allerede gennemført en optimering af ATmega328P's strømforbrug. Da begge mikrocontrollere er i samme serie og med samme overordnede arkitektur, kan koncepterne for optimeringen af ATmega328P overføres til ATmega1284P. Derfor gennemgås tests og optimering af strømforbruget af ATmega328P herunder.

Tests af ATmega328P-PU

For at teste ATmega328P-PU'ens aktive strømforbrug, er mikrocontrolleren placeret i et minimalt kredsløb, bestående af en ekstern krystal på enten 16MHz eller 8MHz, samt to kapacitorer. Mikrocontrolleren testes også ved brug af dens indre RC oscillator. Det samme simple program er brugt til alle tests. En fuld beskrivelse af testen kan ses i bilag D. Testens resultater kan ses i tabel 10.

Strømforbruget er mindst, når de lave spændinger benyttes. Der blev ligeledes brugt mindre strøm jo langsommere krystallen er. Strømforbruget er endvidere mindst ved brug af mikrocontrollerens indre fabrikskalibrerede krystal. Når forsyningsspændingen går over 3,3V, sker der en stigning.

På figur 17 kan det ses, at det er muligt at få forsyningsspændingen ned til 1,8V, men mikrocontrolleren kan i så fald ikke operere ved mere end 4MHz. Ved 8MHZ kan mikrocontrolleren, ifølge databladet, opereres ved ned til 2,4V.

VCC	Ekstern 8MHz krystal	Ekstern 16MHz krystal	Indre oscillator på 8MHz med prescaler (1MHz)	Indre oscillator på 8MHz
1,8V	-	-	0,45mA	-
2,7V	Mikrocontrolleren tænder ikke	Mikrocontrolleren tænder ikke	0,7mA	Mikrocontrolleren tænder ikke
2,77V	3,1mA	-	0,75mA	2,9mA
$2,\!8V$	-	5,4mA	0,8mA	2,9mA
3,3V	3,9mA	8,4mA	1,3mA	3,7mA
5V	11,8mA	16,4mA	$7,9\mathrm{mA}$	12mA

Tabel 10: Strømforbruget af ATmega328P-PU i aktiv tilstand drevet ved forskellige oscillatorer. Streger angiver forsyningsspændinger, som ikke er blevet målt. Fra 3,3V til 5V er der et spring i strømforbruget. Det laveste strømforbrug sker ved brug af den indre oscillator, og ved den laveste clockhastighed.



Figur 17: ATmega328P-PU's operationsområde, det ses at den maksimale frekvens hvorved mikrocontrolleren kan opererer har en stærk sammenhæng med forsyningsspændingen. Figuren er en gengivelse af figur 29-1, s. 312. fra ATmega328P's datablad [9].

Minimering af strømforbrug

I databladet for ATmega328P er en række anbefalede metoder til minimering af mikrocontrollerens strømforbrug nævnt.⁴ De vil kort blive gengivet her.

• ADC'en vil være aktiveret under en hvilken som helst sovetilstand. ADC'en bør

 $^{^4 \}rm Datablad$ i afleveringsmappen i filen 'Datablade/ATmega328P.pdf, afsnit 10.10, s. 51-52.

deaktiveres før mikrocontrolleren sættes til at sove.

- Såfremt den analoge komparator er sat op til at bruge Internal Voltage Reference som input, skal den deaktiveres inden microcontrolleren sættes til at sove.
- Brown Out Detector (BOD) monitorerer mikrocontrollerens forsyningsspænding, når BOD fuses er aktiveret. Monitoreringen sker også imens mikrocontrolleren sover, hvilket ifølge databladet bidrager meget til strømforbruget. Den kan derfor med fordel deaktivere, enten altid eller inden søvn, for at spare energi. BOD bør ikke slås fra, hvis der er tidsafhængige funktioner, som er stærkt afhængigt af frekvensstabilitet hos clock-kilden.
- Internal Voltage Reference bliver aktiveret, når BOD, den analoge komparator eller ADC'en har brug for det. Men er de deaktiveret, vil Internal Voltage Reference også være det, hvilket sparer energi.
- En aktiveret watchdog timer benytter energi uanset mikrocontrollerens tilstand. I de dybere sovetilstande bidrager den, ifølge databladet, i høj grad til strømforbruget. Timeren bør derfor deaktiveres, hvis den ikke bruges.
- Alle port pins skal konfigureres mest optimalt. Hvis der benyttes input logik til at detektere et wake-up kald, vil input buffers blive aktiveret. Hvis en input buffer er aktiveret på en pin, mens den er floating eller tæt på VCC/2, vil det resultere i at bufferen trækker effekt.
- Når On-chip debug systemet er aktiveret, vil mikrocontrollerens clock, indre eller ekstern, altid være aktiveret, hvilket ifølge databladet i høj grad bidrager til strømforbruget.

Ved at sætte fuses i mikrocontrolleren er BOD og watchdog timeren deaktiveret. Resten implementeres i mikrocontrollerens program.

Low power-bibliotek

Et low power-bibliotek [43] til Arduino af GitHub brugeren Rocketscream, som også står bag det tidligere nævnte board Mini Ultra LoRaWAN, er blevet testet. Bibliotek indeholder funktioner til strømbesparende tilstande i form af en idle og en power-down mode for en række AVR mikrocontrollere, herunder ATmega328P og ATmega1284P. Idle sætter processoren i en strømbesparende tilstand hvor timere, ADC og andre perifere enheder slås fra for at spare strøm. Power-down sætter processoren i dvale, alle perifere enheder slås fra, ADC slukkes og BOD deaktiveres, hvis det er en pico-enhed, såsom ATmega328P eller ATmega1284P.

Test med brug af low power-bibliotek

Power-down og idle tilstandene kan indstilles til at vække mikrocontrolleren efter 8 sekunder ved 16MHz eller 16 sekunder ved 8 MHz, da biblioteket er tiltænkt at blive benyttet ved 16MHz og timing er lavet herefter. Alternativt kan tilstandene stoppes med et eksternt interrupt. De to tilstande er testet ved forskellige forsyningsspændinger, hvorfra resultaterne kan ses i tabel 11. Koden brugt i disse forsøg kan ses i filen "powerDownWake-Periodic.ino" der findes i mappen "Test af ATmega328p strømforbrug" i afleveringsmappen.

ATmega328P i power-down tilstand						
Forsynings-spænding		1,8V	$2,\!8V$	3,3V	5V	5,5V
	Idle	-	-	-	-	-
Strømforbrug ved ekstern 8MHz	Power		$0.2 \mu \Lambda$	$0.2 \mu \Lambda$	$0.2 \mu \Lambda$	0.24 1
	down	-	$0,2\mu$ A	$0,2\mu$ A	$0,2\mu$ A	$0,2\mu$ A
	Idle	-	1mA	1,4mA	8,2mA	12mA
Strømforbrug ved ekstern 16MH	Power	_	0 2μ Δ	1 /m 4	$0.4 \mu \Delta$	$0.4 \mu \Delta$
	down	-	$0,2\mu$ 11	1,41171	0,4µ А	$0, \pm \mu$ II
	Idle	-	-	-	-	-
Strømforbrug ved indre oscillate	Power	0 1 <i>µ</i> A	0.1 <i>4</i> , A	$0.1 \mu \Lambda$	$0.2 \mu \Lambda$	0.24 1
	down	0,1µ A	0,1µ A	$0,1\mu$ A	$0,2\mu$ A	$0,2\mu$ A
	Idle	-	0,5mA	0,8mA	7,7mA	10,8mA
Strømforbrug ved oscillator kry	Power		$0.2 \mu \Lambda$	$0.2 \mu \Lambda$	$0.2 \mu \Lambda$	0.24 1
	down	-	$0,2\mu$ A	$0,2\mu$ A	$0,2\mu$ A	$0,2\mu$ A

Tabel 11: Strømforbruget af ATmega328P-PU i to forskellige low power tilstande.

Både idle og power-down tilstande sænker strømforbruget sammenlignet med den aktive tilstand. Især power-down tilstanden betyder et markant sænket strømforbrug, og det skal derfor tilstræbes at holde mikrocontrolleren i power-down tilstand i så stor en andel af tiden som muligt. Strømforbruget er uafhængigt af valg af krystal, da processoren er slukket, mens der er en marginal øgning i forbruget ved højere forsyningsspændinger.

I figur 18 ses en graf af det forventede strømforbrug i power-down tilstand ifølge databladet.

Resultaterne fra tabel 11 passer godt overens med figuren. Det ses også at strømforbruget er afhængigt af temperaturen. Et strømforbrug på under 1µA i power-down tilstand er tilfredsstillende og optimeres derfor ikke yderligere.



Power-down Supply Current Figure 34-11. ATmega328P: Power-Down Supply Current vs. V_{CC} (Watchdog Timer Disabled)

Figur 18: Forsyningsspænding og strømforbruget af ATmega328P i power-down tilstand. Det ses at temperaturen kan have stor indvirkning på strømforbruget i ekstreme situationer, ved højere temberature betyder en stigning i forsyningspænding også en højere stigning i strømforbrug. Figuren 31-342, s. 507 fra ATmega328P's datablad[9].

Test af Arduino Nano V3.0 ved 5V

En Arduino Nano er testet i power-down tilstand, for at se om det er muligt at få et lavt strømforbrug hos en traditionel Arduino. Ifølge databladet har den nyeste Arduino Nano et strømforbrug på 19mA.[7] Til dette forsøg blev en Arduino Nano V3.0 testet med en 5V forsyningsspænding. Testens resultat kan ses i tabel 12. Nano har et højt strømforbrug,

Tilstand	Strømforbrug
Aktiv	46,4mA
Idle	41,4mA
Power-down tilstand	40,2mA

Tabel 12: Arduino Nano V3.0's strømforbrug i forskellige tilstande med 5V forsyningsspænding.

selv i power down mode. Det skyldes at mikrocontrollerboardet har LED's, USB interface chip og en spændingsregulator, som altid er aktive. Nano'en er derfor ikke hensigtsmæssig for laveffekts applikationer.

4.2.3 Krystal og clock-hastigheder

Selvom valget af krystal og clock-frekvens ikke har nogen betydning for mikrocontrollerens strømforbrug i power-down tilstand, har det betydning i den aktive tilstand. Mikrocontrolleren vil i faste intervaller blive vækket for at aflæse sensorer, hvilket sker i den aktive tilstand. Strømforbruget i aktiv tilstand ved 3,3V for den indre oscillator er fx 13.000 gange større end i power-down tilstand. Derfor bør det tilstræbes, at mikrocontrolleren i sin aktive tilstand kan løse sine opgaver så hurtigt som muligt. Det kræver en hurtig start-up tid fra mikrocontrolleren vækkes til den er klar til at løse opgaver, samt en hurtig clockfrekvens mens opgaverne løses. En oscillator har brug for at oscillere et antal gange, før at clocken er stabil. Antallet af gange er givet i databladet. Når mikrocontrolleren vågner fra power-down tilstand, antages det at VCC er stabil, såfremt BOD er slået fra, og der skal derfor kun ventes på at clocken er stabil.

Test af startup-tid

Start-up tiden, før den indre oscillator er stabil, er 6 clock cycles efter at mikrocontrolleren har været i power-down tilstand.⁵ Ved 8MHz er det 0.00075ms. Ved forsøg, som kan ses i bilag G, er opstartstiden målt til 0,878ms med indre 8MHz krystal. Ifølge databladet har den indre oscillator en usikkerhed på 10% fra fabrikskalibreringen. Krystallen er også temperatur- og spændingsafhængig. Krystallen kan gennem en ny kalibrering opnå en frekvens på mellem 7,3MHz og 8,1MHz med 1% nøjagtighed, hvilket kan ses i tabel 13. Det giver en fejl i tid på op til 14,4 minutter per dag.⁶

Kalibrering	Frebyens	VCC	Temperatur	Kalibrations-
Ranbreinig	TTERVEIIS	VOO	remperatur	nøjagtighed
Fabrikskalibrering	8,00MHz	3,0V	$25^{\circ}\mathrm{C}$	± 10
Ny kalibrering	7,3MHz - 8,1MHz	1,8V - 5,5V	-40°C til +85°C	± 1

Tabel 13: Kalibrationsnøjagtigheden af den indre oscillator i en ATmega328P-PU. Tabellen eren gengivelse af table 29-9 s. 313 i ATmega328P's datablad[9].

ATmega328P med ekstern krystal

En ekstern krystal har brug for 16.000 cycles før den kan antages som stabil.⁷ Hvis mikro-

 $^{^5 \}mathrm{Datablad}$ i afleveringsmappen i filen 'Datablade/ATmega328P.pdf, table 9-12 på s. 43.

 $^{^{6}1\%}$ af 86400 sekunder på én dag = 864 sekunder = 14.4 minuter.

⁷Datablad i afleveringsmappen i filen 'Datablade/ATmega328P.pdf, table 9-6, s. 41.

controlleren skal vågne tit, går der derved ofte 16.000 cycles tabt ved brug af en ekstern krystal. Ved henholdsvis 8MHz og 16MHz er det 2ms og 1ms. Opstartstiden er ved forsøget der ses i bilag G målt til 2,323ms for en mikrocontroller med ekstern 16MHz krystal. Som tidligere vist i tabel 10, er strømforbruget også højere end ved brug af den indre oscillator. Fejl og temperaturafhængighed afhænger af valget af krystal. En almindeligt tilgængeligt ekstern krystal kan fx have en typisk fejl på 20ppm, hvilket svarer til 1,73 sekunders afvigelse per dag.⁸ [60]

Valg af krystal

Valget af indre eller ekstern oscillator afhænger af hvor lang tid det tager at aflæse de pågældende sensorer, samt hvor meget strøm en aflæsning kræver. Koster det meget strøm, relativt til ATmega328P's strømforbrug, at aflæse sensorerne, og kan opgaven løses hurtigere ved 16MHz, kan en 16MHz ekstern krystal med fordel vælges. Høje strømforbrug ønskes minimeret i tid. I dette projekt aflæses ATmega1284P's ADC, som har en conversion time på mellem 13 og 260µs.⁹ Wake-up tiden for en ekstern krystal overgår langt tiden det tager at aflæse ADC'en. Derfor vælges den indre oscillator på 8MHz.

4.2.4 Sammenligning mellem ATmega1284P og ATmega328P

Både ATmega328P og ATmega1284P hører til Atmel megaAVR-serien, som har samme grundlæggende arkitektur. Alle tiltag for minimering af strømforbruget af ATmega328P fra afsnit 4.2.2 kan videreføres til ATmega1284P.¹⁰

Strømforbruget i aktiv og power-down tilstand kan ses på figur 19 og 20. Sammenholdt med værdierne i tabel 10 og 11 for ATmega328P, er det aktive strømforbrug cirka 0,5mA højere og power-down strømforbrug cirka 0,1µA højere ved 3,3V. Databladets angivne værdier testes ikke af hensyn til projektets tidsramme og antages korrekte.

 $^{^886.400}$ sekunder på én dag * 20 ppm / 1.000.000 = 1,728

⁹ATmega1284P datablad, s. 243. Det tager den samme tid for ATmega328P: ATmega328P datablad s. 246. Begge kan findes i afleveringsmappen under Datablade.

 $^{^{10}\}mbox{Datablad}$ i afleveringsmappen i filen 'Datablade/ATmega1284P.pdf, s. 53-54



Figure 30-347. ATmega1284P: Active supply current vs. V_{CC} (internal RC oscillator, 8MHz)

Figur 19: Forsyningsspændingen og strømforbruget af ATmega1284P ved brug af indre krystal. Ved aflæsning findes strømmen til ca. 4,5mA ved 3,3V. Figur 30-348, s. 528 i ATmega1284P's datablad [8].





1.5 20 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5
 V_{cc} M
 Figur 20: Forsyningsspændingen og strømforbruget af ATmega1284P i power-down tilstand.

Ved aflæsning findes strømmen til ca. 0,2µA ved 3,3V.Figur 30-355, s. 533 i ATmega1284P's datablad [8].

Ved brug af ekstern krystal, er start-up tiden fra power-down tilstand 16.000 cycles.¹¹ Ved brug af den indre RC oscillator, er start-up tiden 6 cycles.¹² Start-up tiderne er de samme, som for ATmega328P.

 $^{^{11}\}mbox{Datablad}$ i afleveringsmappen i filen 'Datablade/ATmega1284 P.pdf, tabel 9-6, s. 42.

¹²Datablad i afleveringsmappen i filen 'Datablade/ATmega1284P.pdf, tabel 9-6, s. 45.

4.3 Non-volatil hukommelse

Da IoT enheder i mange tilfælde ikke har en stabil strømforsyning og derfor risikere at dræne deres batteri eller anden energilagring, er det vigtigt at enheden har en form for non-volatil hukommelse. Det giver enheden evnen til at gemme vigtig information og data, som eventuelt benyttes under drift, i en hukommelse der bibeholder informationen ved tab af forsyningsspænding. I dette afsnit begrundes valget af en non-volatil hukommelsestype.

4.3.1 Valg af non-volatil hukommelse

Når der skal vælges hvilken type non-volatil hukommelse der skal benytte er det vigtigt at overveje hvad formålet med denne er. Hvor ofte der skal skrives data til hukommelsen og hvor meget data der skal opbevares er begge vigtige overvejelser. Forskellige typer hukommelse har også forskel i hastighed hvormed det er muligt at skrive og læse fra dem. En af de mest væsentlige informationer der skal opbevares i en non-volatile hukommelse for denne enhed er information omkring netværket, dette kunne være et eller flere routing tables, der bestemmer hvilken rute gennem netværket enheden benytter til at sende data til dets destination. Denne type data består af en række poster i en tabel, der hver består af en række integer værdier der repræsenterer enhedsadresser og status for posten, se afsnit 3.4. I vores tilfælde består hver post i tabellen af to otte bit adresser og en otte bit integer der beskriver status. Det vil sige at for hver post eller rute der skal gemmes i tabellen benyttes tre bytes. Mængden af poster der gemmes i tabellen bestemmer størrelsen, således at hvis der gemmes ti poster vil hele tabellen fylde 30 bytes. Dette er ikke en stor mængde data at gemme, og der er derfor ikke behov for store mængder hukommelse. Denne data er skal tilgås hver gang en enhed har været løbet tør for strøm og hver gang en opdatering til netværket sker. Det kan estimere at der ti gange om dagen skal opdateres, det vil sige tilføjes eller slettes en post i tabellen, dette er sat relativt højt da routing tabellen forventes at være stabil når først den er oprettet, et højt estimat er dog valgt da det er bedre at overdimensionere systemer og parametre. Med de ti skrivninger om dagen kan det beregnes hvor mange skrivninger der vil forekomme på et år og derefter i enhedens levetid. Hvis det estimeres at enheden skal kunne holde i ti år vil det sige at der vil blive skrevet til hukommelsen et maximalt antal af 36.500 gange i hele enhedens levetid. Grunden til at det er vigtigt at tage stilling til hvor ofte man skriver til hukommelsen er at alle typer af non-volatile hukommelse har en grænse for hvor mange gange data kan tilskrives og slettes fra enheden inden den går i stykker, dette kaldes skrive/slette cyklusser. Forskellige typer

af hukommelse har forskelligt antal skrive/slette cyklusser.

Mikrocontrolleren ATmega1284P har indbygget tre typer hukommelse hvoraf to er nonvolatile nemlig flash og EEPROM. Den indbyggede flash hukommelse benyttes til program memory men kan samtidig benyttes til data hvis nødvendigt, denne flash hukommelse er angivet til 10.000 skrive/slette cyklusser.[8] Den indbyggede EEPROM benyttes derimod kun data lagring og er angivet til 100.000 skrive/slette cyklusser.[8] Ser vi på disse tal sammenlignet med den tidligere estimering på 36.500 kan kun den indbyggede EEPROM benyttes. Det er også muligt at benytte en ekstern hukommelseschip. Det åbner muligheden for at benytte andre former for hukommelse, og det vil med stor sandsynlighed medføre et højere strømforbrug da flere komponenter bruger mere strøm. Desuden vil det medføre mere kompleksitet og en højere pris pr. enhed hvilket gerne vil undgås.

4.4 Kredsløb og valg af komponenter

Når en low power-enhed skal udvikles er det vigtigt at udvælge de rigtige komponenter således at disse har det laveste energi forbrug muligt. Derfor vælges i dette afsnit de mest optimale komponenter til denne enhed. Samtidig foretages en beregning af enhedens samlede strømforbrug. Denne beregning benyttes til dimensionering af energilagringen.

4.4.1 Real Time Clock (RTC)

ATmega1284P oscillator blivers slukket under power-down tilstand. Den indre oscillator er endvidere er ikke egnet til timing opgaver, da den har en fejl på 1% efter kalibrering. I stedet har hver enhed en Real Time Clock, som er en komponent med sin egen clock source. Komponentens formål er at vække enheden når synkroniseringsvinduet for kommunikation åbner op. RTC'en kan derudover styre perioden for hvor tit en eller flere sensorer skal aflæses.

Der er sat en række af krav til valget af en RTC komponent:

- RTC'en skal have mindst én alarm eller interrupt-udgang til vækning af en enheds mikrocontroller, når der skal ske en daglig synkronisering
- RTC'en skal have en frekvensudgang, som kan styres til periodevis at give et output fra sekunder og op til omkring et minut. Udgangen skal styre den periodevise aflæsning af tilkoblede sensorer.
- RTC'en skal kunne drives fra et spændingsniveau på 3,3V.

Udover kravene er der en række prioriteringer, hvorfra hver RTC vurderes:

- RTC'en skal have så lav en fejl i tid, målt i parts per million (ppm), som muligt.
 Fejlen skal være stabil ved højere temperaturer.
- RTC'en skal vælges ud fra lavt strømforbrug, en lav pris og være tilgængeligt for køb.
- RTC'en skal have mulighed for automatisk at kunne skifte til strømmen fra et eksternt backup-batteri, i tilfælde af at den primære strømforsyning fejler.

En sammenligning af forskellige RTC-moduler kan ses i Bilag A. RV-3028-C7 er valgt, da den opfylder alle krav, har det laveste passive strømforbrug, samt er tilgængelig for køb hos de gængse salgsteder for komponenter. Komponenten er veldokumenteret og har derudover den laveste ppm-tidsfejl på 1 ppm, svarende til $\pm 0,09$ sekunder per døgn ved 25°C. På figur 21 kan fejlen over temperatur ses. Ved højere temperaturer stiger fejlen, og ved fx 40°C, som er en temperatur der ofte forekommer i Sierra Leone, kan en fejl på op til cirka 8,7 ppm forventes, svarende til cirka $\pm 0,75$ sekund.¹³ Fejlen stiger også med tiden, og fejlen kan forventes at være maksimalt 3 ppm ved 25°C efter et år. Med en konservativ antagelse om at fejlen bliver tre gange større efter ét år, vil det derfor ikke være usandsynligt at have en fejl på mindst et par sekunder ved 40°C over en dag, og det efter et enkelt år. Hvis flere enheder er udsat for samme omgivelsestemperatur, kan den samme kurve for fejlen forventes hos hver enkelt enhed, således at fx et synkroniseringsvindue stadig kan forløbe som planlagt.



Figur 21: Karakteristik for fejlen i frekvens over forskellige temperaturer for komponenten RV-3028-C7. Det ses at fejlen ved 40°C ikke er større end -10ppm. Figuren er lånt fra RV-3028-C7's datablad.[65]

Opsætning og funktioner af RV-3028-C7

 13 -0,035*(25°C-40°C)² = -7,7875 ppm -> +10% maksimal usikkerhed -> -8,6625 ppm -> 86400 sekunder på én dag * -8.6625/1000000 = -0.74844 sekunders maksimal fejl på én dag ved konstant 40°C. Opsætningen og funktionerne tager udgangspunkt i et frit tilgængelige Arduino RV-3028-C7 bibliotek.[64] Der er tilføjet funktioner til bibliotekets kode, således at RTC'en kan sende et dagligt interrupt til mikrocontrolleren på et givent tidspunkt, og at den ligeledes kan sende et periodevist interrupt, sidstnævnte er en af de tilføjede funktionaliteter. RTC'en er opsat til at benytte sit backup-batteri i tilfælde af at den primære forsyningskilde fejler. RV-3028-C7 understøtter trickle charging, men funktionaliteten benyttes ikke, da der ikke bruges et genopladeligt batteri. På det print der er produceret og beskrevet i dette projekt kan interrupt funktionen fra RTC'en ikke benyttes uden at have monteret backup-batteriet, da pull-up resistoren til Interrupt pinen er forbundet til batteriet. Dette er valgt da det blev anbefalet i databladet for RTC'en.¹⁴ En anden løsning kunne være at forbinde pull-up resistoren til vcc i stedet for batteriet, dette ville gøre denne funktionalitet brugbar uden montering af batteri, men det betyder samtidig at hvis VCC er lav vil interruptinen også være lav hvilket kan have uhensigtsmæssige følger.



4.4.2 Solpaneler

Figur 22: Her ses et af de små solpaneler. Som det ses er panelerne under 10cm lange.

To små solpaneler af ukendt mærke og ukendt produktion, er blevet udleveret i begyndelsen af projektet. Et af solpanelerne er blevet testet på udvalgte tidspunkter af dagen og under forskellige vejrforhold i september måned. Resultaterne af testen kan ses i tabel 14, det testede panel ses på figur 22. Til sammen er de to solpaneler i stand til at levere strøm nok til én enhed. I afsnit 4.4.9 er det beskrevet, at det tager 265,5s at oplade superkapacitoren ved en konstant tilførsel af 100mA. En kortslutningsstrøm på 100mA antages realistisk at

¹⁴Applikationsmanual i afleveringsmappen i filen 'Datablade/RV-3028-C7_App-Manual.pdf, s. 103.

Kortslutningsstrøm og spænding af solpanel	Kortslutningsstrøm	Open circuit spænding	
Solen skinner. Solpanel vinklet mod solen. Kl. 14:15	140mA	5,92V	
Solen skinner. Solpanel er ikke vinklet. Kl. 14:15	100mA	6,23V	
I fuld skygge. Kl. 14:15.	16,5mA	5,2V	
Meget overskyet. Kl. 8:39	2,19mA	4,62V	
Meget overskyet. Kl. 9:30	5,2mA	4,98V	
Lettere overskyet. Kl. 10:30	23mA	$5,\!6\mathrm{V}$	

Tabel 14: Test af kortslutningsstrøm og open circuit spændinger leveret af et solpanel. Solpane-let leverer mest energi, når det er vinklet mod solen og når der ikke er overskyet.

opnå med en korrekt placering af panelerne i Sierra Leone med et af disse solpaneler. I monsun-perioden, viser tabel 14 at det kan være nødvendigt med flere solpaneler.

4.4.3 Lade- og afladningskredsløb

I det senere afsnit 4.4.9 vælges det, at energi skal lagres i en superkapacitor. Superkapacitorer må ikke oplades over en given spænding. For den valgte superkapacitor er den maksimale opladningsspænding 5,4V. Projektets solcelle leverer dog op mod 6V, og vil derfor ved direkte opladning af superkapacitoren ødelægge den. En beskyttelseskreds kan bruges til at beskytte superkapacitoren mod for høj spænding. Da beskyttelseskredsløbets strømforbrug skal kendes, før en endelig superkapacitor kan vælges, vil beskyttelseskredsløbet blive gennemgået før valget af en superkapacitor.

Beskyttelseskredsløbet, som her kaldes lade- og afladekredsløbet, er blevet designet som en shunt regulator. Et shunt regulator kredsløb med feedback er et spændingsregulatorkredsløb, der ligger parallelt med kapacitoren som skal oplades. Kredsløbet kan regulere spændingen ned til et ønsket niveau, mens overskydende energi afsættes i en effektmodstand. Fordelen ved kredsløbet er at der ikke er en dropout spænding, som går tabt, så hele spændingsvidden fra solcellepanelets udgang og ned til superkapacitorens opladespænding kan udnyttes. En spændingsregulator, der ligger i serie med kapacitoren, er en mulig alternativ løsning. Regulatoren har da et dropout spændingsfald over sig, hvor energien fra dropout spændingsfaldet går tabt. En spændingsregulator har også typisk en begrænset vidde på indgangsspændingen. På figur 23 ses kredsløbet for et shunt regulatorkredsløb i parallel med en kapacitor. En spændingsreference, typisk en zenerdiode eller dedikeret IC, skaber et referencepunkt på 2,5V, mens en spændingsdeler repræsenterer den nuværende



Figur 23: Parallelt shunt regulator kredsløb, som fungerer som en beskyttelse mod for høje spændinger.

indgangsspænding. Ønskes en spænding på 5,3V, skal spændingsdelerens udgang give værdien af referencepunktet ved en indgangsspænding på 5,3V. En operationsforstærker i open loop forstærker forskellen mellem referencen og spændingsdeleren. Er der en positiv forskel fra referencen i forhold til spændingsdeleren, vil en N-kanal MOSFET, som åbnes og lukkes af operationsforstærkerens udgang, begynde at lede, da dens tærskelværdi $V_{gatethreshold}$ er opfyldt. Tærskelværdien vil være opfyldt indtil spændingen igen er på 5,3V eller derunder. Operationsforstærkeren TS27L4 er valgt, da den har et lavt strømforbrug på 10µA per forstærker. Komponenten har fire forstærkere, hvor der kun skal bruges én. Komponenten er valgt, da den er billig, og da det samlede strømforbrug på 40µA er et lavt strømforbrug sammenlignet med andre fundne operationsforstærker.

De ubenyttede operationsforstærkere indgangs- og udgangspins kan ikke efterlades flyvende, da omkringliggende elektrostatiske felter og støj kan skabe et potentiale på flyvende indgangspins. Forstærkerens udgang vil i så fald gå i mætning, hvilket i bedste fald kan forstyrre omkringliggende kanaler på operationsforstærkeren. I værste fald vil der kunne være et potentiale eller en potentialeforskel, som er større end hvad operationsforstærkeren kan håndtere, og chippen vil blive ødelagt. Ubrugte kanaler på operationsforstærkeren kan i stedet opsættes som en spændingsdeler, hvor der er en fast spænding på den positive indgang, som ligger under forsyningsspændingen, mens den negative indgang er koblet direkte til udgangen som negativ feedback. Det sikrer at de ubrugte kanaler agerer lineært og forudsigeligt, samt at de er beskyttet for omkringliggende elektrostatiske felter og støj. For at skabe et referencepunkt benyttes en spændingsreferencen LM385BZ-2.5G, som altid holder et 2,5V spændingsfald over sig. R5 er derfor dimensioneret til at have 2,5V over sig, når den ønskede indgangsspænding er nået. Den ønskede indgangsspænding er valgt til 5,3V, hvilket er 0,1V under den maksimale spænding på 5,4V, som superkapacitoren kan oplades til. Forstærkningen A mellem spændingsreferencen og den ønskede indgangsspænding beregnes i formel (4.1).

$$A = \frac{V_{sp@ndingsreference}}{V_{ønsketindgangssp@nding}} = \frac{2.5}{5.3} = 0.472$$
(4.1)

Ud fra forstærkningen A kan spændingsdeleren dimensioneres. R_2 vælges til 180k Ω . Den høje værdi vælges, så der vil løbe så lille en strøm som muligt gennem spændingsdeleren. Højere modstandsværdier betyder at bl.a. biasstrømme ved forstærkerens indgange får større indflydelse på DC stabiliteten, da indgangssignalet bliver for lille. Signalet bliver også lettere påvirket af støj, når strømmen er for lille. Derfor kan R_2 ikke vælges højere. Der vil dog altid løbe en strøm gennem R_2 og R_5 i kredsløbet, så det er vigtigt at modstandene er store.

$$A = \frac{R_5}{R_2 + R_5} \to R_5 = \frac{-A \cdot R_2}{A - 1} \to R_5 = \frac{-0,472 \cdot 180k\Omega}{(0,472 - 1)} = 160,91k\Omega$$
(4.2)

Den nærmeste standardværdi for R_5 i E24-serien er 160k Ω . Strømmen gennem R_2 og R_5 er givet i beregning (4.3).

$$I_{R_1+R_2} = \frac{V}{R_1+R_2} = \frac{5,3V}{(180k\Omega + 160k\Omega)} = 15,59\mu A$$
(4.3)

Den reelle spænding som kredsløbet vil bevare kan nu beregnes.

$$V_{reel} = V_{reference} \cdot \frac{(R_2 + R_5)}{R_5} \to \frac{2, 5 \cdot (180k\Omega + 160k\Omega)}{160k\Omega} = 5,31V$$
(4.4)

Hvis der benyttes modstande med 1% tolerence, vil V_{reel} altid være mellem 5,26V og 5,37V.

Modstanden R_1 er valgt, så der går så lille en strøm som muligt gennem modstanden selv og spændingsreferencen i serie. Spændingsreferencen LM385BZ-2.5 kan operere ved ned til 13µA, og har en dynamisk ohms modstand på under én ohm, som derfor ikke medregnes. Beskyttelseskredsløbet kan operere ved en indgangsspænding på ned til 3V, da det er den minimale indgangsspænding af kredsløbets operationsforstærker. Modstanden kan nu dimensioneres, således den minimale strøm vil gennemløbe i kredsløbets operationsområde. Operationsforstærkerens negative indgangs input bias strøm medregnes ikke, da den typisk er 1pA.

$$R_{1_{maksimum}} = \frac{3V}{13\mu A} = 230.769\Omega \to R_1 = 220k\Omega \tag{4.5}$$

$$I_{R_1} = \frac{5,31V}{220k\Omega} = 24,14\mu A \tag{4.6}$$

Der vil under normal operation ved 5,31V løbe en strøm på 24,14µA gennem modstanden R1 og spændingsreferencen. Et kort forsøg i laboratoriet viste dog, at spændingsreferencen opererer upræcist ved så lille en strøm. Ved at vælge en modstand på 100k Ω er et acceptabelt resultat opnået. Der går i så fald en strøm på 53,10µA.

Effektmodstanden R_3 skal trække så meget effekt, som muligt ved hensyntagen til MOSFETtransistoren. MOSFET'en har en maksimal kontinuerlig drain strøm på 1,4A ved 100°C.

$$R_{3_{minimum}} = \frac{6V}{1,4A} = 4,3\Omega \tag{4.7}$$

 R_3 vælges til 8,2 Ω , således at der kan bruges en standard 5W effektmodstand, samt for at tage højde for komponent usikkerheder.

$$R_3 = 8, 2\Omega(4, 4W) \tag{4.8}$$

Det ideelt forventede strømforbrug af beskyttelseskredsløbet, når det er i balance ved 5,31V kan beregnes.

$$I_{tot} = I_{R_1 + LM385} + I_{R_2 + R_5} + I_{TS27L4\cdot4} + I_{STT5N2VH5}_{I_{DSS+GSS}}$$
(4.9)

$$I_{tot} = 53,10\mu A + 15,59\mu A + 40\mu A + 1,1\mu A = 109,76\mu A \tag{4.10}$$

Når solpanelet ikke leverer strøm til beskyttelseskredsløbet, vil superkapacitoren i stedet levere strømmen. Når spændingen falder over kapacitoren, vil strømforbruget gennem modstandene R_1 , R_2 og R_5 også falde, hvilket løbende vil mindske strømforbruget.

Måling af strømforbrug af lade- og afladekredsløb

Kredsløbets strømforbrug er blevet målt med et Agilent 34401A 6 1/2 Multimeter, som har været i serie med kredsløbet. En kapacitor har været placeret i kredsløbet. Testes resultater kan ses i tabel 15. Strømforbruget er målt til mindre end 109,76µA, hvilket er et tilfredsstillende resultat.

Indgangsspænding	Målt strøm	Kommentar
1V	8,8µA	
2V	19,6µA	
3V	41µA	
4V	59,7µA	
5V	79,3µA	
5,3V	84,7µA	
5,5V	3,03mA	5,3V over kapacitor
6V	$11,09 \mathrm{mA}$	5,3V over kapacitor

Tabel 15: Lade- og afladningskredsløbets målte strømforbrug. Strømforbruget stiger, når indgangsspændingen kommer over 5,3V. Det skyldes effektmodstanden i kredsløbet begynder at lede.

4.4.4 Spændingsregulator

Indgangsspændingen for flere komponenter skal reguleres. Derfor gennemgås en kort analyse af to regulatortyper, hvorefter en komponent er blevet valgt.

Almindeligvis bruges enten lineære regulatorer eller switchene regulatorer til at regulere spændingen i et system. Lineære spændingsregulatorer benytter en fejlforstærker til at sammenligne outputtet med en fast reference spænding der internt fremskaffes på forskellig vis, forstærkerne styre gate spændingen på en transistor således at den ønskede spænding er at finde på outputtet. En fordel ved denne type regulering er at de er simple at implementere da de kun behøver få eksterne komponenter, oftest højst to til tre resistorer og to kapacitorer. En ulempe er at de ofte kan være ineffektive da der ved store spændingsforskelle mellem indgangen og den regulerede udgang kan gå en del energi tabt, som omdannes til varme i regulatoren.

Switchende regulatorer findes i flere topologier der hver især har forskellige egenskaber, nogle regulere spændingen ned, kaldet step-down, andre kan øge spændingen, step-up. Disse kredsløb er mere kompliceret end de lineære regulatorer, her er mange faktorer der spiller ind i effektiviteten som switchfrekvens, den anvendte spole og den anvendte transistor samt flere. ofte er det muligt at opnå en effektivitet omkring 90%, effektiviteten er dog oftest ikke særlig god ved små strømme. Ved denne type regulator er der også behov for en form for styring, dette kan være en mikrocontroller men er oftest en dedikeret integreret kreds. Ved små strømme er der ofte i de integrerede kredse implementeret en intern transistor som er optimeret til formålet, og der er derfor ikke behov for mange eksterne komponenter som der kan være hvis man ønsker at trække større strømme.

Fælles for begge løsninger er at de har en hvilestrøm, altså en strøm som de trækker selvom der ikke trækkes strøm på deres output, dette er den strøm som systemet benytter på at holde sig selv aktivt, og man ønsker denne lavest i begge tilfælde. Samtidig er der forskellige begrænsninger der gør sig gældende for begge metoder, som for eksempel input spænding og hvor stor en strøm de kan levere. I bilag B ses et overblik over mulige komponenter med en kort beskrivelse, samt pris og tilgængelighed.

Switching regulatoren TPS62740DSST er blevet valgt, da den effektivt kan regulere ved lave strømme og har en hvilestrøm I_Q på 360nA, som er den mindste hvilestrøm af de undersøgte regulatorer. Udgangsspændingen, som kan styres fra en mikrocontroller, kan indstilles fra 1,8V til 3,3V. I figur 24 kan regulatorens effektivitet ses ved en udgangsspænding på 3,3V. Det ses at regulatoren effektivt kan regulere ved strømme over 10µA.



Figur 24: Reguleringseffektiviteten ved forskellige indgangsspændinger når udgangsspændingen er 3,3V. Fra figuren kan det ses at ved indgangsspændinger der ligger langt over udgangsspændingen er effektiviteten dårligere, samtidig er effektiviteten betydeligt dårligere under 0,01mA i output strøm, Figuren er lånt fra TPS62240DSSR's datablad [81]

4.4.5 General purpose sensor interface

For at opfylde ønsket om at gøre disse enheder mest muligt alsidige, er det nødvendigt at lave interfaces mellem mikrocontrolleren og sensorer så generel og alsidig som muligt således at et stor række forskellige sensorer kan tilkobles. Der findes mange forskellige sensortyper der hver har en bestemt måde at give output på. Nogle sensorer generere et analogt signal der skal tilkobles en indgang der har en tilkobling til en Analog to Digital Converter (ADC) således at den analoge værdi kan læses og benyttes af mikrocontrolleren. Andre sensortyper benytter digitale outputs, det vil sige de kan på forskellig vis signalere hvad de måler med en eller flere digitale output pins der enten går høj eller lav. Denne type digitale signaler er simple for en mikrocontroller at læse, og alle input pins på ATMega1284p chippen har mulighed for at læse digitale inputs. Andre sensorer benytter forskellige typer af seriel kommunikation til at kommunikere med mikrocontrolleren. Dette er typisk mere komplicerede sensor enheder der har en form for mikrocontroller indbygget. For at lave en interface der derfor kan benyttes til en stor række forskellige sensorer og potentielt andre moduler, er det optimalt at have en række forskellige forbindelser åbne. De fleste sensorer skal bruge en forsyningsspænding og en Ground reference. Derudover en eller flere forbindelser til pins på mikrocontrolleren med ADC funktion, til at læse analoge værdier, eller blot til at læse digitale værdier. En anden forbindelse der vil være en god ide er en I2C og en SPI bus forbindelse med hver sin forsyningsspænding og Ground. På en I2C bus kand r tilføjes op til flere enheder så længe disse har hver deres enheds ID.

4.4.6 Kontakter til tilkobling af sensorer og moduler

Muligheden for at slukke tilkoblede moduler såsom eksempelvis radio-, satellitmodem eller sensorer ønskes. Det er derfor undersøgt hvilke muligheder der eksisterer indenfor switches. En af de vigtigste egenskaber for switches, i forhold til projektet, er lækstrømmen, da komponenten det meste af tiden være slukket. Den eneste strøm komponenten så vil trække er lækstrømmen. Der findes IC'er udviklet til at have en lav lækstrøm, herunder fx komponenter som bruges til power management af USB porte. Denne type af komponenter har en til flere kanaler som styres af en transistor, og mange af dem har samtidig en strømbegrænser og andre sikkerhedssystemer. Ulempen ved disse sammenlignet med en transistor, er at de bruger lidt mere strøm på de ekstra funktioner, når kontakten er lukket.

I tabel 16 ses en sammenligning af forskellige power switches optimeret til USB porte, MOSFETs og en integreret belastningskontakt. Datablade for hver komponent er tilgængeligt i afleveringsmappen under 'Datablade/Kontakter'. For MOSFETs og integrerede belastningskontakter skal det bemærkes, at R_{DS} stiger markant ved højere temperaturer, hvilket er uundgåeligt under brug. Effekttabet er også afhængigt af belastningen fra den sensor eller enhed som er tilkoblet.

Komponent I	Lækstrøm	I_Q	R_{DS} (ON)	Kont.	Pris	Kommentar
				load		
AP2172AFGEG-7 1μA		A 115 A-180μA for to kanaler		1A	1,7DKK	To-kanals
	1μA				ved køb	USB power
					af 20 stk.	switch
AP2152MPG-13 1μA		100µA-160µA for to kanaler	$0,\!115\Omega$	0,5A	3,602DKK.	To-kanals
	1µA		$(V_{IN}=3,\!3\mathrm{V}$		ved køb	USB power
			$I_{OUT} = 0.5 \mathrm{A})$		af 5 stk.	switc
IRLML2402TRPBF 1µA + 1	1 4 05 4		$0,35\Omega$	1,2A	3,356DKK.	To-kanals MOSFET
	1µА-25µА		$(V_{IN}=2,\!7\mathrm{V}$		ved køb	
	+ 100nA		I_D 0,47A)		af 5 stk.	
SI1050X-T1-GE3 1 ₁	1µА-10µА		$0,093\Omega$	1,3A	2,923DKK	
			$(V_{IN}=2,\!5\mathrm{V}$		ved køb	
			$I_D = 1,29\mathrm{A})$		af 20 stk.	
TPS27081A 0,075		5µА	$44\text{-}77\mathrm{m}\Omega$ $(I_D=2,5\mathrm{A})$	3A	5,985DKK	Integreret
						belastnings-
	0,075µA					kontakt
						med PFET
						og NFET

Effekttabet kan beregnes, når kontakterne er lukkede. Beregningerne tager udgangspunkt

Tabel 16: Sammenligning af power switches til USB porte, MOSFET transistorer og en belast-ningskontakt.

i en aflæsning af en sensor ved 100mA, hvor kontakterne er lukket i så kort tid, at temperaturen ikke medregnes. Læsningerne sker ved 25°C.

For USB power management komponent AP2152MPG-13 er effekttabet følgende.

$$P_D = R_{DS}(ON) \cdot I^2 = 0,115\Omega \cdot 100mA^2 = 1,15mW$$
(4.11)

Effekttabet i MOSFET' en SI1050X-T1-GE3 er følgende.

$$P_D = I_D^2 * R_{DS}(ON) = 100mA^2 * 0,093\Omega = 0,93mW$$
(4.12)

I den integrerede belastningskontakt TPS27081A er der et tab i både en P-kanals FET kaldet Q1 og en N-kanals FET kaldet Q2, samt to modstande. Effekttabet i TPS27081A

ved læsning af en sensor ved 3,3V er følgende.

$$P_D = (I_{D_{Q1}}^2 \cdot R_{Q1(ON)}) + (I_{D_{Q2}}^2 \cdot R_{Q2(ON)}) + (\frac{V_{in}^2}{R_1})$$
(4.13)

$$= (100mA^2 * 44m\Omega) + (10mA^2 \cdot 2, 3\Omega) + (\frac{3, 3V^2}{10k\Omega}) = 0,44mW$$
(4.14)

Lækstrømmene for alle komponenterne har acceptable værdier. TPS27081A har det laveste effekttab når den leder, og vælges derfor. Skal produktets samlede pris ned på et senere tidspunkt, kan én eller flere af TPS27081A på boardet skiftes til en billigere kontakt, hvilket dog vil være på bekostning af en mindre stigning i energiforbruget.

4.4.7 LoRa-modul

I afsnit 3.1 blev LoRa valgt som netværksteknologi. Til projektet er der blevet udleveret fire Adafruit RFM95 LoRa transceiver-moduler. Modulets rækkevidde er angivet til omkring 2km. Det bruger op til 100mA for 20dBm transmission og 30mA ved lytning. Modulet kan slukkes, når det ikke er aktivt, men er målt til fortsat have en hvilestrøm på 17,3µA. Ved implementeringen har modulet ikke fået en belastningskontakt, men det bør prioriteres højt i næste version af det endelige board.

Der er ikke i projektet lavet en analyse af andre LoRa-moduler i forhold til pris, tilgængelighed og specifikationer.

4.4.8 GSM-modul

I løbet af projektet er GSM-modulet SIM800L blevet uddelt. Modulets funktion er at agere gateway, således at beskeder kan sendes ud af det private LoRa-netværk gennem GSM-netværket. Modulets strømforbrug er op mod 2A ved transmittering, så kun udvalgte enheder, placeret i områder med dækning, skal i praksis have GSM-modulet. Enheder med et GSM-modulet bør også have et eksternt batteri eller anden forsyning. Modulet har sin egen belastningskontakt, således at det kun holdes aktivt og tændt når det skal bruges. GSM-modulet og ATmega1284P må ikke placeres direkte op ad hinanden. Når SIM800L transmittere, vil det forstyrre mikrocontrolleren, som stopper med at fungere som forventet. SIM800L skal derfor placeres nogle centimeter fra ATmega1284P.

Der er ikke i projektet lavet en analyse af andre GSM-moduler i forhold til pris, tilgængelighed og specifikationer.

4.4.9 Energilagring

I dette afsnit vurderes kort batterier og superkapacitorer med henblik på at udvælge den ideelle teknologi til at benytte i dette projekt.

Analyse af batterityper[36]

Batterier er en af de mest almindeligt anvendte metoder til at lagre elektrisk energi. Der findes mange forskellige Typer af batterier, overordnet er batterier delt ind i to grupper, primære og sekundære. Primære batterier er batterier der ikke er genopladelige og skal derfor bortskaffes efter brug, hvorimod sekundære kan genoplades og har dermed en længere overordnet levetid, da de kan bruges flere gange. Vi vælger her at lægge fokus på sekundære batterier, da målet med dette projekt er at udvikle en enhed der fungere længst muligt uden behov for vedligeholdelse som for eksempel skift af batteri.

Der findes en en række forskellige batterityper i denne gruppe hvoraf de mest udbredte er: bly-syre, nikkel-cadmium, nikkel-metal-hydrid, alkaliske batterier og lithium-ion. Her følger en kort gennemgang af hver af disse teknologier med fokus på hvorvidt de gør sig egnet til dette projekt.

Bly-syre

Bly-syre eller blot blybatterier består af bly og benytter en vandig syreopløsning som elektrolyt. Syreopløsningen består af svovlsyre fortyndet i vand til en 30-40% koncentration. Bly batterier er sammenlignet med andre batterityper billige at fremstille. Batterier er ofte af denne type. Undersøgelser viser at en indre temperatur i blybatterier på 50 over 50°C kan accelerere korrosion i batteriet og sænker kapaciteten. Batterier af denne type skal holdes mellem -20 og 50 °C under brug.

Nikkel-cadmium (NiCd)

Nikkel- cadmium batterier benytter nikkel hydroksid som katode, cadmium som anode og en alkalisk hydroxid opløsning i form af kaliumhydroxid som elektrolyt. Denne type batteri har næsten den dobbelte energitæthed som et blybatteri, hvilket betyder at de kan laves relativt små og stadig have en god kapacitet. De har samtidig evnen til at lade og aflade hurgtigt, kan benyttes ved højere temperaturer, har et højt antal drifts cyklusser og en lav intern modstand.

Batterierne kan dog komme ud for at lide af hukommelses effekten, hvilket betyder at batteriet kan miste kapacitet hvis det ikke bliver komplet op og afladet i hver cyklus. Dette er oftest et fænomen der opstår hvis et batteri kontinuerligt aflades til det samme niveau, der ikke er fuldt afladet, før det bliver opladet igen. materialerne brugt til konstruktionen er derudover miljøskadelige.

Nikkel-metal-hydrid (NiMH)

En mere miljøvenlig dog dyrere substitut for NiCd batterier der benytter hydrogen i stedet for cadmium som anode. Anoden er fremstillet af et metalhydrid. Elektrolytten består af potassium hydroxid. NiMH batterier har typisk en kapacitet der er noget højere end bly og NiCd batterier. og har endnu bedre op og afladnings hastigheder. NiMH batterier kan også lide af hukommelses effekten hvis udsat for lignende forhold som NiCd batterier, dog i en mindre grad. Batterierne har også vist sig at være funktionsdygtige i et temperaturområde mellem -30 og 65°C. De lider dog af en høj selvafladning og cyklus levetiden kan formindskes over tid.

Alkaliske batterier

oprindeligt fandtes kun primære batterier af denne type, men der er udviklet genopladelige alkalisk mangan batterier (RAM) der virker meget ligesom den primære type men kan oplades.

Disse batterier lider ikke af hukommelses effekten, de tilbyder høj kapacitet, men kan lide af en begrænset livscyklus.

Lithium-ion (Li-ion)

Lithium-ion batterier findes med flere forskellige kemier og forskellige egenskaber. Fælles for dem alle er at de sammenlignet med andre batterityper har en høj energidensitet, høj celle spænding, lav selvafladning og høj livscyklus. Det er dog vigtigt at undgå overopladning, overafladning og at holde celle temperature inden for de specificerede rammer. Hvis ikke dette overholdes kan det føre til en række problemer der vil føre til tab i kapacitet og-eller strømsvind. Li-ion batterier kan tage stor skade hvis celle temperaturen bliver for høj eller for lav.

Deisse krav stiller større krav til opladningskredsen for batteriet samt til hvordan der genneralt skal designes rundt om disse problemer.
Batteri-type	Opladningstemperatur	Afladningstemperatur
Bly-syre	-20°C til 50°C	-20°C til 50°C
NiCd, NiMH	0° C til 45°C	-20° C til 65°C
Li-ion	0° C til 45°C	-20° C til 60°C

 Tabel 17: Overblik over temperaturområder for batterier.

Overblik over batteri-typernes egenskaber

I tabel 17 ses et overblik over hvilke temperaturområder batterier skal holdes indenfor under op og afladning.

Generelt for alle typer af batterier er, at temperaturer der overstiger de givne temperaturområder vil øge mængden af uønskede reaktioner i batterierne der føre til tab af kapacitet og øger selvafladningen samt forkorter cyklus liv. Relationen mellem elektrokemisk reaktion og temperatur er beskrevet af Arrhenius ligning, se ligning (4.15).

$$k = A \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T}} \tag{4.15}$$

Hvor k er raten hvormed reaktionen sker, A er en konstant faktor relateret til frekvensen hvormed molekyler kollidere over et temperaturområde, e er Eulers tal, E eller aktiveringsenergien er en konstant der repræsenterer den minimale energi krævet for at initialisere reaktionen, R er universal gaskonstanten og T er temperaturen i kelvin. Ligningen viser at raten hvormed reaktionen sker med stiger voldsomt ved temperaturstigninger. Generelt set kan det siges at en temperaturstigning på 10°C forøger den kemiske reaktion og formindsker batteriets levetid til næsten det halve. Hvilket betyder at en batterilevitid på en time ved 30 °C svarer til en levetid på to timer ved 20°C.

Analyse af superkapacitorer

Kaldes også electric double-layer capacitors (EDLC), electrochemical capacitors, electrochemical supercapacitors og ultracapacitors[79], og er kapacitorer der har en høj energitæthed sammenlignet med andre kondensator typer og har en større effekt densitet end de fleste batterier.

Superkapacitorer kan derfor betragtes som en form for mellemting mellem traditionelle kapacitorer og batterier, da de kan lagre mere energi end kapacitorer men ikke på niveau med batterier, samtidig kan superkapacitorer afgive og optage energi hurtigere end batterier.[48] Superkapacitorer er en mulig komponent i strømforsyningen til enheden, mere specifikt skulle de lagre energi til fortsat drift i perioder hvor der er lidt til ingen sol, såsom nætter og overskyede dage. Dette er en opgave som også kunne udføres af et batteri, det er dog interessant at undersøge muligheden for benyttelse af superkapacitorer som erstatning af flere grunde.

Superkapacitorer sammenlignet med batterier har en hurtigere op og aflade cyklus, kan håndtere langt flere op og aflade cyklusser samtidig er de mere miljøvenlige og mere sikre at at benytte da de er konstrueret af ikke skadelige materialer.[45] Superkapacitorer er også funktionsdygtige i et stort temperaturområde, oftest -25 til 70 °C.

Superkapacitorer er på nogle måder mere simple at implementere, da de som udgangspunkt er mere simple at lade og aflade end batterier, der stiller forskellige krav og kan have behov for et kompliceret opladnings kredsløb. Så længe spændingen holdes under had producenten specificere er der som regel ikke mange flere overvejelser der skal foretages. Superkapacitorer kan ikke over op- eller aflades som nogle batterier, og der skal derfor ikke implementeres sikkerhedsforanstaltninger for at undgå dette.

Der er dog også ulemper ved at benytte superkapacitorer i modsætning til batterier, navnlig kan superkapacitorer som tidliger nævnt ikke lagre den samme mængde energi som et batteri af samme fysiske størrelse ville kunne. Kapacitorer som strømkilde kræver også en lidt mere arbejde ved afladning og forsyning til enheden, da spændingen ved afladning falder ved brug og derfor skal reguleres for at forholde sig jævn under brug, dette faktum stiller også krav til kapacitorens maks spænding og hvor langt ned den kan aflades før spændingen når under noget brugbart, jo lavere spændingsforskel mellem fuldt opladet og afladet der kan laves jo større kapacitet er der behov for. Dette er et mindre problem ved brug af batteri da batterier holder en nominal spænding under hele afladnings forløbet. En anden ulempe ved Superkapacitorer er at de som oftest er dyrerer end batterier med tilsvarende kapacitet. En sammenligning af udvalgte parametre for de forskellige teknologier kan ses i tabel 18.

Valg af energilagring

Superkapacitorer vælges som teknologi, da de har mange lade- og afladecyklusser. Der forventes at ville forekomme hyppige op- og afladninger i samspillet mellem superkapacitoren og solpanelerne. Det vurderes desuden muligt at have nok energikapacitet til at bruge en

	Superkapacitorer	Li-Ion	NiCd	NiMH	Bly-syre
Typisk energi-	1 10	100.265	40.60	60 190	25 40
tæthed $[Wh/kg]$	1-10	100-205	40-00	00-120	55-40
Typisk effekt-	O_{m} til 10 000	250 250	150	250 1000	190
densitet $[W/kg]$	Op til 10.000	200-000	150	250-1000	160
Typisk operations-	40°C 65°C	$0^{\circ}\text{C-45}^{\circ}\text{C}/$	$0^{\circ}\text{C-45}^{\circ}\text{C}/$	$0^{\circ}\text{C-}45^{\circ}\text{C}$	2000 5000
temperatur	-40 C-05 C	-20°C-60°C	-20°C-65°C	$/-20^{\circ}\text{C}-65^{\circ}\text{C}$	-20 C-50 C
Typisk antal	Orton 500 000	400 1900	2000	190 2000	On til 250
cyklusser	Over 500.000	400-1200	2000	160-2000	Op til 550

Tabel 18: En sammenligning af energitæthed, effektdensitet, operationstemperatur og antal ladecyklusser for superkapacitorer og de gængse batterityper. Superkapacitorer har den højeste effektdensitet, breddeste operationstemperatur-område og flest ladecyklusser. Til gengæld er energitætheden den laveste.

superkapacitor ved en laveffekts enhed. Herudover har superkapacitoren et operationsområde ved høje temperaturer, og superkapacitoren er det mest miljørigtige valg i forhold til produktionen af komponenten selv.

Beregning af minimumskapacitet af superkapacitor

Et energibudget er udregnet for at dimensionere kapaciteten af en superkapacitorbank bestående af én eller flere superkapacitorer. Det antages at kapaciteten kun er relevant om natten, hvor et solpanel ikke kan tilføre systemet energi. De fire parametre for at udregne den nødvendige kapacitet gennemgås herunder.

Minimal spænding: 2,2V

Den minimale spænding er spændingen før at spændingsregulatoren stopper og mikrocontrolleren herved slukker. Det sker ved 2,2V.

Maksimale opladespænding: 5,31V

Superkapacitorer har typisk 2,7V som maksimal opladespænding. Kapacitorens energi kan bruges fra 2,7V til 2,2V, hvilket vil kræve en stor kapacitet. I stedet kan to superkapacitorer sættes i serie, hvilket øger den maksimale opladespænding til det dobbelte, altså 5,4V. Kapaciteten sænkes dog.

Mange superkapacitorer der kan købes består af flere celler i serie. På den måde opnås

en højere spænding. Lade- og afladekredsløbet sikrer, at den maksimale opladet spænding altid vil være 5,31V.

Ønsket operationel tid: 780 minutter

Den operationelle tid, er tiden hvor superkapacitoren har en spænding over den minimalt ønskede spænding. I kravspecifikationen i afsnit 1.9 er det fundet, at der er 12 timer og 22 minutter mellem solnedgang og solopgang i Freetown på årets korteste dag. 13 timer vælges, svarende til 780 minutter.

Overslag af gennemsnitligt strømforbrug: 156,36µA

Der tages udgangspunkt i det samlede gennemsnitlige strømforbrug af udvalgte komponenter ved 1% aktivt brug. Strømforbruget af aktive ATmega I/O pins, samt måling af superkapacitorens egen spænding medregnes ikke. Der medregnes ikke aflæsning af en sensor. RFM95 LoRa-modulet er medregnet, som var modulet tilkoblet en belastningskontakt, hvilket ved en fejl ikke er tilfældet på det producerede board. Det reelle gennemsnitlige strømforbrug må forventes at være større.

$$I_{ladekredsløb} = 109,76\mu A \tag{4.16}$$

$$I_{konstant} = I_{regulator\ hvilestrøm} + I_{RTC\ hvilestrøm} + (5 \cdot I_{belastningskontakt\ hvilestrøm}) \quad (4.17)$$

 $= 360nA + 45nA + (5 \cdot 75nA) = 0,78\mu A$

$$I_{passiv} = I_{ATmega1284P_{power-down}} + I_{konstant} = 0, 3\mu A + 0, 78\mu A = 1,08\mu A$$
(4.18)

$$I_{gns\ passiv} = \frac{I_{passiv}}{100} \cdot (100 - 1) = \frac{1,08\mu A}{100} \cdot (100 - 1) = 1,07\mu A \tag{4.19}$$

$$I_{aktiv} = I_{ATmega1284P_{aktiv, indre \ 8MHz}} + I_{konstant} = 4mA + 0,78\mu A = 4,78mA$$
(4.20)

$$I_{gns\ aktiv} = \frac{I_{aktiv}}{100} \cdot 1 = \frac{4,78mA}{100} \cdot 1 = 40,01\mu A \tag{4.21}$$

Regulatoreffektiviteten er afhængig af hvor meget strøm enheden trækker. Effektiviteten er aflæst fra figur 24 på side 62.

$$I_{gns} = \frac{I_{gns \ aktiv}}{reg_{\%eff \ aktiv}} \cdot 100 + \frac{I_{gns \ passiv}}{reg_{\%eff \ passiv}} \cdot 100 + I_{ladekredsl\phi b}$$
(4.22)
$$= \frac{40,01\mu A}{90} \cdot 100 + \frac{1,07\mu A}{50} \cdot 100 + 109,76\mu A = 156,36\mu A$$

Minimumskapaciteten kan nu beregnes.

$$C = \frac{t \cdot I_{gns}}{(V_{maks} - V_{min})} = \frac{46.800s \cdot 156, 36\mu A}{(5,31V - 2,2V)} = 2,35F$$
(4.23)

Beregningen tager ikke højde for selvafladningen af den valgte superkapacitor.

Selvafladning af Eaton superkapacitor

Eaton PHV-5R4V505-R¹⁵ er valgt. Det er en 5V 5,4F superkapacitor, som opererer fra -40°C til +65°C. Kapacitoren har en nominel lækstrøm på 28µA efter 100 timer ved 25°C, og dens maksimale ESR er 0,065 Ω ved 1kHz.



Figur 25: Her ses den valgte superkapacitor PHV-5R4V505-R længst til venstre. De to andre er andre kapacitorer der ses på billedet har en lavere kapacitet og en den ene også en lavere maks spænding. Det kan ses at alle kapacitorne er under fire cm lange.

Forventet levetid

Når superkapacitoren udsættes for høje temperature og store strømme, vil det resultere i en øget ESR og en formindsket kapacitans. Kun temperaturen er dog kritisk i dette projekt. På figur 26 ses det hvor lang tid det tager for en superkapacitor at falde enten 30% eller 50% i kapacitet over en given temperatur. Et fald i kapacitans på 30% er kritisk, hvis en enhed skal bevare energi til en hel nat. Kapacitorens levetid kan derfor godt defineres, som at den ikke længere er brugbar ved et fald på 30% i kapacitans. I grafen kan det aflæses, at en kapacitor ved 40°C omgivelsestemperatur, som opereres konstant ved 2,5V, dog kan holde i cirka 8-9 år.

Oplade- og afladecyklusser

Ukendt antal for komponenten. Men som beskrevet i tabel 18 kan superkapacitorer typisk håndtere omkring 500.000 opladnings cyklusser. Det forventes, at komponenten kan gen-

¹⁵Datablad i afleveringsmappen i filen 'Datablade/Eaton PHV (supercap) datablad.pdf



Figur 26: Eaton superkapacitors levetid over temperatur og operative spænding, som viser at dens levetid har et logaritmisk fald over temperaturskalaen. Superkapacitoren antages i grafen som død, når kapacitansen er faldet enten 30% eller 50%. Figuren er lånt fra PHV-5R4V505-R's datablad [5].

nemgå et antal cyklusser, således at antal mulige cyklusser er uvæsentligt.

Hurtig opladningstid relativt til gængse batterityper

Ved en konstant strøm på 100m A tager det 265,5
s at lade superkapacitoren til et potentiale på $5,31\mathrm{V}.^{16}$

Selvafladning

Kapacitorens selvafladning er blevet undersøgt ved over 13 timer at måle regelmæssigt med et håndholdt multimeter. De 13 timer simulerer én nat, hvor der ikke tilføres energi til superkapacitoren. Selvafladningen kan ses i figur 27. Selvafladningen efter 13 timer er 0,54V. Selvafladningen er størst, når kapacitoren er tættest på fuld opladning. Når der løbende trækkes strøm fra en kapacitor som ikke tilføres energi, vil størrelsen af den løbende selvafladning formindskes. Selvafladningen vælges til 0,54V efter 13 timer som en tilnærmelse, og fordi det er det værst mulige tilfælde. Den nødvendige kapacitet kan nu regnes.

$$C = \frac{I_{gns} \cdot t}{(V_{maks} - V_{min} - V_{tab \ efter \ 13 \ timer})}$$
(4.24)
$$C = \frac{46.800s \cdot 156, 36\mu A}{(5,31V - 2, 2V - 0, 54V)} = 2,85F$$

 $^{16}t = C*V/I => 5F*5,31V/0,1A = 265,5s$



Figur 27: Graf af selvafladningen af en Eaton superkapacitor over tid. Dens spændingstab flader ud over tid. Ved den sidste måling var det samlede spændingsfald 0,54V.

Den minimale nødvendige kapacitet er derved 2,85F.

4.4.10 Kredsløb til måling af superkapacitorens spænding

For at gøre det muligt for mikrocontrolleren at måle spændingen over superkapacitoren er en spændingsdeler tilføjet således at de maksimalt 5,31V over superkapacitoren kan måles ved hjælp af ADC'en med den interne reference spænding på 1,1V. Denne spændingsdeler består af de to modstande R_8 og R_{10} med en størrelse på henholdsvis 9.800 Ω og 2.390 Ω og en samlet elektrisk modstand på 12.190 Ω . Den strøm der gå igennem resistorerne vil afhænge af spændingen over superkapacitoren. Ved 5,31V vil der igennem disse to modstande løbe en strøm på 435µA, hvilket er flere hundrede gange større end den beregnede strøm på 1,08µA systemet bruger i sleep mode fra ligning (4.18). En belastningskontakt benyttes derfor til at afbryde forbindelsen mellem spændingsdeleren og superkapacitoren. Dette gør det muligt at minimere strømforbruget af spændingsdeleren og kun aktivere den når der skal foretages en måling. En ADC måling tager mellem 13 og 260µs og tiden hvor belastningskontakten skal være åben kan derfor minimeres til en værdi lige over dette.

4.5 **Proof of concept-test af system**

En test af lade- og afladekredsløbet, superkapacitoren, solpaneler og mikrocontrolleren er blevet gennemført undervejs i projektet. Formålet har været at undersøge hvorvidt superkapacitoren egner sig til at opbevare og afgive energi over længere tid, eller om den skal kombineres med et batteri, teste om lade- og afladekredsløbet fungerer efter hensigten, samt om solpanelerne i praksis kan levere energi nok til at drive en mikrocontroller. I forsøget måler en ATmega328P spændingen over superkapacitoren cirka hvert ottende sekund. Resultatet blev sendt til en uafhængig slaveenhed med sin egen forsyning, som gemte målingerne på et SD kort. I den resterende tid var ATmega328P i power-down tilstand. En detaljeret gennemgang af forsøget kan ses i bilag E. Uden tilførsel af energi fra solpanelerne, var det forventet at systemet kunne holde en spænding på mellem 5,3V og 2,9V i omkring 23 minutter. Det var ikke forventet at mikrocontrolleren ville køre, når indgangsspændingen kom under 2,9V. I figur 28 ses resultatet af testen. Mikrocontrolleren kørte i mere end 2,5 timer. Dog stoppede datalogning tidligere end forventet, hvilket kan skyldes at selve slaveenhedens eksterne batteriforsyning døde. Systemet kom ikke i live igen.



Målt spænding over superkapacitor over tid (d. 11/10 2019)

Figur 28: Målinger af spændingen over superkapacitoren over tid foretaget under et proof of concept forsøg. Dataen er blevet logget af en slave-enhed med egen forsyning. Superkapacitorens spænding er blevet målt af en ATmega328P drevet fra to solpaneler. Superkapacitorens spænding blev logget i mere end tre timer.

Det blev konkluderet, at solpanelerne godt kan levere energi nok til at drive en enhed. Superkapacitoren kan desuden bruges som forsyningskilde, og lade- og afladekredsløbet fungerer efter hensigten. For at systemet kan holdes kørende over en hel nat, er det som minimum nødvendigt at skifte spændingsregulatoren med en der er effektiv ved lave strømme. Et dedikeret mikrocontrollerboard er derfor blevet produceret.

4.6 Produceret mikrocontroller-board

Det producerede mikrocontroller-board kan ses på figur 29. Kredsløbsdiagram og printudlægsfiler er tilgængeligt i afleveringsmappen i mappen 'Kredsløbsdiagram og printudlæg'. I afsnit 5 er boardet blevet testet og karakteriseret. Den endelige pris for en enhed kan estimeres til cirka 450 DKK, denne pris er for komponenter ekslusiv moms og printfremstilling. en samlet liste over anvendte komponenter kan ses i filen "BOM."i afleværingsmappen. Dette er 325 DKK under den pris der i afsnit 1.9 blev sat som maksimum for pris.



Figur 29: Èn produceret enhed, hvor både LoRa og GSM-modul er koblet til. Det skal bemærkes at GSM-modulet under operation ikke kan være monteret i denne placering da det forstyrrer mikrocontrolleren.

4.7 Delkonklusion

Formålet med afsnittet er at gennemgå valgene taget i produktionen af en IoT-baseret LPWAN-enhed. Der er gennemført en analyse af eksisterende LPWAN-boards, hvor mikrocontrolleren ATmega328P blandt andet er vidt brugt. Den er blevet sammenlignet med en konkurrerende mikrocontroller, hvor den blev vurderet som den bedste på baggrund af dens tilgængelighed, strømforbrug og Arduino kompatibilitet. Mikrocontrolleren viste sig i løbet af projektet at have for lidt dynamisk hukommelse. I stedet blev den kraftigere ATmega1284P, fra samme serie, valgt. Herefter er de enkelte komponenter blevet udvalgt. Til energilagring er det besluttet at bruge en superkapacitor, da den har mange lade- og afladecyklusser, kan opererer ved op til 65°C og er et miljørigtigt valg sammenlignet med gængse batterityper. På baggrund af det forventede strømforbrug af en enhed, er en kapacitor blevet valgt.

En proof of concept-test med mikrocontrolleren, lade- og afladekredsløbet, solpaneler og superkapacitor er gennemført, hvor systemet kørte i to og en halv time. Testen viste at det er muligt at udvikle en soldrevet laveffekts-enhed med en superkapacitor, men at det var nødvendigt at producere et dedikeret mikrocontroller-board. Et sådant board er derefter blevet produceret.

5 Test og karakterisering af mikrocontroller-board

Der er gennemført to forskellige tests af enhederne for at karakterisere enhedernes strømforbrug og for at teste enhederne i et simuleringsforsøg. Èn af enhederne er blevet testet under virkelige forhold, hvor enheden har været placeret udendørs uden en ekstern strømforsyning.

5.1 Test af enhedens strømforbrug

Enhedens strømforbrug er blevet testet i forskellige stadier: active, LoRa-rx mode, LoRa-tx mode, power-down mode. For henholdsvis 8MHz indre oscillator og 16MHz ekstern krystal. En beskrivelse af udførelsen af forsøget findes i bilag F. Formålet med dette forsøg var at måle den strøm systemet bruger i forskellige stadier. Figur 30 og 31 er den behandlede data fra forsøget og giver et overblik over enhedernes strømforbrug i de forskellige stadier enheden vil finde sig selv i. Det er specielt interessant at se hvor stor forskel der er i strømforbruget når LoRa-modulet sender i forhold til alle andre stadier. Samtidig ses der en tydelig sammenhæng imellem strømforbruget når der sendes ved forskellige styrker.



Figur 30: Her ses den strøm en enhed, der køre ved 8MHz ,trak under testen. Data er blevet behandlet med et moving average filter for at mindske støj på signalet. De forskellige stadier ses tydeligt, først activ, så sleep mode, derefter aktiv i et kort øjeblik hvorefter de fem beskedder sendes ved forskellig styrke.



Figur 31: Data fra testen med en ekstern 16MHz krystal. Denne data er behandlet på lige vis med den forrige. Det kan ses observeres i på denne figur at enheden i de aktiive stadier trækker en højere strøm end ved 8MHz.

	Aktiv	Sleep	Aktiv Lora rx	Tx 20 Db	Tx 15Db	Tx 13Db	Tx 10Db	Tx 5Db
8MHz	$4,1652 \mathrm{mA}$	43µA	$11,\!6476 mA$	$100{,}8474\mathrm{mA}$	$70,8385 \mathrm{mA}$	$61,1981 \mathrm{mA}$	$50,9792 \mathrm{mA}$	$38,4652 \mathrm{mA}$
16MHz	$8,9090 \mathrm{mA}$	-	17,4784mA	$106,6242 \mathrm{mA}$	$79,5027 \mathrm{mA}$	$65,7048 \mathrm{mA}$	$50.4306 \mathrm{mA}$	$36.1834 \mathrm{mA}$
Beregnet	$4,78 \mathrm{mA}$	$1,07\mu A$	-	-	-	-	-	-

Tabel 19: En sammenligning af den gennemsnitlige strøm systemet trækker i de forskellige stadier samt beregnede værdiger for en mikrocontroller ved 8MHz indre krystal. Det skal her bemærkes at de beregnede værdiger fra afsnit4.4.9 tager højde for op og afladekredsløbet også. Dette element var ikke monteret under forsøget. Samtidig skal det noteres at de målte værdiger for enheden i sleep mode er foretaget med et Agilent 34401A multimeter. Dette skyldes at det ikke var muligt at måle strømmen for denne tilstand i det opstillede forsøg. Signalet var simpelthen for lavt sammenlignet med støjen.

Som det kan ses fra tabellen ligger de målte og de beregnede værdiger tæt, og det kan derfor betraktes som brugbare målinger af strømforbruget i de hidtil umålte stadier som ved Lora Tx. Dog med undtagelse af de målte værdiger for enheden i sleep mode. Disse må antages at have været for små til at måle sammenlignet med støjen i systemet.

5.2 Simularingstest under virkelige forhold

For at teste hvorvidt den udviklede hardware og dataudvekslingsvindue koncept virker, er en test opstillet der har til formål at simulere de virkelige forhold som enhederne vil være udsat for når di implementeres. Til testen opsattes fire enheder, der simulerede vandposter, på og omkring SDU TEK, enhedernes placering ses på figur 32b. Tre af enhederne blev placeret indendørs med en stabil spændingskilde. En af disse enheder der var placeret indendørs var udstyret med et GSM modul og skulle være gatewayen i dette system. En enhed blev drevet af solpaneler og superkapacitor og blev placeret udendørs i en vandtæt boks, denne enhed blev placeret således at den ikke havde direkte kontakt til gateway enheden.



(a) Opsætning af Enhederne, de stiplede linjer repræsenterer radio forbindelse. Enhederne er opstillet således at alle noder har forbindelse med udtagelse af node 1 og 4 der inbyrdes ikke har radioforbindelse.



(b) Placering af enhederne på og omkring SDU TEK. Alle indendørs enheder blev placeret på 1. sal. Node 1 er placeret på toppen af en vold der går langs parkeringspladsen.

Med dette forsøg ønskedes det at undersøge om det overordnede virker. Samt hvorledes routing tabellerne ender med at se ud, det vil sige om beskederne finder den korteste vej igennem netværket. Det ønskes også at bekræfte at selvom en af enhederne, enten enhed to eller enhed tre, måtte være slukket kan enhed et stadig sende beskeder til enhed fire.

5.2.1 Kode til forsøg

Til udførsel af denne test er udviklet en første version af kode der forventes at skulle implementeres på de færdige enheder når de tages i brug. Denne kode benytter funktioner fra flere tilgængelige Arduino biblioteker samt nogle få tilføjelser til nogle af dem. De benyttede biblioteker er:

- Low Power af Rocket Scream Electronics.[43]
 - Benyttes til at sætte mikrocontrolleren i low power mode.
- RTC RV-3028-C7 Arduino Library af Constantin Koch.[64]
 - Benyttes til at styrer RTC enheden.
 - Her er tilføjet kode for at understøtte RV-3028-C7 chippens timer funktion.
- RadioHead Packet Radio library for embedded microprocessors.[55]
 - Benyttes til at skabe et mesh netværk af enhederne.
 - Her er tilføjet en funktion til at læse routing tables således at disse kan benyttes udenfor klassen.
- CayenneLPP af Electronic Cats.[39]
 - Datastruktur til radiokommunikationen.

Et Arduino bibliotek der indeholder det meste af funktionaliteten for denne applikation er desuden udviklet og har pt. navnet "General_Purpose_Functions". Denne kode og biblioteker med tilføjelser findes på GitHub.[23] Koden er udviklet til at følge det flow der ses på flowchartet i figur 49 i bilag I, dette flowchart opdelt ses på figurene 33, 34 og 35 i løbet af dette kapitel.



Figur 33: Flowchart der beskriver starten af koden. De farvede bokse indikere funktioner der kan implementeres, men som ingen funktion har for netværksdelen af enheden.

Figur 33 viser hvordan koden ved startup og ved iterrupts forløber.Efter startup af enheden fra slukket tilstand bliver en setup funktion kaldt, denne sørger for at indstille alle I/O-pins samt initialisere de forskellige serielle kommunikationsporte der benyttes som for eksempel UART og I2C, den sørger samtidig for at indstille en række statusflag der indikere om enheden har et GSM modul samt hvilken adresse er enhedens egen og hvilken adresse den skal forsøge at sende data til. Derefter går enheden i low power sleep mode og venter på et interrupt fra RTC'en eller andre eventuelle kilder. Når enheden får et interrupt vågner enheden på og Interrupt-servicerutinen kaldes, denne sætter blot et status flag der indikere at et interrupt er blevet registreret på en bestemt pin. Det undersøges nu hvilket interrupt der har vækket enheden, hvis det er et interrupt fra RTC'en aflæses statusflagene herfra via I2C kommunikation og det undersøges om det er alarmen eller timeren der har genereret interruptet og et status flag bliver sat for at indikere dette.

Ved timer interrupt:



Figur 34: Flowchart der beskriver hvorledes et interrupt genereret af RTC timeren håndteres. her indsamles data og status på spændingsforsyningen tjækkes. Det er også her enheder vil broadcaste tiden hvis de har strøm til det, eller lytte efter sådanne broadcasts hvis enheden ikke havde kontakt i løbet af sidste dataudvækslingsvindue.

Proceduren ses på figur 34. Her kan udføres en funktion der er tids vigtig, det kan for eksempel være aflæsning af en sensor hvor tidsintervallet er vigtigt. Efter dette muligvis er gjort vil enheden tjekke om det er lang tid siden der sidst blev lavet en status opdatering. Er dette tilfældet vil mikrocontrolleren foretage en måling af VCC og spændingen over superkapacitoren og ud fra dette og nogle fast bestemte grænseværdier opdatere status for den lagrede energi til enheden. Uanset om status lige er blevet opdateret, tjekkes det om denne er god eller dårlig. Hvis status er meget dårlig skal den samlede data gemmes i EEPROM for at den ikke går tabt ved tab af strøm, denne funktion er ikke implementeret. Hvis der er rigeligt med strøm tjekkes et statusflag, der indikere om enheden havde forbindelse til andre enheder i sit sidste kommunikations vindue. Hvis enheden havde forbindelse sender den en broadcast af sin nuværende tid ud på netværket og fortsætte. Havde den derimod ingen forbindelse vil den begynde at lytte efter en broadcast af tid på netværket og vil ikke gå videre indtil den har modtaget en. Dette er en del af synkroniseringsprocessen der skal sørge for at enhederne vågner op i det samme kommunikations vindue. Efter dette vil en enhed med et GSM modul se om den har data, der skulle være sendt men som ikke er blevet det. Har den dette vil den se om status er god nok, denne skal være meget god da det kræver meget strøm at sende data med GSM, er den dette sendes dataene. Enheden ligger sig herefter tilbage i sleep mode.

Ved Alarm Interrupt:

Proceduren for alarm interrupts ses på figur 35. Her aktiveres og initialiseres som det første LoRa modulet, og routing tabel bliver aflæst fra EEPROM. Derefter bliver eventuelle data der måtte være gemt i EEPROM kopieret til den buffer der bliver sendt med LoRa. Funktionaliteten der læser data fra EEPROM er ikke implementeret. RadioHead routingfunktionaliteten startes hermed og en timer startes ligeledes. En enhed med GSMmodul lytter den herefter blot efter indkommende beskeder på LoRa netværket, når den modtager en besked, bliver indholdet gemt i en buffer. En Enhed uden GSM-modul vil forsøge at sende den indsamlet data over LoRa netværket, og vil derefter route eventuelle beskeder videre hvor de skal. I begge tilfælde vil enhederne udføre deres handling indtil et timer interrupt sker, dette betyder at kommunikationsvinduet er slut og enhederne vil deaktivere LoRa modulet, og gemme den seneste routing tabel i EEPROM. Enheder uden gsm vil derefter gå til sleep mode igen. Hvorimod enheder med GSM-modul vil tjekke statusflaget der viser hvor høj spænding der er på superkapasitoren, hvis der er høj spænding vil enheden sende den modtagede data med over GSM og gå til sleep mode. Hvis dette ikke er tilfældet vil data blive gemt i EEPROM og et flag sat der indikere at data blev gemt her, hvorefter enheden går til sleep mode. Funktionaliteten der gemmer data i EEPROM



Figur 35: Flowchart der beskriverhvordan hvad der sker ved et RTC alarm interrupt. her sendes indsamled data. Bemærk at flow'et starter øverst til højre.

er ikke implementeret Ved de første korte test lader denne kode til at virke. Der opstår dog en endnu ukendt fejl ved den enhed der har et GSM modul, Fejlen resulterer i at enheden bliver fanget i en ukendt løkke som den aldrig kommer ud af. Den specifikke årsag til fejlen er ikke fundet, men den ligger formentlig i den kode der er specifik for GSM modulerne, da det er her fejlen er observeret, fejlen lader til at opstå efter en SMS er send og før den næste skal sendes. Da denne test blev udført som noget af det sidste i processen har der ikke været meget tid til fejlfinding, hvilket er skyld i at koden ikke fungere optimalt. Dette har derfor også betydet at den samlede test ikke har kunnet udføres korrekt.

Næste skridt for koden

De næste skridt der skulle tages, ville være at undersøge hvornår og hvordan denne fejl opstår, dette kunne gøres ved at lade en pc være tilkoblet enheden således at debugging beskeder kan sendes serielt til denne, dette ville gøre det muligt at se hvad tid fejlen sker, og hvad enheden lavede lige inden fejlen opstod. En anden løsning der kan overvejes er at opbygge hoveddelen af koden forfra. Det må konkluderes at koden som den er nu er en smule ustruktureret, og at det måske med fordel kunne betale sig at begynde forfra med den erfaring det har bragt med sig at udvikle koden til det den er nu.

5.2.2 Samlede observationer om forsøget

Grundet fejl i koden har det ikke været muligt at gennemføre forsøget, og derved har det ikke været muligt at undersøge de ænskede situationer med beskeder der når igennem et netværk med en enhed slukket. Hver gang der derimod er blevet set til enhed et der var opsat udendørs har den haft en lovende spænding over superkapacitoren, dette er et lovende tegn på at enheden vil kunne drives på denne måde med en lille mængde sol eftersom dette forsøg blev udført i Danmark i december måned, hvor solskinds timerne er få. Dette forsøg er et der med sikkerhed skal udføres igen når årsagen til fejlen i koden er fundet.

6 Diskussion

Igennem dette projekt er der blevet brugt meget tid og arbejdskraft på udvikling af hardware. Der er opstået flere problemer her end det var forventet, hvilket betyder at der er blevet brugt mere tid end planlagt. Det er samtidig blevet undervurderet hvor meget arbejde der skulle lægges i software-delen af projektet, hvilket har resulteret i at det ved projektets afslutning ikke er lykkedes at nå i mål med alle opstillede mål. Projektet er i store træk nået i mål med den hardware og elektriske del af projektet. Med dette menes at en enhed der drives af solpaneler og en superkapacitor er udviklet. Tests og beregninger viser at denne enhed overholder de krav der blev opstillet i starten af projektet.

Desværre er det, som nævnt ovenfor, gået ud over arbejdet på software siden af dette projekt. Den udviklede software lever ikke op til de stillede krav på flere punkter, for det første er der ved aflevering af denne rapport en endnu uidentificeret fejl i koden, som forhindre en fuld test af netværket i at blive udført. Der er udviklet software til en del underlæggende funktioner, men det samlede system mangler stadig en del arbejde for at kunne implementeres.

Noget af det arbejder der er krævet her er fejlfinding i koden eller det at starte forfra i hovedopbygningen af koden.

Efter dette, er det muligt at foretage de nødvendige tests, for at bekræfte at den udtænkte løsningsmetode, med dataudvekslingsvinduerne, er holdbar og lever op til de stillede krav. Derefter er der stadig nogle krav der blev stillet i kravsanalysen og kravsspecifikationen, som der ikke er brugt tid på i løbet af projektperioden. Et af disse er det krav, der beskriver hvordan det tilstræbes at enheden kan tilpasse sendestyrken de benytter til radiokommunikation, for at spare energi hvor muligt. Dette er en funktion der vil være vigtig for at holde energiforbruget på et minimum og derved forlænge levetiden.

7 Konklusion

Et afgangsprojekt i Elektronik og Datateknik fra Syddansk Universitet er blevet gennemført i samarbejde med Ingeniører Uden Grænser. Under projektet er en elektronisk IoT-enhed blevet udviklet til monitorering af håndpumper i Sierra Leone's landdistrikter. Enheden er udviklet, blandt andet fordi en opgørelse fra 2016 af vandforsyningssystemer i Sierra Leone, viste at 65,5% af vandposterne var funktionelle, og at reparationer i 31,6% af tilfældende var mere end en måned om at blive fuldført. Enheden er et led i målet om at kunne skabe et overblik over vandpumpers funktionalitet, så problemer ved hver individuel vandpumpe kan løses hurtigere.

For at kunne dække geografiske områder, hvor der ikke er GSM dækning, er hver enhed blevet udstyret med et laveffekts netværksmodul. LoRa-moduler er her blevet valgt, da det med LoRa er muligt at bygge et privat netværk, hvor netværkstopologien mesh kan implementeres. Med et mesh-netværk kan enheder i geografiske områder uden GSM-dækning sende deres sensordata gennem andre enheder. For at holde enhedernes energiforbrug nede, benyttes et Real Time Clock-modul til at synkronisere et datatransmissionsvindue for enhederne. I den resterende tid kan de være i energibesparende tilstand. Mesh-topologien er implementeret med Radiohead-biblioteket, og sensordata pakkes i CayenneLPP format for at minimere den sendte datalængde, uden at gå på bekostning af informationer omkring datatype og sensorkanal.

En IoT-baseret LPWAN-enhed med fokus på lavt strømforbrug er udviklet med udgangspunkt i mikrocontrolleren ATMega1284P, som er valgt på baggrund af sit strømforbrug, mængde af SRAM og Arduino kompatibilitet. Enheden har et strømforbrug på 4,2mA i aktiv tilstand og et strømforbrug på under 50µA under søvn hvis der ses bort fra lade- og afladningskredsløbet, som bruger 85µA. Det samlede strømforbrug overholder ikke målet sat under afsnit 1.7, men har gennem test vist sig at være nok til at enheden, med den valgte superkapacitor, formentlig kan overleve én nat.

Software til enhederne er udviklet med funktionalitet til at skabe et LoRa mesh-netværk, og til at synkronisere dataudvekslingsvinduer for enheder der måtte være kommet ud af synkronisering. Software og hardware er forsøgt testet sammen i et forsøg der skulle simulere virkelige forhold. Det viser sig dog at der opstår en fejl efter nogen tid i drift, der gør at nogle enheder holder op med at fungere. Dette betyder at softwaren ikke er funktionsdygtig ved afslutning af dette projekt.

Figurer

1		2
2	På figuren ses et overblik over funktionaliteten af vandposter i Sierra Leone.	
	Grønne prikker angiver fungerende vandposter, mens røde prikker angiver	
	vandposter, som er i stykker. Figuren er lånt fra[86].	3
3	Det nuværende EWB monitor-system, hvor sensordata sendes til en	
	webserver med en Irridium satellit-forbindelse. Slutbrugeren modtager	
	dagligt en e-mail med data. Figuren er lånt fra Ingeniører uden grænser [20].	5
4	Kortet viser udbyderen Africell's GSM dækning i Sierra Leone. Det kan ses	
	at det langt fra er hele landet der har dækning. Kortet er lånt fra GSMA [51].	5
5	Her ses et overblik over SatWater's forskellige sensorpakker. Denne figur	
	giver samtidig et godt overblik over hvad systemet kan. Figuren er lånt fra	
	SatWater Meter and Communicator Installation Manual.[66]	7
6	Blokdiagram over de mest basale delelementer, som en IoT-enhed typisk	
	består af.	13
7		14
8	Til venstre ses et blokdiagram der beskriver enhedens energiflow, fra solpa-	
	nel til superkapacitor, videre til spændingsregulatoren og derfra fordelt til	
	alle elementer af enheden. Det skal bemærkes at GSM-modulet er forsynet	
	udenom spændingsregulatoren. Til højre ses et digram over kommunika-	
	tionsforbindelserne i enheden. Mikroprocessoren styrer al kommunikation	
	mellem de forskellige komponenter.	15
9	På billedet ses Jira Board, hvor gruppemedlemmerne har kunnet påtage sig	
	ansvaret for individuelle opgaver. Her er ligeledes et overblik over både de	
	opgaver, som endnu ikke er løst, og de opgaver, som midlertidigt er blevet	
	udsat	18
10	Et overblik over de fire forskellige typer enheder der findes i Sigfox' netværks	
	princip. Deriblandt det trademaked Sigfox CLOUD der er bindeledet mellem	
	sigfox stations og kundens egen IT. Objects sender beskeder asynkront til	
	Sigfox Stations, som kan sende beskederne videre til Sigfox CLOUD. Billedet	
	er lånt fra en Sigfox video [71].	19
11		21

12	Her ses syv forskellige netværkstopologier. Topologien 'Fully connected'	
	er en form for mesh-netværk. 'Line' er meget lig en 'Ring'-topologi, idet	
	enhederne kun har forbindelse til deres umiddelbare nabo til hver side.	
	'Tree' er en underkategori af 'Star'. Den kaldes også for 'Star of Stars' da	
	det er en sammenhæng af star-topologier. Figuren er lånt fra [52]	25
13	Her ses et eksempel på hvorledes dataudvekslingsvinduet fungerer. Samtidig	
	ses det hvordan en enhed der af den ene eller anden grund har en forkert tid	
	bliver synkroniseret igen. Her er det End device 2 der ikke er synkroniseret,	
	og derfor vågner på et andet tidspunkt end de andre enheder. End device	
	1ved dog at den har forbindelse, da den fik respons på beskeder i løbet	
	af dataudvekslingsviduet. Derfor broadcaster denne tiden på netværket	
	på tidspunkter hvor den alligevel er vågen for for eksempel at foretage en	
	sensor-måling. Enheder broadcaster dog kun tiden, hvis de er tæt på fuldt	
	opladet	30
14	En oversat JSON string fra en pakket CayenneLPP payload. Her er	
	modtaget data fra kanal 0 af typen 2 der svarre til analogt input, og	
	værdien 0.44V.	36
15	Den forventede levetid i forhold til antal sendte beskeder per dag for	
	forskellige boards. Spreading factor 7 er øverste linje, og spreading factor	
	$12~{\rm er}$ neders te linje for hver farve/board. Der sendes en 20 byte payload.	
	Dramco Uno er 'Proposed Solution', og det ses at boardet har en længere	
	levetid end tre ud af fire andre boards, som der sammenlignes med. Figuren	
	er lånt fra Katholieke Universiteit Leuven[80]	41
16	Målinger af effektforbruget af KRATOS enhed, her kaldet mote, og dens	
	WuRX og LoRa-modul under brug af forskellige operationer. Som det	
	kan ses benytter enheden meget lidt strøm på at lytte efter beskeder på	
	netværket og aktivere først når den har modtaget en besked. Figuren er	
	lånt fra [53]	42
17	ATmega328P-PU's operationsområde, det ses at den maksimale frekvens	
	hvorved mikrocontrolleren kan opererer har en stærk sammenhæng med	
	forsyningsspændingen. Figuren er en gengivelse af figur 29-1, s. 312. fra	
	ATmega328P's datablad [9]	46

18	Forsyningsspænding og strømforbruget af ATmega328P i power-down til-	
	stand. Det ses at temperaturen kan have stor indvirkning på strømforbruget	
	i ekstreme situationer, ved højere temberature betyder en stigning i for-	
	syningspænding også en højere stigning i strømforbrug. Figuren 31-342, s.	
	507 fra ATmega328P's datablad[9]	49
19	Forsyningsspændingen og strømforbruget af ATmega1284P ved brug af	
	indre krystal. Ved aflæsning findes strømmen til ca. 4,5mA ved 3,3V. Figur	
	30-348, s. 528 i ATmega1284P's datablad [8]	52
20	Forsyningsspændingen og strømforbruget af ATmega 1284 P i power-down	
	tilstand. Ved aflæsning findes strømmen til ca. $0.2\mu\mathrm{A}$ ved $3.3\mathrm{V}.\mathrm{Figur}$ 30-355,	
	s. 533 i ATmega1284P's datablad [8]	52
21	Karakteristik for fejlen i frekvens over forskellige temperaturer for kompo-	
	nenten RV-3028-C7. Det ses at fejlen ved 40°C ikke er større end -10ppm.	
	Figuren er lånt fra RV-3028-C7's datablad.[65]	55
22	Her ses et af de små solpaneler. Som det ses er panelerne under 10cm lange.	56
23	Parallelt shunt regulator kredsløb, som fungerer som en beskyttelse mod	
	for høje spændinger.	58
24	Reguleringseffektiviteten ved forskellige indgangsspændinger når udgangs-	
	spændingen er 3,3V. Fra figuren kan det ses at ved indgangsspændinger der	
	ligger langt over udgangsspændingen er effektiviteten dårligere, samtidig er	
	effektiviteten betydeligt dårligere under $0,01\mathrm{mA}$ i output strøm, Figuren er	
	lånt fra TPS62240DSSR's datablad [81]	62
25	Her ses den valgte superkapacitor PHV-5R4V505-R længst til venstre. De	
	to andre er andre kapacitorer der ses på billedet har en lavere kapacitet og	
	en den ene også en lavere maks spænding. Det kan ses at alle kapacitorne	
	er under fire cm lange	72
26	Eaton superkapacitors levetid over temperatur og operative spænding,	
	som viser at dens levetid har et logaritmisk fald over temperaturskalaen.	
	Superkapacitoren antages i grafen som død, når kapacitansen er faldet enten	
	30% eller 50%. Figuren er lånt fra PHV-5R4V505-R's datablad [5]	73
27	Graf af selvafladningen af en Eaton superkapacitor over tid. Dens spændings-	
	tab flader ud over tid. Ved den sidste måling var det samlede spændingsfald	
	0,54V	74

28	Målinger af spændingen over superkapacitoren over tid foretaget under et	
	proof of concept forsøg. Dataen er blevet logget af en slave-enhed med egen	
	forsyning. Superkapacitorens spænding er blevet målt af en ATmega328P	
	drevet fra to solpaneler. Superkapacitorens spænding blev logget i mere end	
	tre timer	75
29	Èn produceret enhed, hvor både LoRa og GSM-modul er koblet til. Det	
	skal bemærkes at GSM-modulet under operation ikke kan være monteret i	
	denne placering da det forstyrrer mikrocontrolleren	76
30	Her ses den strøm en enhed, der køre ved 8MHz ,trak under testen. Data	
	er blevet behandlet med et moving average filter for at mindske støj på	
	signalet. De forskellige stadier ses tydeligt, først activ, så sleep mode,	
	derefter aktiv i et kort øjeblik hvorefter de fem beskedder sendes ved	
	forskellig styrke	78
31	Data fra testen med en ekstern 16MHz krystal. Denne data er behandlet på	
	lige vis med den forrige. Det kan ses observeres i på denne figur at enheden	
	i de aktiive stadier trækker en højere strøm end ved 8MHz. \ldots	79
33	Flowchart der beskriver starten af koden. De farvede bokse indikere funktio-	
	ner der kan implementeres, men som ingen funktion har for netværksdelen	
	af enheden	82
34	Flowchart der beskriver hvorledes et interrupt genereret af RTC timeren	
	håndteres. her indsamles data og status på spændingsforsyningen tjækkes.	
	Det er også her enheder vil broadcaste tiden hvis de har strøm til det, eller	
	lytte efter sådanne broadcasts hvis enheden ikke havde kontakt i løbet af	
	sidste dataudvækslingsvindue	83
35	Flowchart der beskriverhvordan hvad der sker ved et RTC alarm interrupt.	
	her sendes ind samled data. Bemærk at flow'et starter øverst til højre 	85
36	Effektivitet af TPS62740DSST som funktion af output strøm, figur 13 i	
	datablad.	III
37	Effektivitet af TPS62745 som funktion af output strøm fra databladet	IV
38	På figuren ses opsætningen for at brænde en bootloader til en ATmega 328 P	
	med en ekstern krystal, hvor en Arduino Uno benyttes som ISP. Figuren er	
	lånt fra Voidyourwarranty.[83]	VII
39	Diagram af opsætningen, når ATmega 328 P benytter en ekstern krystal. $\ .$.	VIII

40	Et digram over hvordan de forskellige komponenter var forbundet under
	forsøget
41	Opsætningen som den så ud under forsøget
42	Kassen med opsætningen er placeret på en åben slette på en høj XII
43	Vejrudsigten fra d. 10/10 til d. 12/10 2019.
44	Den målte spænding af ATmega 328 P over superkapacitoren over tid. Sidste
	måling er efter 158 minutter. Den sidste målte spænding var 4,61V XIV
45	Her ses den indsamlede da fra osciloscopet ved 8MHz testen
46	Her ses den indsamlede da fra osciloscopet ved 16MHz testen $\ .$
47	Her ses den behandlede dat fra 8MHz testen
48	Her ses den behandlede dat fra 16MHz testen \hdots
49	Flowchart der beskriver Funktionen af koden. De farvede bokse indike-
	re funktioner der kan implementeres, men som ingen funktion har for
	netværksdelen af enheden

Tabeller

1	Sammenligning af tre LPWAN-teknologier. Både Sigfox og LoRaWAN	
	benytter star-topologi, mens der i LoRa kan implementeres andre topologier.	
	Sigfox har en længere rækkevidde end LoRaWAN/LoRa i landbrugsområder,	
	mens LoRaWAN/LoRa tillader private netværk. Tabellen indeholder blandt	
	andet udvalgte parametre fra Table 1 i [46]	24
2	Standard ModemConfigChoice som der kan vælges i Radiohead biblioteket.[56]	33
3	Test af RFM95 modulers rækkevidde ved forskellige konfigurationer foreta-	
	get af forfatterne bag Radiohead-biblioteket. Den opnåede rækkevidde er	
	gennem en skov med tæt vegetation.	33
4	Transmission stider ved to konfigurationer af RFM95 styret fra henholds vis	
	en 8Mhz og en 16MHz mikrocontroller. Første besked er altid en route	
	discovery-besked, som skal klarlægge routing tables for de to enheder	
	i testen. Derfor tager den længere tid end de efterfølgende beskeder.	
	Bw125Cr45Sf128 er Radiohead-bibliotekets standardkonfiguration	35
5	Fire datatyper fra CayenneLPP kan ses i tabellen. De enkelte datatyper, som	
	tager udgangspunkt i en standard kaldet IPSO, oversættes i CaynneLPP til	
	en byte. Størrelsen af datatyperne er forskellige. [11] \ldots \ldots \ldots \ldots	37
6	Et eksempel på hvordan bytes kan dekodes til to sensormålinger.[11] $\ .$	37
7	Et eksempel på en udgående datastring med data fra to enheder hvor en	
	sender to bytes data og den anden sender tre bytes	38
8	Sammenligning mellem to udbredte og billige mikrocontrollere. \ldots . \ldots .	44
9	Sammenligning af to mellemklasse mikrocontrollere.	44
10	Strømforbruget af ATmega328 P-PU i aktiv tilstand drevet ved forskellige	
	oscillatorer. Streger angiver forsyningsspændinger, som ikke er blevet målt.	
	Fra 3,3V til 5V er der et spring i strømforbruget. Det laveste strømforbrug	
	sker ved brug af den indre oscillator, og ved den laveste clockhastighed $\ .$	46
11	Strømforbruget af ATmega328P-PU i to forskellige low power tilstande. $\ . \ .$	48
12	Arduino Nano V3.0's strømforbrug i forskellige tilstande med 5V forsy-	
	ningsspænding.	49
13	Kalibrationsnøjagtigheden af den indre oscillator i en ATmega328P-PU.	
	Tabellen er en gengivelse af table 29-9 s. 313 i ATmega 328 P's datablad [9]. $% \left[\left(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, $	50

14	Test af kortslutningsstrøm og open circuit spændinger leveret af et solpanel.	
	Solpanelet leverer mest energi, når det er vinklet mod solen og når der ikke	
	er overskyet.	57
15	Lade- og afladningskredsløbets målte strømforbrug. Strømforbruget stiger,	
	når indgangsspændingen kommer over $5,3V$. Det skyldes effektmodstanden	
	i kredsløbet begynder at lede.	61
16	Sammenligning af power switches til USB porte, MOSFET transistorer og	
	en belastningskontakt.	64
17	Overblik over temperaturområder for batterier.	68
18	En sammenligning af energitæthed, effektdensitet, operationstemperatur og	
	antal ladecyklusser for superkapacitorer og de gængse batterityper. Super-	
	kapacitorer har den højeste effektdensitet, breddeste operationstemperatur-	
	område og flest ladecyklusser. Til gengæld er energitætheden den laveste.	
		70
19	En sammenligning af den gennemsnitlige strøm systemet trækker i de	
	forskellige stadier samt beregnede værdiger for en mikrocontroller ved	
	8MHz indre krystal. Det skal her bemærkes at de beregnede værdiger fra	
	afsnit 4.4.9 tager højde for op og afladekredsløbet også. Dette element var	
	ikke monteret under forsøget. Samtidig skal det noteres at de målte værdiger	
	for enheden i sleep mode er foretaget med et Agilent 34401A multimeter.	
	Dette skyldes at det ikke var muligt at måle strømmen for denne tilstand	
	i det opstillede forsøg. Signalet var simpelthen for lavt sammenlignet med	
	støjen	79
20	En sammenligning af forskellige RTC komponenter, med deres strømforbrug,	
	præcision, pris og eventuelt kommentare	Ι
21	En sammenligning af spændingsregulatorer der er blevet overvejet med en	
	kort beskrivelse og pris og tilgængelighed.	III
22	Tabellen angiver de pins, som skal forbindes mellem en Arduino Uno	
	og enten en ATmega 328 P eller ATmega 1284 P for at opsætte dem med	
	bootloader og/eller ændre fuses	VI
23	Strømforbruget af ATmega328P-PU i aktiv tilstand	IX
24	Strømforbruget af ATmega328P-PU i to forskellige low power tilstande	Х

25	En sammenligning af den gennemsnitlige strøm systemet trækker i de
	forskellige stadier samt beregnede værdiger for en mikrocontroller ved
	8MHz indre krystal. Det skal her bemærkes at de beregnede værdiger fra
	afsnit 4.4.9 tager højde for op og afladekredsløbet også. Dette element var
	ikke monteret under forsøget. Samtidig skal det noteres at de målte værdiger
	for enheden i sleep mode er foretaget med et Agilent 34401A multimeter.
	Dette skyldes at det ikke var muligt at måle strømmen for denne tilstand
	i det opstillede forsøg. Signalet var simpelthen for lavt sammenlignet med
	støjen
26	De fire standardindstillinger for Radiohead kan sættes ved at sætte en pin
	fra PC4 til PC7 høj på projektets producerede enhed. \ldots XXV
27	Transmissionstider ved forskellige konfigurationer af RFM95 styret fra
	henholdsvis en 8Mhz og en 16MHz mikrocontroller. Transmissioner med
	kort og mellem rækkevidde kan sendes langt hurtigere end transmissioner
	med stor rækkevidde

Litteratur

- 10 years in Sierra Leone. Sidst besøgt: 28/12/2019. URL: https://iug.dk/media/ 67437/ewb-dk-and-sierra-leone.pdf.
- [2] About LoRa Alliance. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://lora-alliance.org/ about-lora-alliance.
- F. Adelantado m.fl. "Understanding the Limits of LoRaWAN". I: IEEE Communications Magazine 55.9 (sep. 2017), ss. 34–40. ISSN: 0163-6804. DOI: 10.1109/MCOM. 2017.1600613.
- [4] AOZ1282CI Datasheet. Sidst besøgt: 30/12/2019. URL: www.aosmd.com/res/data%
 5C_sheets/AOZ1282CI.pdf.
- [5] Application guidelines. Sidst besøgt: 23/12/2019. Figur på side 2. URL: https://www. eaton.com/content/dam/eaton/products/electronic-components/resources/ technical/eaton-supercapacitor-application-guidelines.pdf.
- [6] Arduino Mighty Core. Sidst besøgt: 30/12/2019. URL: www.github.com/mcudude/ mightycore.
- [7] Arduino Nano. Sidst besøgt: 18/9/2019. URL: https://store.arduino.cc/arduinonano.
- [8] ATmega1284P Datasheet. Sidst besøgt: 11/12/2019. URL: http://ww1.microchip. com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega164A%5C_PA-324A%5C_PA-644A%5C_PA-1284%5C_P%5C_Data-Sheet-40002070A.pdf.
- [9] Atmega328p Datasheet. Sidst besøgt: 31/12/2019. URL: http://ww1.microchip. com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf.
- [10] Aloys Augustin m.fl. "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things". English. I: Sensors 16.9 (2016). Date revised - 2016-12-01; Last updated - 2016-12-05, s. 1466. URL: http://proxy1-bib.sdu.dk:2048/login?url= https://search.proquest.com/docview/1845794510?accountid=14211.
- [11] Cayenne Low Power Payload. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://developers.
 mydevices.com/cayenne/docs/lora/#lora-cayenne-low-power-payload.

- [12] Centre of Sierra Leone Studies Forestation. Sidst besøgt: 25/9/2019. URL: http: //unimak.edu.sl/wordpress/wp-content/uploads/Centre-of-Sierra-Leone-Studies-Forestation.pdf.
- [13] Climate Sierra Leone. Sidst besøgt: 25/9/2019. URL: https://www.climatestotravel. com/climate/sierra-leone.
- [14] Connect to the world with Hiberband. Sidst besøgt: 15/12/2019. URL: https:// hiber.global/hiberband.
- [15] ContikiOS running on Semtech SX1276/77/78/79 LoRa module. Sidst besøgt: 18/10/2019.
 URL: https://github.com/rajeev1986/contikios-for-lora.
- [16] Joseph Cook og Sheena Lahren. "Why do water points fail? Learning from openended failure descriptions in the WPDx dataset". I: Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development 7.4 (okt. 2017). Citeret fra s. 542, ss. 535-545. ISSN: 2043-9083. DOI: 10.2166/washdev.2017.022. eprint: https://iwaponline.com/ washdev/article-pdf/7/4/535/202193/washdev0070535.pdf. URL: https: //doi.org/10.2166/washdev.2017.022.
- [17] CubeCell Dev-Board. Sidst besøgt: 15/11/2019. URL: https://heltec.org/ project/htcc-ab01/.
- [18] Data Rate and Spreading Factor. Sidst besøgt: 2/1/2020. URL: https://docs. exploratory.engineering/lora/dr_sf/.
- [19] Datasheet Hiberband Via. Sidst besøgt: 5/9/2019. URL: https://hiber.global/ hiberband.
- [20] Datatransmissionen virker nu i Gandorhun! Sidst besøgt: 28/12/2019. URL: https: //iug.dk/aktuelt/news/datatransmissionen-virker-nu-i-gandorhun.
- [21] Definition & Calculation of Fresnel Clearance Zone. Sidst besøgt: 15/12/2019. URL: https://www.proxim.com/en/products/knowledge-center/calculations/ calculations-fresnel-clearance-zone.
- [22] ETSI EN300.220, sektion 7.2.3. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://www.etsi. org/deliver/etsi%5C_en/300200%5C_300299/30022001/02.04.01%5C_40/en%5C_ 30022001v0204010.pdf.

- [23] EWB_Monitor_Nodes. Her ligger den kode der er udviklet til dette projekt. Sidst besøgt: 30/12/2019. URL: https://github.com/EmilSchier/EWB%5C_Monitor%5C_ Nodes.
- [24] FossaSat-1. Sidst besøgt: 15/12/2019. URL: https://fossa.systems/fossasat-1/.
- [25] FossaSat-1 Github. Sidst besøgt: 15/12/2019. URL: https://github.com/FOSSASystems/
 FOSSASAT-1.
- [26] Donald R. Franceschetti. Principles of Robotics & Artificial Intelligence. Salem Press, 2018. ISBN: 9781682179420. URL: http://search.ebscohost.com.proxy1-bib. sdu.dk:2048/login.aspx?direct=true%5C&db=nlebk%5C&AN=2001959%5C&site= ehost-live.
- [27] Freetown Climate graph // Weather by Month. Sidst besøgt: 25/9/2019. URL: https: //en.climate-data.org/africa/sierra-leone/western-area/freetown-526/#climate-graph.
- [28] Freetown, Sierra Leone Sunrise, Sunset, and Daylength. Sidst besøgt: 24/9/2019.
 URL: https://www.timeanddate.com/sun/sierra-leone/freetown?month=12%
 5C&year=2019.
- [29] Fresnel Zone. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://www.sciencedirect.com/ topics/engineering/fresnel-zone.
- [30] From Arduino to a Microcontroller on a Breadboard. Sidst besøgt: 1/1/2020. Download af bootloader under 'Minimal Circuit (Eliminating the External Clock)'. URL: https://www.arduino.cc/en/Tutorial/ArduinoToBreadboard.
- [31] Heltec ASR650x BlockDiagram. Sidst besøgt: 15/11/2019. URL: https://github. com/HelTecAutomation/ASR650x-Arduino/blob/master/BlockDiagram/HT-AB01. pdf.
- [32] Heltec ASR650x Series Arduino Develop Environment. Sidst besøgt: 15/11/2019.
 URL: https://github.com/HelTecAutomation/ASR650x-Arduino.
- [33] *Hiberband*. Sidst besøgt: 5/9/2019. URL: https://hiber.global.
- [34] How can you calculate the actual bit rate and time on air for a LoRa system? Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://lora-developers.semtech.com/knowledgebase/faq-single/376.

- [35] Internet-of-Trees Elektronica. Sidst besøgt: 18/10/2019. URL: https://www.dramco.
 be/projects/iotree/#electronics.
- [36] Hussam Jouhara m.fl. "Applications and thermal management of rechargeable batteries for industrial applications". I: *Energy* 170 (2019), ss. 849-861. ISSN: 0360-5442. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.218. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218325982.
- [37] Dong-Hoon Kim, Eun-Kyu Lee og Jibum Kim. "Experiencing LoRa Network Establishment on a Smart Energy Campus Testbed". I: Sustainability 11 (mar. 2019), s. 1917.
 DOI: 10.3390/su11071917.
- [38] H. Lee og K. Ke. "Monitoring of Large-Area IoT Sensors Using a LoRa Wireless Mesh Network System: Design and Evaluation". I: *IEEE Transactions on Instrumentation* and Measurement 67.9 (sep. 2018), ss. 2177–2187. DOI: 10.1109/TIM.2018.2814082.
- [39] Library for Arduino compatible with Cayenne Low Power Payload. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://github.com/ElectronicCats/CayenneLPP?utm%5C_ source=platformio%5C&utm%5C_medium=piohome.
- [40] LoRa airtime calculator. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://docs.google. com/spreadsheets/d/1voGAtQAjC1qBmaVuP1ApNKs1ekgUjavHuVQIXyYSvNc/edit# gid=0.
- [41] LoRaWAN Duty Cycle. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://www.thethingsnetwork. org/docs/lorawan/duty-cycle.html.
- [42] LoRaWAN Frequency Plans and Regulations by Country. Sidst besøgt: 29/12/2019.
 URL: https://patents.google.com/patent/US8406275B2/en.
- [43] Low Power Library for Arduino. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://github. com/rocketscream/Low-Power.
- [44] Make rural kids the smart farmers of tomorrow. Sidst besøgt: 15/12/2019. URL: https://hiber.global/casestudies/make-rural-kids-smart-farmers.
- [45] Materials for electrochemical capacitors. Sidst besøgt: 30/12/2019. URL: https:// www.nature.com/articles/nmat2297.

- [46] Kais Mekki m.fl. "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment". I: ICT Express 5.1 (2019), ss. 1–7. ISSN: 2405-9595. DOI: https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517302953.
- [47] Mouser søgning: STM32L010. Sidst besøgt: 24/9/2019. URL: https://www.mouser. dk/Semiconductors/Embedded - Processors - Controllers/Microcontrollers -MCU/ARM-Microcontrollers-MCU/%5C_/N-a85pc?Keyword=STM32L010%5C&FS= True.
- [48] Aqib Muzaffar m.fl. "A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications". I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 101 (2019), ss. 123-145. ISSN: 1364-0321. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser. 2018.10.026. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307299.
- [49] myDevices Cayenne. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://www.thethingsnetwork. org/docs/applications/cayenne/.
- [50] Mål 6 Rent vand og sanitet. Sidst besøgt: 28/12/2019. URL: https://un.dk/da/omfn/verdensmaalene/maal-6/maal-6-rent-vand-og-sanitet.
- [51] Network coverage. Sidst besøgt: 28/12/2019. URL: www.gsma.com/coverage/%5C#
 261.
- [52] Network topology. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://en.wikipedia.org/ wiki/Network%5C_topology#Topologies.
- [53] Rajeev Piyare m.fl. "KRATOS: An Open Source Hardware-Software Platform for Rapid Research in LPWANs". I: CoRR abs/1809.04143 (2018). arXiv: 1809.04143. URL: http://arxiv.org/abs/1809.04143. Figur på side 4.
- [54] Præsentation af Ingeniører Uden Grænser: 10 years in Sierra Leone. Sidst besøgt: 30/12/2019. Billede på side 1. URL: https://iug.dk/media/67437/ewb-dk-andsierra-leone.pdf.
- [55] RadioHead Packet Radio library for embedded microprocessors. Sidst besøgt: 29/12/2019.
 URL: https://www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/index.html.
- [56] RadioHead RH_RF95 Class Reference. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https:// www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/classRH%5C_%5C_RF95.html.

- [57] RadioHead RH_RF95.h. Linje 481 til linje 494. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/classRH%5C_%5C_ RF95.html.
- [58] RadioHead RH_RF95.h. Linje 307 til 316. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https: //www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/classRH%5C_%5C_RF95.html.
- [59] U. Raza, P. Kulkarni og M. Sooriyabandara. "Low Power Wide Area Networks: An Overview". I: *IEEE Communications Surveys Tutorials* 19.2 (2017), ss. 855–873. ISSN: 1553-877X. DOI: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [60] RS-Online søgning på krystalenheder. Sidst besøgt: 22/12/2019. URL: https://dk. rs-online.com/web/c/halvledere/krystaller-oscillatorer-og-resonatorer/ krystalenheder/.
- [61] RS-Online: ATMEGA1284P-PU. Sidst besøgt: 11/12/2019. URL: https://dk.rsonline.com/web/p/mikrokontrollere/1278234/.
- [62] RS-Online: STM32L071RBT6. Sidst besøgt: 11/12/2019. URL: https://dk.rsonline.com/web/p/mikrokontrollere/1894122.
- [63] RT9069 Datasheet. Sidst besøgt: 30/12/2019. URL: www.farnell.com/datasheets/ 1934343.pdf.
- [64] RTC RV-3028-C7 Arduino Library. Sidst besøgt: 25/12/2019. URL: https://github. com/constiko/RV-3028%5C_C7-Arduino%5C_Library.
- [65] RV-3028-C7 Datasheet. Sidst besøgt: 22/12/2019. URL: https://www.microcrystal. com/fileadmin/Media/Products/RTC/Datasheet/RV-3028-C7.pdf.
- [66] SatWater. SatWater Meter and Communicator. Version 2. SatWater. Se filen i afleveringsmappen 'SatWater/SatWater Meter og Communicator V2 Manual.pdf', 2018.
- [67] SatWater Meter & Communicator Flyer. Sidst besøgt: 5/9/2019. URL: https:// watermission.org/wp-content/uploads/2016/11/SatWaterMeter%5C_Flyer. pdf.
- [68] SDU skal være Danmarks første bæredygtige universitet. Sidst besøgt: 28/12/2019. URL: https://www.sdu.dk/da/voresverdensmaal/sdg%5C_nyhedsliste/ verdensmaal%5C_pm.
- [69] Sigfox Coverage. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://www.sigfox.com/en/ coverage.

- [70] Sigfox technology. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://www.sigfox.com/en/ what-sigfox/technology#id%5C_technology.
- [71] SIGFOX TECHNOLOGY: Sigfox Network Architecture. Video fra Sigfox om netværks arkitekturen. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://www.youtube.com/ watch?v=7zc6bH-9qZk%5C&feature=youtu.be.
- [72] spread spectrum technique patent. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://patents. google.com/patent/US8406275B2/en.
- [73] Spreading Factor, Bandwidth, Coding Rate and Bit Rate in LoRa (English). Sidst besøgt: 31/12/2019. URL: https://josefmtd.com/2018/08/14/spreading-factorbandwidth-coding-rate-and-bit-rate-in-lora-english/.
- [74] SweetSense Fleet Summary. Sidst besøgt: 14/12/2019. URL: http://www.sweetsensors. com/sweetdata/public-examples.
- [75] SweetSense Technology. Sidst besøgt: 28/12/2019. URL: http://www.sweetsensors. com/our-technology.
- [76] SX1262. Sidst besøgt: 1/1/2020. URL: https://www.semtech.com/products/ wireless-rf/lora-transceivers/sx1262.
- [77] The Things Network. Sidst besøgt: 2/1/2020. URL: https://www.thethingsnetwork. org/docs/devices/.
- [78] The Things Network Map. Sidst besøgt: 2/1/2020. URL: https://www.thethingsnetwork. org/map.
- [79] Thermal Effects in Supercapacitors. Sidst besøgt: 30/12/2019. URL: https://www. electronics-cooling.com/2016/12/thermal-effects-supercapacitors/.
- [80] Bart Thoen m.fl. "A Deployable LPWAN Platform for Low-Cost and Energy-Constrained IoT Applications". I: Sensors 19.3 (2019). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19030585.
 URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/19/3/585. Figur på side 8.
- [81] TPS62740DSST Datasheet. Sidst besøgt: 31/12/2019. URL: http://www.ti.com/ lit/ds/slvsb02b/slvsb02b.pdf.
- [82] TPS62745 Datasheet. Sidst besøgt: 30/12/2019. URL: www.ti.com/lit/ds/symlink/ tps62745.pdf.
- [83] Using Arduino as an ISP to Program a Standalone ATmega 328P (Including Fuses). Sidst besøgt: 31/12/2019. URL: https://voidyourwarranty.wordpress.com/2014/ 08/17/using-arduino-as-an-isp-to-program-a-standalone-atmega-328pincluding-fuses/.
- [84] Utilities & Energy. Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://www.sigfox.com/en/ utilities-energy.
- [85] Water point functionality. Sidst besøgt: 13/12/2019. URL: https://washdata-sl. org/water-point-data/water-point-functionality.
- [86] Water point functionality Sierra Leone. Sidst besøgt: 30/12/2019. URL: www.washdatasl.org/map/water-point-functionality.
- [87] Wells in Heuge And Providing a Pump. Sidst besøgt: 2/1/2020. URL: http:// projekt.iug.dk/wash/item/wells.
- [88] What is the LoRaWAN Specification? Sidst besøgt: 29/12/2019. URL: https://loraalliance.org/about-lorawan.
- [89] Rodger E. Ziemer. "Fundamentals of Spread Spectrum Modulation". I: Synthesis Lectures on Communications 2.1 (2007), ss. 1–79. DOI: 10.2200/S00096ED1V01Y200708COM003.
 eprint: https://doi.org/10.2200/S00096ED1V01Y200708COM003. URL: https://doi.org/10.2200/S00096ED1V01Y200708COM003.

A Sammenligning af RTC-komponenter

Komponenterne er udvalgt på baggrund af søgninger hos RS-Online, hvor der blev søgt efter komponenter der opfyldte kravene beskrevet i afsnit 4.4.1.

RTC komponent	Strømforbrug [uA]	PPM [+-]	Pris hos RS-Online [DKK]	Kommentar
RV-3028-C7	$0{,}045{+}1{\rm hvis}$ CL-	$1~({\rm fra~fabrikskalibre}{-}$	Ikke til salg hos	God manual, ned
	Kout er aktiv ved	ring)	RS-online. (Mou-	til Vcc=1,1V, egen
	32.768kHz		ser: 3,01 euro $/$	clock, tidsfejl doku-
			22,50DKK)	menteret over tem-
				peraturskala, SON-8
				package. Til salg hos
				Digikey og Mouser.
DS3231	110	2	53,80	8-SOIC package.
				Den er meget brugt
				i Arduino communi-
				ties.
BU9873-GTE2	0,4	Ned til 1,5 efter kali-	$5{,}782/\mathrm{stk}$ ved køb af	Intet backup-batteri
		brering	10 stk	switch system, ingen
				krystal, skal kalibre-
				res.
M41T82	6,5	5, men kan forbedres	97,97	Ekstern krystal.
		med kalibrering		
NXP PCF8563TS	0,25-500	5	11,162 pr stk. ved	Ekstern krystal,
			køb af 5	alarm, timer der
				kan skabe et inter-
				rupt på sekund eller
				mindre.
RTCMCP7940N	1,2	Ukendt, ned til 1	~ 5	Ekstern krystal, god
				korrektionsguide.

Tabel 20: En sammenligning af forskellige RTC komponenter, med deres strømforbrug, præci-sion, pris og eventuelt kommentare.

Komponent	Beskrivelse	Pris og tilgængelighed
TPS62740DSST	Step-down converter for laveffekts ap-	13,77 DKK hos RS-
	plikationer.	Online ekskl. spole
	$V_i = 2,2V til 5,5V$	
	$V_out = 1,8V ext{ til } 3,3V$	
	$I_out = 300 mA$	
	$I_Q = 360 nA$	
	Datablad i afleveringsmappen.	
	Graf over effektivitet figur 36	
TPS62745	Dual-cell Ultra Low I_Q Step Down	14,53 DKK stk. hos
	Converter for	Farnell ekskl. spole
	Low Power Wireless	
	Applications	
	$V_i = 3.3 \text{ til } 10 \text{V}$	
	$V_out = 1.8V \ til \ 3.3V$	
	$I_out = op til 300 mA$	
	$\rm I_Q = typisk \ 400nA$	
	Datablad:[82]	
	Graf over effektivitet figur 37	
RT9069	Low Dropout Voltage Linear Regula-	4,6 DKK stk. hos Far-
	tor	nell
	$V_i = op til 36V$	
	$V_out = 3,3V$	
	Dropout voltage = 0.33V at 10mA/ $$	
	$V_{in 5V}$	
	$\rm I_out = 200~mA~I_Q = 2~uA$ uden	
	load	
	Datablad:[63]	

B Sammenligning af regulatorer

Komponent	Beskrivelse	Pris og tilgængelighed
AOZ1282CI	Simple Buck regulator	Ukendt pris
	$V_{in} = 4,5V til 36V$	
	$ m I_out = 1,2 m A$	
	$V_out = ned til 0.8V$	
	$I_Q = 1 til 1,5 mA$	
	Datablad: [4]	

Tabel 21 fortsat fra forige side

 Tabel 21: En sammenligning af spændingsregulatorer der er blevet overvejet med en kort beskrivelse og pris og tilgængelighed.



Figur 36: Effektivitet af TPS62740DSST som funktion af output strøm, figur 13 i datablad.



Efficiency vs Output Current; Vo = 3.3 V

Figur 37: Effektivitet af TPS62745 som funktion af output strøm fra databladet.

C Opsætning af bootloader og fuses på ATmega328P/1284P

I bilaget beskrives det stepvist hvordan ATmega328P og ATmega1284P kan opsættes med bootloader og ønskede fuses. Mikrocontrollere direkte fra en fabrik, vil typisk være uden en bootloader.

Her præsenteres én metode hvorpå mikrocontrolleren kan sættes op, som bygger på at en Arduino Uno bruges som ISP. Metoden er benyttet under projektet.

ATmega328P's hardware-konfiguration i afleveringsmappen er sat til at køre med 8MHz indre oscillator, BOD deaktiveret og med 6 clock cycles start-up tid.

Udstyr

- ATmega328P eller ATmega1284P der skal lægges bootloader på
- Arduino Uno med USB kabel
- Breadboard og ledninger
- En computer med Arduino IDE installeret

Installering af hardware-konfigurationer og ændring af fuses

Når en bootloader brændes på mikrocontrolleren, tager Arduino Uno udgangspunkt i en hardware konfiguration, hvor ønskede fuses også kan sættes. Fuses afgør blandt andet hvilken clock-frekvens mikrocontrolleren skal køre ved, og om den skal benytte indre oscillator eller ekstern clock.

- Opret en mappe kaldet 'hardware' i Arduino sketchbook mappen. Sketchbook-mappens lokation kan findes under 'Files/Preferences' i Arduino IDE.
- I afleveringsmappen under 'ATmega hardware konfigurationer' findes hardware konfigurationerne for henholdsvis ATmega1284P og ATmega328P. Konfigurationerne kopieres ind i den oprettede hardware mappe. I mappen 'breadboard/avr/boards.txt' er der også konfigurationer til at ATmega328P kan køre med ekstern krystal ved 8 og 16MHz. I så fald skal den ønskede konfigurationsfil omdøbes til 'boards.txt'. ATmega1284P konfigurationen er lånt fra MCUdude's MightyCore[6], mens ATmega328P konfigurationen er lånt fra Arduino[30]. Der er lavet ændringer hos begge konfigurationer.

- Under 'breadboard/avr/boards.txt'/'MightyCore-master/avr/boards.txt' kan fuses ændres til ønskede værdier. Mikrocontrollerens datablad eller www.engbedded.com/fusecalc kan bruges til at finde ønskede fuses.
- Genstart Arduino IDE
- 'ATmega on a breadboard (8MHz internal clock)' og 'ATmega1284P' kan nu findes under 'Tools/Board:' i Arduino IDE.

Opsætning

- Åbn Arduino IDE og hent programmet ArduinoISP under 'File/Examples/ArduinoISP/ArduinoISP'.
- Upload programmet til Arduino Uno, og frakobl den fra computeren.
- Sæt mikrocontrolleren i breadboardet, og sæt forbindelserne mellem Arduino Uno og mikrocontrolleren, som kan aflæses i tabel 22. På figur 38 ses et eksempel på opsætningen med en ATmega328P, hvor der også bruges en ekstern krystal, samt en pull-up modstand på reset.
 - Hvis en mikrocontroller tidligere er sat til at være drevet af en ekstern oscillator, skal den eksterne oscillator tilføjes til kredsløbet før bootloaderen brændes på. Det betyder at XTAL pins skal forbindes til oscillatoren, hvilket kan ses på figur 38. De to kapacitorer skal have en værdi på 22pF for 8 og 16MHz krystaller.
- Tilkobl Arduino Uno til computeren når alle forbindelser er sat.

Pintype	Arduino Uno	ATmega328P	ATmega1284P
VCC	$5\mathrm{V}$	7 + 20	10 + 30
GND	GND	8+22	11 + 31
RESET	10	1	5
MOSI	11	17	6
MISO	12	18	7
SCK	13	19	8
XTAL	-	9 + 10	12 + 13

Tabel 22: Tabellen angiver de pins, som skal forbindes mellem en Arduino Uno og enten enATmega328P eller ATmega1284P for at opsætte dem med bootloader og/eller ændre fuses.



Figur 38: På figuren ses opsætningen for at brænde en bootloader til en ATmega328P med en ekstern krystal, hvor en Arduino Uno benyttes som ISP. Figuren er lånt fra Voidyourwarranty.[83]

Fremgangsmåde

- Vælg den ønskede opsætning under 'Tools/Board:'.
 - For ATmega328P, vælg: ATmega328 on a breadboard (8 MHz internal clock)
 - For ATmega1284P, vælg: ATmega1284P og sæt herefter ønsket Clock, BOD og Variant (1284P) under 'Tools' i Arduino IDE.
- Brænd bootloaderen og sæt fuses ved at trykke på 'Tools/Burn Bootloader'.

D Tests af ATmega328P's strømforbrug

Der er gennemført flere tests af ATmega328P's strømforbrug ved forskellige clock hastigheder, ved brug af ekstern og indre oscillator.

Udstyr

- ATmega328P
- 8MHz krystal (fra komponentlageret ukendt model)
- 16MHz krystal (fra komponentlageret ukendt model)
- To 22pF kapacitorer
- TTI EL302RT Triple Power Supply
- Agilent 34401A multimeter

Opsætning

- Opsætning af ATmega328P er sket, som beskrevet i bilag C.
- Sketchen, som kan ses i filen "powerDownWakePeriodic.ino" der findes i mappen "Test af ATmega328p strømforbrug", er uploadet via FTDI.
- Kredsløbsopsætningen kan ses på figur 39.



Figur 39: Diagram af opsætningen, når ATmega328P benytter en ekstern krystal.

Fremgangsmåde

Måling af DC strømforbruget foretages med multimeteret ved brug af henholdsvis 8MHz og 16MHz ekstern krystal, og for 8MHz indre oscillator.

Resultater

ATmega328P aktiv tilstand								
Forsynings-spænding	$1,\!8V$	2,7V	2,77V	$2,\!8V$	$3,\!3V$	5V		
Aktivt strømforbrug ved ek- stern 8MHz	-	Mikrocontrolleren tænder ikke	3,1mA	-	3,9mA	11,8mA		
Aktivt strømforbrug ved ek- stern 16MHz	-	Mikrocontrolleren tænder ikke	-	5,4mA	8,4mA	16,4mA		
Aktivt strømforbrug ved indre oscillator på 8MHz og presca- ler = 8 (1MHz)	0,45mA	$0,7\mathrm{mA}$	0,75mA	0,80mA	1,3mA	7,9mA		
Aktivt strømforbrug ved oscillator krystal på 8MHz	-	Mikrocontrolleren tænder ikke	2,9mA	2,9mA	3,7mA	12mA		

Tabel 23: Strømforbruget af ATmega328P-PU i aktiv tilstand

Usikkerheder og fejlkilder

Målinger med multimeteret Agilent 34401A i microampere-størrelserne er specielt usikre. Multimeterets måleegenskaber er defineret og garanteret fra 10mA og op for DC ifølge databladet.

ATmega328P i power-down tilstand							
Forsynings-spænding		1,8V	2,8V	3,3V	5V	5,5V	
	Idle	-	-	-	-	_	
Strømforbrug ved ekstern 8MHz	Power	_	0 2μ Δ	0 211 A	0 2 µ A	0.24 1	
	down		$0,2\mu$ M	$0,2\mu$ A	$0,2\mu$ A	$0,2\mu$ A	
	Idle	-	$1 \mathrm{mA}$	1,4mA	8,2mA	12mA	
Strømforbrug ved ekstern 16MH	Power	-	0,2 μ A	1,4mA	0,4 μ A	0,4 μ A	
	down						
	Idle	-	-	-	-	-	
Strømforbrug ved indre oscillate	Power	0,1 μ A	0,1 μ A	0,1 μ A	0,2 μ A	0,2 μ A	
	down						
	Idle	-	0,5mA	0,8mA	7,7mA	10,8mA	
Strømforbrug ved oscillator kry	Power	-	0.24 1	$0{,}2\mu$ A	$0{,}2\mu$ A	0.2 1	
	down		$0,2\mu$ A			$0,2\mu$ A	

Tabel 24: Strømforbruget af ATmega328P-PU i to forskellige low power tilstande.

E Proof of concept-test af første prototype

En proof of concept-test af første prototype er blevet gennemført. Formålet har været at undersøge hvorvidt det er er muligt at drive en ATmega328P fra to solpaneler og en superkapacitor under dårlige udendørs lysforhold, samt hvor længe det er muligt at drive mikrocontrolleren før at den slukker. I forsøget har superkapacitoren været ladet tæt på helt op. I forsøget vågner mikrocontrolleren der ønskes testet i hver 64.000.000 cycle. Alt efter clockfrekvens vil det være omtrent hvert ottende sekund. Mikrocontrolleren måler, ved brug af sin egen ADC, spændingen over superkapacitoren, og resultatet sendes via I2C til en uafhængig slaveenhed. Slaveenheden, en Arduino Nano, skriver resultatet til et SD kort. Slaveenheden har sin egen strømforsyning, som består af fire AA batterier.

Udstyr

- IP54 graderet kasse
- To solpaneler
- Lade- og afladningskredsløb

- ATmega328P ved 8MHz intern fabriskalibreret krystal
- Arduino Nano
- 5F 5,4V kapacitor opladet til 5,2V
- Fire Super Heavy Duty Zinc AA R6P 1.5V batterier af 1050mA samt en holder
- Spændingsregulator LM1117
- SD kort og SD kort-adapter
- Breadboards og ledninger til alle forbindelser

Opsætning

Kode for master og for slave er tilgængeligt i mappen 'Test af første prototype' i afleværingsmappen.



Figur 40: Et digram over hvordan de forskellige komponenter var forbundet under forsøget.



Figur 41: Opsætningen som den så ud under forsøget.



Figur 42: Kassen med opsætningen er placeret på en åben slette på en høj.

Fremgangsmåde

Enheden vågner med ca. 8,92 sekunders mellemrum, tager en måling af spændingen over superkapacitoren og sender denne til Arduino Nano'en via I2C forbindelsen.

Forventede resultater

Et overslag af det gennemsnitlige strømforbruget er udregnet. Med udgangspunkt i at ATmega328P er aktiv 1% af tiden, lade- og afladekredsløb, spændingsdeler og LM1117 er strømforbruget gennemsnitligt omkring 7,2mA. ATmega328P's strømforbrug tager ud-gangspunkt i tidligere målinger, se tabel 23 og 24, mens det ekstra strømforbrug af ADC og I2C kommunikation ikke medregnes i overslaget. Spændingsregulatoren LM1117 bidrager til den største del af det samlede strømforbrug ved konstant at bruge 5mA. Det forventes

at systemet kan fortsætte helt ned til omkring 2,9V, da spændingsfaldet over regulatoren altid vil være omkring 1,1V, samt tidligere målinger, se tabel 23, viser at ATmega328P kan drives ved en indgangsspænding på 1,8V. I så fald kan systemet køre i 23 minutter. I laboratoriet kunne systemet køre i 30 minutter, hvorefter superkapacitoren blev målt til 2,8V. Beregningerne er lavet ud fra Excel ark, som kan findes i afleveringsmappen i filen 'Test af første prototype/Beregning af capafladning ved proof of concept testforsøg'.

Resultater

Forsøget blev startet d. 10/10 kl. 14:07. Himlen er dækket af skyer med enkelte huller, og der er spredte byer med let støvregn.



Figur 43: Vejrudsigten fra d. 10/10 til d. 12/10 2019.

Det første data blev trukket ud d. 13/10 kl. 16:40. Filen med data kan ses i fil ??, og resultatet kan ses i figur 44. I grafen ses det tydeligt hvordan solenergi løbende tilføres systemet, således at ATmega328P er i stand til at køre i længere tid end de forventede cirka 30 minutter.



Figur 44: Den målte spænding af ATmega328P over superkapacitoren over tid. Sidste måling er efter 158 minutter. Den sidste målte spænding var 4,61V.

Det var ikke forventet, at systemet ville stoppe ved 4,61V, men tidligst ved 4,4V. Men dataloggeren kan have løbet tør for strøm, da dens forsyningsbatterier havde været brugt i en ukendt periode før forsøget. Batterierne blev skiftet, men der kom ikke energi nok fra solen til at ATmega328P startede med at sende data igen. Forsøget blev stoppet om eftermiddagen d. 14/10.

Usikkerheder og fejlkilder

Vejret har været omskifteligt. Under forsøget har der været alt fra en skyfri himmel til tung regn. Solen har generelt stået uhensigtsmæssigt lavt på himlen og dagene var omtrent 10,5 timer lange. Begge enheder delte jord, da der foregik I2C kommunikation mellem både mikrocontrolleren og slaveenheden. Praktiske forsøg i laboratoriet viste at mikrocontrollerens forsyningsspænding blev påvirket af slaveenhedens batteriforsyning. Forsøget fungerer derfor kun som som et proof of concept, og et nyt forsøg bør iværksættes, hvor de to enheder er fuldstændigt uafhængige.

Konklusion og diskussion af forsøgsresultaterne

Forsøget viser, at der er et klart potentiale for at drive et system fra solpaneler og en eller flere superkapacitorer. Men det viser også, at et konstant strømforbrug på bare nogle enkelte milliampere vil være ødelæggende for hele systemets evne til at holde sig kørende i selv korte perioder uden solenergi. Det er et absolut nødvendigt at udskifte den ineffektive spændingsregulator LM1117 med en effektiv regulator med et ultra lavt strømforbrug, da et konstant tab på 5mA er u
acceptabelt.

F Måling af samlet strømforbrug i forskellige stadier

En test hvor strømmen den samlede enhed trækker fra forsyningen, er udført. Denne havde til formål at undersøge hvorledes strømforbruget af enheden så ud i de forskellige stadier enheden kan befinde sig i under drift, disse værende; sleep mode, aktiv, aktiv og sender med LoRa og aktivt lyttende med LoRa.

Udstyr

- Et samlet mikrocontroller board uden extern krystal
- Et samle Mikrocontroller board med extern 16MHz krystal
- En ATmega1284p
- Et TTL-232R-3v3 FTDI kabel eller lignende til programmering af mikrocontroller
- Et Adafruit RFM95 LoRa modul
- Et 3V CR 2030 Lithium batteri
- En TTi EL302RT Triple Power Supply eller lignende
- Et Teledyne Lecroy HDO4024 200MHz High Definition Oscillocop
- En Telodyne Lecroy PP026 10:0 500MHz 10M Ω 10pF Oscilocop probe
- Et Agilent 34401A Digital Multimeter
- En 2 Ω metal film resistor målt til 1,846 Ω med Agilent 34401A 6 $\frac{1}{2}$ Digital Multimeter

Opsætning

Resistoren benyttes som shunt resistor og forbindes serielt med enheden mellem enheden og Ground. Proben fra oscilloskopet opsættes til at måle spændingen over denne modstand. Multimeteret er ligeledes forbundet serielt med hele denne opstilling i amperemeter funktion. Spændingskilden forsyner 5V på Indgangs benet på enheden. Kode der blev kørt på enheden er tilgængeligt i filen current_draw_test.ino i afleværingsmappen samt i github. MatLab kode der er benyttet til databehandling findes i filen Power_Test.m i afleværingsmappen.

Fremgangsmåde

mikrocontrolleren gennemgår alle de mulige stadier i således:

- 10 sekunder vågen ingen handling, LoRa modul slukket
- 10 sekunder i Sleep mode, LoRa modul slukket
- Fem beskeder afsendes;
 - Først ved 20dbm
 - Derefter ved 15dbm
 - Derefter ved 13dbm
 - Derefter ved 10dbm
 - Og endeligt ved 5dbm
- Enheden begynder nu at lytte efter beskeder på LoRa netværket

Data behandles i MatLab. Målinger tages med ATmega1284p indstillet til både intern 8MHz og ekstern 16MHz krystal.

Forventede resultater

Beregninger af enhedens strømforbrug i aktiv og i sleep mode er foretaget og ses i afsnit 4.4.9 i ligning (4.18) og (4.20). Det forventes at efter en kort databehandling, hvor resultaterne der måles i spænding over modstanden omregnes til strøm igennem modstanden ved Ohms lov, kan opstilles en graf der viser strømforbruget for enheden i de nævnte tilstande.

Resultater

På figur 45 og 46 er tydeligt at se hvornår mikrocontrolleren skifter fra aktiv til sleepmode og tilbage igen, det er samtidig tydeligt at se hvornår enheden sender de fem beskeder med LoRa modulet, dette er de fem spikes der ses efter omkring 22 sekunder med aftagende højde, dette matcher også den aftagende sendestyrke der benyttes hvilket ville afspejles i et mindre strømforbrug.



Figur 45: Her ses den indsamlede da fra osciloscopet ved 8MHz testen



Figur 46: Her ses den indsamlede da fra osciloscopet ved 16MHz testen

Figur 47 og 48 viser den behandlede data, behandlingen består som nævnt i at regne spændingen om til en strøm ved hjælp af ohms lov og den kendte resistor størrelse. Resultatet er desuden behandlet med et simpelt Moving Average filter der tager gennemsnittet af de seneste tolv målepunkter, dette giver en effekt af et simpelt lavpasfilter og mindsker en del af støjen. På denne figur er det endnu tydeligere at se de forskellige stadier.



Figur 47: Her ses den behandlede dat fra 8MHz testen



Figur 48: Her ses den behandlede dat fra 16MHz testen

Et Gennemsnittet er også beregnet for alle de forskelige stadier, disse ses i tabel 25.

	Aktiv	Sleep	Aktiv Lora rx	Tx 20 Db	Tx 15Db	Tx 13Db	Tx 10Db	Tx 5Db
8MHz	$4,1652 \mathrm{mA}$	43µA	$11,\!6476 mA$	100,8474 mA	$70,8385 \mathrm{mA}$	$61,1981 \mathrm{mA}$	50,9792 mA	$38,4652 \mathrm{mA}$
16MHz	$8,9090 \mathrm{mA}$	-	17,4784mA	$106,6242 \mathrm{mA}$	$79,5027 \mathrm{mA}$	$65,7048 \mathrm{mA}$	$50.4306 \mathrm{mA}$	$36.1834 \mathrm{mA}$
Beregnet	$4,78 \mathrm{mA}$	1,07µA	-	-	-	-	-	-

Tabel 25: En sammenligning af den gennemsnitlige strøm systemet trækker i de forskellige stadier samt beregnede værdiger for en mikrocontroller ved 8MHz indre krystal. Det skal her bemærkes at de beregnede værdiger fra afsnit4.4.9 tager højde for op og afladekredsløbet også. Dette element var ikke monteret under forsøget. Samtidig skal det noteres at de målte værdiger for enheden i sleep mode er foretaget med et Agilent 34401A multimeter. Dette skyldes at det ikke var muligt at måle strømmen for denne tilstand i det opstillede forsøg. Signalet var simpelthen for lavt sammenlignet med støjen.

Usikkerheder og fejlkilder

Der er meget støj på det målte signal, meget højfrekvent støj på det målte signal, meget af dette stammer formentlig fra både mikrocontrolleren samt den switchende spændingsregulator der er monteret på printet, en lille del af det mere lavfrekvente støj blev eftervist at stamme fra spændingskilden, da en måling blev foretaget med samme opstilling blot fra en batteripakke, hvor denne støj der fremgik som en ripple nu var fraværende. Usikkerheder kan også stamme fra den valgte shunt resistor, denne er valgt til en relativt stor værdi i forhold til normen, dette valg er truffet da den strøm der er forsøgt målt, er relativt lille. Usikkerhederne opstår da denne resistor ikke er af høj præcision, dette kan til en vis grad overkommes ved at måle den enkelte resistor efter og bruge den målte værdi til beregninger. Der er samtidig ikke taget højde for resistorens kapacitative og induktive egenskaber. Endnu en usikkerhed er det moving average filter der er benyttet, nogle af de bratte ændringer som når enheden begynder at sende vil blive en smule fordrejet med dette filter, det har dog ikke den store betydning da vi i dette forsøg er mere interresret i et overblik.

Konklusion og diskussion af forsøgsresultaterne

Resultaterne af dette forsøg giver et overblik over strømforbruget af enheden i forskellige driftstadier. Præcisionen af resultaterne er ikke den højeste og der vil være nogle afvigelser, Sammenlignet med det beregnede værdiger er der en stor forskel i de målte resultater og de beregnede, dette kan betyde enten at beregningerne er forkerte eller at målingerne er forkerte. Da gennemsnittet af enheden i sleep mode er 0 tegner det opstillingen ikke kan benyttes til måling af meget små strømme hvilket også kan være svaret på at de målte resultater ikke ligner de beregnede. Desuden er der i beregningerne regnet med at LoRa modulet har en belastnings switch hvilket den ikke har i virkeligheden hvilket også kan resultere i den store forskel

G Test af startup-tid fra sleep mode

Formålet med denne test har været at måle tiden det tager for microcontrolleren at opfange et interrupt og derefter vågne op og være klar til at udføre en ønsket funktion

Udstyr

- Et samlede mikrocontroller board uden extern krystal
- Et samlede Mikrocontroller board med extern 16MHz krystal
- En ATmega1284p
- Et TTL-232R-3v3 FTDI kabel eller lignende til programmering af mikrocontroller
- Et 3V CR 2030 Lithium batteri
- Et Teledyne Lecroy HDO4024 200MHz High Definition Oscillocop
- En Telodyne Lecroy PP026 10:0 500MHz 10M
 $10 \mathrm{pF}$ Oscilocop probe

Opsætning

Mikrocontrolleren programmeres med en simpel kode der findes i filen "current_draw_test.ino"der findes i mappen "EWB_Monitor_Nodes\test\Current_draw_test". Oscillocopet indstilles således at en probe måler spændingen på interrupt benet, og en anden probe måler spændingen på et valgfrit I/O ben på mikrocontrolleren. Oscillocopet indstilles til at trigger på den første probe når spændingen går lav, da dette er er det genererede interrupt. Enheden forsynes direkte fra FTDI kablet.

Fremgangsmåde

En simpel kode lægges på mikrocontrolleren, der indstiller RTC'en til at lave et interrupt efter en given tid, sætter en I/O pin høj, lægger mikrocontrolleren til at sove og først vågne ved et interrupt hvorefter I/O pinen trækkes lav når mikrocontrolleren igen er klar til at udfører handlinger. Koden kæres og resultater kan aflæses på oscillocopet. De målte resultater fra oscillocopet gemmes og fremgangsmåden gentages for mikrocontrollerboards med både intern 8MHz og ekstern 16MHz krystaller.

Resultater

De målte resultater er som følger; opstartstiden for et board med en indre 8MHz krystal blev målt til 0,878ms og for et board med ekstern 16MHz krystal blev opstartstiden målt til 2,323ms.

Usikkerheder og fejlkilder

Koden der blev brugt under dette forsøg benytter sig af RocketScream's Low Power bibliotek til arduino,[43] dette bibliotek kalder formentlig en lille smule kode i dét mikrocontrolleren vågner fra low power og inden den når til den kode der trækker I/O pinen lav. Dette kode kan indføre usikkerheder i målingerne da det tager en ukendt tid at kalde, da det dog er den samme kode for begge opstillinger burde dette være en en ubetydelig fejlkilde når de to resultater sammenlignes.

Konklusion og diskussion af forsøgsresultaterne

Når de to startup tider sammenlignes ses det at det for en mikrocontroller med en indre 8MHz oscillator er 1,445ms hurtigere at starte op end med en ekstern krystal. Det betyder at mikrocontrolleren er 2,65 gange så hurtig til at starte med den indre oscillator end med en ekstern krystal.

H Test af transmissionstider ved brug af Radiohead Mesh bibliotek

Transmissionstiderne for beskeder ved brug af Radiohead's Mesh bibliotek er blevet undersøgt gennem en test, som måler den reelle transmissionstid. Den reelle tid inkluderer TOA, som estimeres til at være det samme som den tid der reelt bruges på at transmittere af RFM96. Den reelle tid inkluderer også den tid hvor mikrocontrolleren faciliterer en transmission, samt venter på at få et acknowledgement på at data er modtaget af destinationen. Med andre ord er tiden som det tager at sende eller forwarde en besked blevet målt.

For beregningerne[34][40] af transmissiontiderne tages der udgangspunkt i et pakkeformat bestående af 8 symbol preamble, en eksplicit header af 4 octets (TO, FROM, ID, FLAGS) og op til 0 til 251 octets data. CRC benyttes og håndteres internt af RFM96 modulet.[58] Payload længde er 8-bit i alle tilfælde. Første besked er inklusiv en discovery message besked og tager derfor længere tid. Der er kun to nodes med samme konfigurationer i netværket, så det er det kortest mulige scenarie for en discovery message besked.

Tiden af første besked er testet mindst fire gange, og de almindelige beskeder er testet mindst 20 gange. De angivne resultater er intervallet mellem den laveste og højeste værdi, som der blev målt.

Formål

Forsøgets formål er at teste Radiohead Mesh transmissionstider for at få en forståelse for hvorvidt de er korte nok for lav-effekts enheder. Herudover ønskes tiderne for at kunne definere længden for et synkroniserings tidsvindue, og for at undersøge hvorvidt der er en tidsgevinst hos beskedtransmissioner ved at drive mikrocontrolleren ved 16MHz i stedet for 8MHz.

Udstyr

- Projektets ATmega1284P mikrocontroller-board opsat med ekstern 8MHz krystal
- Projektets ATmega1284P mikrocontroller-board opsat med ekstern 16MHz krystal
- En computer med Arduino's IDE

Pin	Indstilling
PC4	$Bw500Cr45Sf128 \pmod{\text{transmission hvert 15 sekund}}$
PC5	$\rm Bw125Cr45Sf128~(med~transmission~hvert~15~sekund)$
PC6	$Bw31_{25}Cr48Sf512 \pmod{\text{transmission hvert 30 sekund}}$
PC7	Bw125Cr48Sf4096 (med transmission hvert 60 sekund)

Tabel 26: De fire standardindstillinger for Radiohead kan sættes ved at sætte en pin fra PC4 til PC7 høj på projektets producerede enhed.

Opsætning

Opsæt mikrocontrollerne med koden fra filen

EWB_Monitor_Nodes/test/transmissiontime_tests/transmissiontime_tests.ino fra afleveringsmappen. Følg vejledningen i filen for at rette adresse og RFM95 konfigurationer.

Fremgangsmåde

- Sæt RFM95 konfigurationen på begge enheder ved at sætte en pin høj fra PC4 til PC7. Indstillingerne kan ses i tabel 26 De resterende tre pins bør sættes lave. Reset herefter begge enheder.
- Aflæs de løbende målinger i Arduino's monitor.

Resultater

Konfiguration og formål	Konfiguration	TOA [ms]	Brugt tid i alt [ms]
Bw500Cr45Sf128: Kort rækkevidde og hurtig beskedtransmission	Bandbredde = 500 kHz Code rate = 4/5 Spredningsfaktor = 128 chips/symbol	Besked: 9,0 Ack: 6,5 I alt: 15,5	8MHz: Første besked: 59-60 Almindelig besked: 24-27 16MHz: Første besked: 55 Almindelig besked: 23-24
Bw125Cr45Sf128: Mellem rækkevidde	Båndbredde = 125kHz Code rate = 4/5 Spredningsfaktor = 128 chips/symbol	Besked: 36,1 Ack: 25,9 I alt: 62,0	8MHz: Første besked: 207 Almindelig besked: 88 16MHz: Første besked: 204-205 Almindelig besked: 86
Bw31_25Cr48Sf512: Stor rækkevidde og langsom beskedtransmission	Båndbredde = 31,25kHz Code rate = 4/8 Sf = 512 chips/symbol	Besked: 593,9 Ack: 462,9 I alt: 1056,8	8MHz: Første besked: 3680 Almindelig besked: 1608 (nogle gange +5000ms) 16MHz: Første besked: 3677 Almindelig besked: 1605-1607
Bw125Cr48Sf4096: Stor rækkevidde og langsom	Båndbredde = 125kHz Cr = 4/8 Sf = 4096 chips/symbol	Besked: 1187,8 Ack: 663,6 I alt: 1851,4	8MHz: Første besked: 6584 Almindelig besked: 2697-2699 (ustabilt) 16MHz: Første besked: 29647-6580 Almindelig besked: 2696 (ustabilt)

Tabel 27: Transmissionstider ved forskellige konfigurationer af RFM95 styret fra henholdsvis en 8Mhz og en 16MHz mikrocontroller. Transmissioner med kort og mellem rækkevidde kan sendes langt hurtigere end transmissioner med stor rækkevidde.

Usikkerheder og fejlkilder

Eksterne krystaller er benyttet for at få præcise målinger. Der er i forsøget benyttet krystaller fra SDU's komponentlager, som har en ukendt usikkerhed. Der er et overhead i funktionaliteten ved at måle og gemme tiden, som kommer med i den resulterende transmissionstid.

Konklusion og diskussion af forsøgsresultaterne

De undersøgte transmissionstider viser, at der er enkelte millisekunders forskel ved at styre RFM95 fra en mikrocontroller drevet af en ekstern 16MHz krystal. Default konfigurationen var 2ms kortere for en almindelig besked og 2ms til 3ms kortere for første besked. Transmissionstiderne for standardkonfigurationerne med stor rækkevidde er minimum 3677ms for første besked og 1605ms for de efterfølgende beskeder. Konfigurationerne for stor rækkevidde giver transmissionstider, der vil være problematiske for enheder med en lav energikapacitet, da RFM95 er aktiv i lang tid sammenlignet med konfigurationer med mellem og kort rækkevidde.

Konfigurationen Bw125Cr48Sf4096 var ustabil, hvilket kan skyldes at første besked blev så lang, at den blev forstyrret undervejs.

XXVIII

I Samlet flowchart for udviklet software



Figur 49: Flowchart der beskriver Funktionen af koden. De farvede bokse indikere funktioner der kan implementeres, men som ingen funktion har for netværksdelen af enheden.