

ESP32-baserat larm – batteri och energioptimeringsstudie



Ali Kadem

Ali Chahrour

Division of Industrial Electrical Engineering and Automation
Faculty of Engineering, Lund University

ESP32-baserat larm - batteri och energioptimeringsstudie

Kandidatarbete



LUNDS
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

LTH vid Campus Helsingborg

Institutionen av Industriell Elektroteknik och Automation

Examensarbete:

Ali Kadem

Ali Chahrour

© Copyright Ali Kadem, Ali Chahrour

LTH at Campus Helsingborg

Lund University

Box 882

SE-251 08 Helsingborg

Sweden

LTH vid Campus Helsingborg

Lunds universitet

Box 882

251 08 Helsingborg

Printed in Sweden

Lunds universitet

Lund 2026

Sammanfattning

Köksbränder orsakas framförallt av mänskliga misstag vid matlagning. Traditionella brandvarnare fungerar reaktivt eftersom de aktiveras först när rök detekteras, vilket fördröjer tidiga insatser. Detta examensarbete undersöker utvecklingen av en batteridrivnen IoT-enhet för tidig branddetektion i köksmiljöer baserad på infraröd sensorteknik och digital signalbehandling. Arbetets primära fokus ligger på att optimera systemets energiförbrukning för att möjliggöra långsiktig autonom drift utan att kompromissa med en tillförlitlig realtidsövervakning.

En jämförande studie genomförs mellan mikrokontrollers inom ESP32-familjen, specifikt från tillverkaren XIAO. ESP32-C3, ESP32-C6 och ESP32-S3, med avseende på processorarkitektur, trådlösa kommunikationsprotokoll och implementering av energisparlägen. Metodiken omfattar utvärdering av utvecklingskort samt analytisk och empirisk mätning av exekveringstider under olika mjukvarukonfigurationer. På grund av hårdvarubegränsningar modellerades strömförbrukningen analytiskt utifrån komponenternas datablad snarare än att mätas empiriskt.

Resultaten visar att mönsterkortets specifika hårdvaruoptimering och perifera kretsdesign har en mer avgörande inverkan på strömförbrukningen i djupsömn än den underliggande processorarkitekturen i sig.

Det specifika utvecklingskortet XIAO ESP32-S3 uppvisade en lägre strömförbrukning i viloläge jämfört med XIAO ESP32-C3, trots att det underliggande RISC-V-chippet på C3-modellen teoretiskt är strömsnålast. Detta illustrerar att mönsterkortets specifika hårdvaruoptimering har en mer avgörande inverkan i praktiken. Genom att kombinera en strömsnål kortlayout med en stringent duty cycling-strategi presterar XIAO ESP32-C6 bäst totalt. Resultaten visar att en underhållsfri, autonom drifttid på mellan 25 dagar och drygt 3,8 år (upp till 1389 dagar), beroende på valt samplingsintervall, är teoretiskt möjlig på ett standardiserat 1500 mAh Li-Po-batteri. Värdena utgör en teoretisk övre gräns; den praktiska livslängden förväntas bli kortare.

Nyckelord

Sakernas internet (IoT), Branddetektion, ESP32, Energiförbrukning, Fast Fourier Transform (FFT), Infraröd sensorteknik, Deep Sleep, Duty Cycling.

Abstract

Residential kitchen fires represent a major safety challenge which is frequently caused by human error during cooking. Conventional fire alarms are reactive systems that trigger only when smoke reaches the sensors, by which time the fire is often established.

This thesis investigates the development of a proactive, battery powered IoT device capable of early fire detection through infrared sensing and signal processing. The system aims to distinguish actual flames from normal cooking patterns.

The primary focus of this research is the evaluation and optimization of power consumption to ensure long term autonomous operation while maintaining critical real-time monitoring focus.

A comparative study is conducted on three microcontrollers from the ESP32-family which include ESP32-C3, ESP32-C6 and ESP32-S3 made by XIAO. By analyzing differences in their processor architecture, wireless communication protocols and the implementation of power saving modes such as deep sleep could the most suitable platform be identified. The methodology includes the evaluation of microcontroller development boards and empirical measurement of execution times across various software configurations. Due to hardware constraints, the power consumption is analytically modeled based on component specifications rather than empirically measured.

The results indicate that the specific hardware layout and board-level optimization have a more critical impact on deep sleep currents than the underlying processor architecture itself. For instance, the specific development board XIAO ESP32-S3 exhibits a lower sleep current compared to the XIAO ESP32-C3, despite the underlying RISC-V chip on the C3 theoretically being more energy efficient. This illustrates the critical impact of the board's peripheral hardware design.

By combining a low-power board layout with strict duty cycling, the XIAO ESP32-C6 achieves the superior overall performance. The study indicates a theoretical maintenance-free operational time ranging from 25 days up to approximately 3.8 years on a standard 1500 mAh

Li-Po battery, depending on the chosen sampling interval. These figures represent a theoretical upper bound; the practical lifetime is expected to be shorter.

Keywords

Internet of Things (IoT), Fire Detection, ESP32, Power Consumption, Fast Fourier Transform (FFT), Infrared Sensing, Deep Sleep, Duty Cycling.

1. Introduktion	10
1.1 Syfte och Frågeställningar	10
1.2 Avgränsningar	11
1.3 Terminologi och förkortningar	11
1.4 Användningen av generativa AI-verktyg	12
1.5 Jävsdeklaration (Conflict of Interest)	12
2. Teori	13
2.1 Batteriteknik och Strömförsörjning	13
2.2 Klassificering och tekniska kategorier av batterier	13
2.3 Användningsområden av Batterier	17
2.4 Strömförbrukning och driftlägen i ESP32	20
2.5 Skyddskrets	21
2.6 Processarkitekturer och instruktionsuppsättningar (ISA)	23
2.7 Jämförelse med branschledande: Nordic Semiconductor nRF-serien	25
2.8 Thermopile:	27
2.9 IR-sensor:	28
2.10 Algoritmer och Mjukvaruarkitektur	29
2.11 Utvecklingsmiljö (IDE) och Ramverk	30
2.12 Fast Fourier Transform (FFT) för Flamdetektion	30
2.13 Konfigurering av Driftlägen (Active, Light Sleep, Deep Sleep)	31
2.14 Protokoll för IoT och Kommunikation	31
2.14.1 LoRa och Chirp Spread Spectrum (CSS)	32
2.14.2 LoRaWAN-arkitektur och Enhetsklasser	32
2.14.3 Adaptive Data Rate (ADR)	32
3. Metod	33
3.1 Batterival: IoT kontext	33
3.2 Validering av Li-Po och ESP32-arkitekturen	34
3.3 Teoretisk datainsamling (Strömförbrukning)	34
3.4 Analytisk och Empirisk datainsamling (Exekveringstid)	35
3.5 Definition av utvärderingsscenarier	37
3.6 Energimodellering och Analys	38
3.7 Teoretisk beräkning och optimering av batterilivslängd	39
3.8 Källkritik	41
4. Resultat	43
4.1 Exekveringstider och Arkitekturens påverkan	43
4.2 Teoretisk strömförbrukning per plattform	43
4.3 Batterilivslängd - Jämförande Scenarier	44
5. Diskussion	46
5.1 Metodkritik och Modellens tillförlitlighet	46
5.2 Val av Mikrokontroller (RISC-V vs Xtensa)	46
5.3 Schemaläggning, driftlägen och duty cycling-parametrar	47
5.4 Batterijämförelse och alternativa lösningar	49

6. Slutsats	51
7. Framtida utvecklingsmöjligheter	51
7.1 Sensorfusion och avancerad riskmodellering	52
7.2 Edge AI och maskininlärning (TinyML)	52
7.3 Hårdvaruoptimering via Ultra-Low-Power (ULP)	52
8. Reflektion över etiska aspekter	53
8.1 Personlig integritet och dataövervakning i hemmet	53
8.2 Datasäkerhet och kryptering vid trådlös överföring	53
8.3 Systemtillförlitlighet och risken för falsk trygghet	53
9. Referenser	54
10. Appendix	58
Bilaga A:	58

1. Introduktion

Traditionella kommersiella brandvarnare är i grunden reaktiva system som främst aktiveras när dess sensor har detekterat rök. Köket är den plats i hemmet som utgör den största risken för brand, där spisen identifieras som den enskilt vanligaste startpunkten [1].

Detta skapar ett behov av ett mer proaktivt system som kan identifiera risken i ett tidigt skede. Utvecklingen inom Internet of Things (IoT) och inbyggda system har möjliggjort intelligenta övervakningssystem med kontinuerlig datainsamling och realtidsbehandling. Genom en kombination av signalbehandling och sensorteknik kan sådana system potentiellt urskilja normala mönster vid matlagning från avvikande beteende, vilket indikerar brandrisk. Projektet bygger vidare på ett tidigare utvecklat IR-baserat flamdetektionssystem där Fast Fourier Transform (FFT)-analys användes för att reducera påverkan från externa störningskällor, exempelvis solljus. I denna studie är fokus framför allt på att utveckla en batteridrivnen IoT-enhet med en låg energiförbrukning samt analysera hur olika mikrokontrollers inom ESP32-familjen påverkar systemets drifttid och prestanda.

1.1 Syfte och Frågeställningar

Syftet med detta examensarbete är att undersöka hur valet av mikrokontroller inom ESP32-familjen påverkar energiförbrukning, prestanda och tillförlitlighet i ett batteridrivnet IoT-system inom kontexten köksbrandsäkerhet. Arbetet syftar vidare till att identifiera hur olika hårdvaru- och mjukvarukonfigurationer kan optimeras för att möjliggöra en lång drifttid utan att kompromissa med systemets förmåga att kontinuerligt övervaka och bearbeta data i realtid.

Syftet kan delas in i följande frågeställningar:

- i. Vilka prestandamässiga skillnader uppvisar arkitekturerna ESP32-C3, C6 och S3 vid exekvering av beräkningsintensiva algoritmer för flamdetektion i en batteridrivnen kontext?
- ii. Hur påverkar mjukvarans schemaläggning (duty cycling) och systemets driftlägen den totala energiförbrukningen när ett fast energieffektivt kommunikationsprotokoll (LoRaWAN) tillämpas?

iii. Hur påverkar val av parametrar såsom samplingsfrekvens och beräkningsbelastning systemets energianvändning?

1.2 Avgränsningar

Detta examensarbete omfattar inte en fullständig implementation och verifiering av ett komplett brandskyddssystem utan fokuserar primärt på den inbyggda hårdvaran och dess energirelaterade egenskaper. Följande avgränsningar har därför gjorts:

- Inga praktiska tester med verklig brand eller öppen låga kommer att genomföras
- Arbetet begränsas till ett urval av mikrokontrollers inom ESP32-familjen, specifikt ESP32-C3, ESP32-C6 och ESP32-S3
- Fokus ligger på energiförbrukning, drift och optimering snarare än utveckling av avancerade flamdetektionsalgoritmer

1.3 Terminologi och förkortningar

- **IoT (Internet of Things):** Sakernas internet; nätverk av fysiska enheter försedda med elektronik och internetuppkoppling.
- **SoC (System-on-Chip):** Systemkrets; ett integrerat chip som innehåller processor, minne och radiomoduler.
- **FFT (Fast Fourier Transform):** Snabb fouriertransform; en algoritm för att omvandla en signal från tidsdomän till frekvensdomän.
- **DoD (Depth of Discharge):** Urladdningsdjup; den andel av ett batteris totala kapacitet som utnyttjas innan återladdning.
- **LDO (Low Dropout Regulator):** Linjär spänningsregulator med låg spänningsförlust.
- **ULP (Ultra-Low-Power Co-processor):** En strömsnål hjälpprocessor i ESP32 som kan köras under djupsömn.
- **RTC (Real-Time Clock):** Realtidsklocka; en krets som bibehåller tidsräkning även när huvudprocessorn är avstängd.
- **TWT (Target Wake Time):** En strömsparfunktion i Wi-Fi 6 (802.11ax) för schemalagd nätverkskommunikation.
- **ADR (Adaptive Data Rate):** En mekanism i LoRaWAN som dynamiskt optimerar sändareffekt och datahastighet.

1.4 Användningen av generativa AI-verktyg

I arbetet med detta examensarbete har generativa AI-verktyg (specifikt Gemini) tillämpats som ett komplementärt stöd under valda delar av processen. Verktögen har primärt använts för språklig strukturering, textputsning, korrekturläsning samt för att transformera råtext till en formell, akademisk ton i enlighet med gällande rapportmallar.

Mjukvarumässigt har generella språkmodeller även använts som ett interaktivt bollplank för att assistera vid tolkning av externa mjukvarubibliotek (såsom frekvensanalysbibliotek) samt ge förslag på syntax vid felsökning (debugging) av kodblock.

Det understryks att inga faktiska forskningsresultat, empiriska exekveringstider, teoretiska energimodelleringar eller vetenskapliga slutsatser har genererats av externa AI-verktyg.

Alla mätdata, jämförande scenarier och kritiska analyser har i sin helhet framställts, härletts och utvärderats av examensarbetets författare. Användningen bedöms därmed strikt uppfylla Lunds universitets och LTH:s policy för akademisk hederlighet gällande självständigt arbete.

1.5 Jävsdeklaration (Conflict of Interest)

Författarna av detta examensarbete har under projektets gång arbetat med att ta fram en tidig prototyp av ett brandlarm med syfte att utvärdera kommersialisering via en startup. En demonstration av tekniken har även kommunicerats offentligt via plattformen LinkedIn. Författarna klargör härmed att denna koppling inte på något sätt har påverkat resultatet, metodiken eller den objektiva analysen av data i denna studie. Syftet med examensarbetet har uteslutande varit att oberoende och vetenskapligt utvärdera energiförbrukning och mikrokontrollerarkitektur.

2. Teori

Detta kapitel redogör för den teoretiska referensram som ligger till grund för examensarbetets experimentella och analytiska delar. Inledningsvis behandlas batteriteknik, kemiska egenskaper och kritiska säkerhetsaspekter för inbyggda system i krävande miljöer. Vidare presenteras en djupgående genomgång av mikrokontrollerarkitekturer inom ESP32-familjen, signalbehandling via Fast Fourier Transform (FFT) för flamdetektion, samt trådlösa IoT-protokoll med fokus på LoRaWAN.

2.1 Batteriteknik och Strömförsörjning

Sakernas internet (Internet of Things, IoT) och inbyggda systems utveckling har medfört ett skifte i hur intelligenta sensornoder och beräkningsenheter strömförsörjs. System blir alltmer portabla, trådlösa och distribuerade, därmed ökar beroendet för tillförlitlig och portabel energilagring. Batteritekniken utgör fundamentet för systemets autonomi, tillförlitlighet och livslängd, vilket i sin tur dikterar hur ofta underhåll krävs och hur robust systemet är vid nätbortfall eller i isolerade miljöer. De varierande och tidvis extrema förhållandena i applikationsmiljön ställer särskilda krav på batteriets förmåga att leverera tillräcklig effekt för både databehandling och trådlös kommunikation. Stabilitet under snabba temperaturfluktuationer och luftfuktighetsförändringar, vilket karaktäriserar en typisk köksmiljö, är nödvändigt för att säkerställa en tillförlitlig strömförsörjning utan att applikationens prestanda påverkas negativt. Detta kapitel redogör för den underliggande teorin kring moderna batterityper, kritiska säkerhetsmekanismer, tillämpningsområden samt specifika dimensioneringskrav i IoT-kontexter baserade på ESP32-arkitekturen för att garantera en riskfri drift.

2.2 Klassificering och tekniska kategorier av batterier

Batterier är elektrokemiska celler som lagrar energi i kemisk form och omvandlar denna till elektrisk energi genom kontrollerade redoxreaktioner mellan en anod (negativ pol), en katod (positiv pol) och en elektrolyt [2]. Kemin som ligger till grunden har enorm påverkan på systemets energidensitet, den förväntade livslängden, den inre resistansen och batteriets allmänna säkerhetsprofil [3].

Batterier kan klassificeras i två huvudkategorier ur ett tekniskt samt akademiskt perspektiv. Förmågan till återanvändning utgör att det finns två kategorier av batterier; primärbatterier

och sekundärbatterier. Skillnaden är att primärbatterier är icke-laddningsbara medan sekundärbatterier är laddningsbara [4].

Primärbatterier är designade för engångsbruk och kännetecknas generellt av en mycket låg inre självurladdning. Exceptionellt lång hylltid gör dem särskilt lämpliga för applikationer med minimala underhålls krav under flera års period, förutsatt att strömuttaget är mycket litet.

En av de äldsta tillgängliga teknologierna är zink-kol batteriet. Denna batterityp uppvisar den lägsta energidensiteten och den kortaste livslängden i jämförelse med övriga tekniker, men medför i gengäld den lägsta tillverkningskostnaden [5]. En mer modern utveckling utgörs av alkaliska batterier (zink-mangandioxid, Zn-MnO_2). Dessa är kostnadseffektiva att producera och erbjuder en betydligt mer stabil spänningsnivå under urladdning. En nackdel är att de har hög inre resistans, vilket innebär att spänningen faller snabbt vid tung strömbelastning. [3] En annan variant är zink-luftbatterier, vilket är känt för deras höga energidensitet. Tekniken utnyttjar syret från den omgivande luften som reaktant vid katoden, vilket frigör internt utrymme för anodmaterial. Ett användningsområde för denna typ är hörapparater, men nackdelen är att de aktiveras permanent vid exponering med luft. Bekymret blir en skarp nedgång i kapacitet oavsett användning. För krävande applikationer finns en annan variant, litiumbatterier (exempelvis litium-tionylklorid, Li-SOCl_2). [3] Dessa har den absolut högsta energidensiteten bland primärcellerna, en extremt lång hylltid på upp till tjugo år och förmågan att operera i mycket svåra temperaturer, men de är samtidigt förenade med höga tillverkningskostnader. [5]

För att strukturera valet av batteriteknik presenteras egenskaperna uppdelat utifrån dessa två huvudkategorier. Tabell 1 redogör uteslutande för de vanligaste *primärbatterierna* (engångsbatterier). Inom denna kategori utgör litium-tionylklorid (Li-SOCl_2) ett av de mest potenta alternativen för industriell IoT tack vare sin extrema livslängd och låga självurladdning, även om cellen inte är uppladdningsbar. Den uppladdningsbara litium-polymer-tekniken (Li-Po), som tillämpas i detta arbetes slutgiltiga hårdvarudesign, tillhör däremot kategorin *sekundärbatterier* och utvärderas därför separat i Tabell 2.

Tabell 1 illustrerar de huvudsakliga egenskaperna hos primärbatterier och belyser hur deras parametrar dikterar deras användningsområden

Batterityp (Primär)	Kostnad (ca per cell)	Energidensitet (Wh/kg)	Självladdning / Hylltid	Utmärkande egenskaper och användningsområden
Zink-Kol	< 5 kr	~36 Wh/kg	3–5 år	Den billigaste teknologin
Alkaliskt (Zn-MnO ₂)	5–15 kr	85–190 Wh/kg	5–10 år	Lättillgängliga och prisvärda.
Silveroxid	15–30 kr	~130 Wh/kg	~5 år	Används ofta i medicinsk utrustning.
Zink-luft	10–20 kr	~470 Wh/kg	< 1 månad (efter aktivering)	Lämplig för kontinuerligt låg strömdrift.
Litium (ex. Li-SOCl ₂)	50–150 kr	400–700 Wh/kg	10–20 år (< 1 % / år)	Exceptionell livslängd och brett temperaturfönster

Sekundärbatterier utgör en central komponent i moderna IoT-system, i synnerhet för applikationer där kontinuerlig drift, frekvent dataöverföring och möjligheten till ompladdning via externa källor eller energiskördning är absoluta krav [3]. Denna kategori av uppladdningsbara batterier rymmer en rad olika kemiska sammansättningar som kontinuerligt har förfinats under de senaste decennierna. Den äldsta formen är bly-syrabatteriet, uppfunnet redan 1859. Dessa batterier är mekaniskt och kemiskt robusta och mycket billiga per lagrad wattimme, men deras låga energidensitet (omkring 40 Wh/kg) och stora volym gör dem helt olämpliga för små inbyggda system, även om de fortfarande är dominant som backup-kraft inom tung industri och i förbränningsmotorfordon [3].

Den bärbara marknaden under de sena 1900 talet dominerades av Nickel-Kadmium batterier (NiCd), men batteriet hade två bekymmer som ledde till att den ersattes successivt av nickel-metallhydrid-batterier (NiMH). NiCd batterier har hög toxicitet samt de förlorar kapacitet om de inte laddas ur fullständigt gjorde transitionen till NiMH batterier värd att göra. NiMH erbjuder en högre energidensitet och är mer miljövänliga, men en lägre effektivitet och dragkänslighet för hög självladdning jämfört med moderna alternativ begränsar dess användning till hybridfordon och enkla apparater [3].

Modernare teknik är en följd av ett stort genombrott av kommersialiseringen av litiumjonbatteriet (Li-ion). I battericellerna transporteras litiumjoner fram och tillbaka mellan en anod och en katod av en övergångsmetalloxid genom en flytande, organisk elektrolyt. [6] Li-ion-batterier kan delas in i flera underkategorier baserat på vilket exakt katodmaterial som används. Litiumkobaltoxid (LCO) används ofta i mobiltelefoner, eller litium-nickel-mangan-kobaltoxid (NMC) som är vanligt i elfordon [3]. Li-ion-teknikens egenskaper av hög nominell spänning, låg självurladdning, och imponerande energidensitet revolutionerade marknaden [5]. Litiumtekniken har en utmärkt specifik underkategori, litium-polymer-batteriet (Li-Po). Den traditionella flytande elektrolyten har ersatts av en fast eller gel-liknande polymerelektrolyt i Li-Po-batteriet [8]. Denna arkitektoniska skillnad möjliggör att batteriet kan förpackas i tunna, laminerade aluminiumpåsar, så kallade "pouch cells" [3].

Resultatet är ett batteri som kan utformas i nästan vilken formfaktor som helst, och erbjuder ungefär 1,5 högre energidensitet per volymenhet än konventionella Li-ion-cylindrar av motsvarande volym [7]. Den inre strukturen medger urladdning med extremt höga pulsströmmar (känd som C-rating), vilket är väldigt tillämpligt i nätverkstillämpningar. Nackdelen är att de är mekaniskt känsliga och kräver mycket rigorös elektronisk övervakning [3].

Utöver Li-Po finns även litiumjärnfosfat (LiFePO_4 eller LFP). I katoden byter man kobolt mot järnfosfat, vilket resulterar i en kemi som är anmärkningsvärt termisk stabil och säker mot termisk rusning [3]. Minimal degradering sker efter tusentals laddcykler. Kompromissen är att LiFePO_4 har en lägre nominell spänning (3.2V jämfört med 3.7V av LCO) och lägre energidensitet, vilket gör att de tar upp mer plats än ett Li-Po-batteri för samma kapacitet, varför de främst används i större energilagringssystem och industriella sensornoder [8]. Akademisk och industriell forskning kring fastfas batterier (Solid-State Batteries) pågår där även separatorn och elektrolyten består av fasta material för att helt eliminera brandrisken [3].

Tabell 2 jämför de viktigaste sekundära batterierna för att ge en tydlig bild av teknologiernas respektive styrkor i relation till prestanda.

Batterityp (Sekundär)	Nominell Spänning	Formfaktor	Energidensitet (Wh/kg)	Typiska användningsområden och nackdelar
Bly-syra	2,0 V (per cell)	Styva block	30–50 Wh/kg	Används för fordon och tung backup. Omfattande miljöpåverkan och extremt tunga.
NiMH	1,2 V	Cylindrisk	60–120 Wh/kg	Mindre minneseffekt än NiCd. Tål missbruk bättre än litium, men har högre självurladdning (~20 % / månad).
Li-Ion (ex. NMC/LCO)	3,6 V – 3,7 V	Cylindrisk / Prismatisk	150–250 Wh/kg	Standard för konsumentelektronik. Kräver skyddskrets. Känslig för extrem värme.
Li-Po	3,7 V	Pouch cell (påse)	130–200 Wh/kg	Extremt tunna och lätta. Levererar hög ström för t.ex. radiokommunikation. Mekaniskt känsliga.
LiFePO ₄ (LFP)	3,2 V	Cylindrisk / Prismatisk	90–160 Wh/kg	Hög säkerhet och lång livslängd (tusentals cykler). Lägre spänning och något lägre energidensitet.

2.3 Användningsområden av Batterier

Vilket batteri som tillämpas baseras primärt på den specifika applikationens strömprofil, systemets formfaktors krav och de rådande miljöfaktorerna. Integrationen av ett batteri i en tillämpning dikteras i stort sett inte bara av dess kapacitet i milliamperetimmar (mAh), utan i lika hög grad av dess urladdningskaraktäristik, termiska känslighet, och inre resistans. I en IoT miljö fungerar sällan batteriet under en jämn och konstant belastning. Tvärtom måste batteriet hantera en miljö där lasten varierar drastiskt och oregelbundet, från mikroskopisk vilostrom under långa perioder till plötsliga, mycket höga pulser när enheten bearbetar data eller aktiverar sin radiomodul för överföring [7].

Smarta hem-system tillämpar vanligtvis en strikt hantering av enhetens arbetscykel, ett koncept som ofta benämns med den engelska termen duty cycling. Strategin bygger på att enheten tillbringar merparten av sin tid i ett djupt viloläge, där huvudprocessorn och all

icke-kritisk kringutrustning är fullständigt inaktiverad. Realtidsklockan (RTC) eller en strömsnål ultralåg effektprocessor (ULP) är aktiv för att övervaka miljön [9]. Mikrokontrollern väcks till full aktivitet så snart ett fördefinierat villkor uppfylls. I kontexten av ett köksbrandlarm kan detta exempelvis innebära att den infraröda sensorn (MLX90614) registrerar en avvikande temperaturgradient, eller att en intern timer för en nätverkshandskakning löper ut. Under denna korta aktiva fas samlar mikrokontrollern in sensordata, kör eventuella algoritmer och aktiverar den trådlösa radion (såsom Wi-Fi, Bluetooth eller LoRa) för att skicka varningar eller statusuppdateringar [10].

Plötslig aktivering av radiosändaren drar ofta mycket stora mängder ström, ibland överstigande hundratala milliampere, under bråkdelen av en sekund. Höga krav ställs på batteriets inre resistans. [11] Ett fenomen som heter voltage sag sker när en stor ström dras från ett batteri, då ett ofrånkomligt spänningsfall över batteriets inre resistans uppstår. Äldre alkaliska batterier, degraderade celler, eller celler som används i låga temperaturer kan ha för hög inre resistans vilket leder till ett spänningsfall så djupt att mikrokontrollern ofrivilligt startar om sig själv. Detta beror på att spänningen tillfälligt hamnar under mikrokontrollers tröskelvärde för funktion och benämns "brown-out reset", trots att batteriet rent kemiskt fortfarande innehåller en stor mängd lagrad energi [19]. Inom detta området erbjuder Li-Po-batterier en fundamental teknisk fördel; deras inre kemiska struktur och stora ytarea på elektroderna resulterar i en mycket låg inre resistans, vilket tillåter snabb urladdning med minimalt spänningsfall och därmed garanterar stabil systemdrift under kommunikationstoppar [12].

Driftmiljö är ett av de mest kritiska aspekterna för hur batteriet kan användas, vilket är av synnerlig vikt när elektroniken implementeras i en köksmiljö. Kök karakteriseras av frekventa och ibland extrema fluktuationer i en köksmiljö i både temperatur och luftfuktighet till följd av kokning, ugnsvärme, och matlagning [13]. Temperaturnivåer har en fundamental och exponentiell inverkan på både batteriets momentana prestanda och dess långsiktiga kemiska degradering. Batterikemins kinetik och temperaturberoende beteende beskrivs till stor del av Arrhenius ekvation, som postulerar att reaktionshastigheten ökar markant med stigande temperatur [13]. För litiumbaserade batterier ligger den optimala drifttemperaturen i en IoT-kontext i genomsnitt mellan 15 °C och 35 °C [14].

Li-Po-batterier och litiumjonbatterier kan få accelererade oönskade parasitiska reaktioner inuti cellen ifall de utsätts för höga temperaturer i synnerhet om temperaturen överstiger 45° C. I hög värme tenderar även passiveringsskiktet, även känt som SEI-skiktet (Solid Electrolyte Interphase), som normalt skyddar anoden växa och tjockna okontrollerat. Detta i sin tur förbrukar aktivt litium och elektrolyt [13]. Konsekvensen är en ond cirkel: det förtjockade skiktet ökar batteriets inre resistans, vilket leder till att batteriet genererar mer intern värme när de belastas, vilket i sin tur påskyndar ytterligare nedbrytning [15]. Värmen kan även över tid tillägga strukturella skador på själva polymerelektrolyten vilket leder till permanent kapacitetsförlust och i extrema fall, att gas bildas inuti höljet så att batteriet fysiskt sväller (“puffer upp”) [13].

Kyla medför andra men lika allvarliga problem. Vid låga temperaturer saktar jonernas rörelseförmåga (diffusionshastigheten) dramatiskt, i samband med att elektrolytens viskositet ökar avsevärt. En hög inre resistans skapas som kraft begränsar batteriets förmåga att leverera ström [13]. Om en enhet kräver en hög strömpuls i kyla kommer spänningen att dyka snabbt. Vidare, om ett litiumbatteri laddas vid låga temperaturer, riskerar man så kallad litium plätering där litiumjonerna inte hinner interkalera i grafitanoden utan istället avlagras som metalliskt litium på anodens yta. Denna process degraderar batterikapaciteten permanent samtidigt som interna kortslutningar skapas (dendriter) [14]. Ett tillförlitligt batterisystem måste vara designat för att hantera den termiska gradienten som uppstår under en byggnads hela livscykel.

Hög luftfuktighet är även en riskfaktor när batterier används. Kökets fuktiga miljö bidrar till påskyndad oxidation samt galvanisk korrosion på batteriterminaler, anslutningskontakter och kretskortets lödningspunkter [14]. Korrosion introducerar elektriskt motstånd i anslutningarna vilket sänker den effektiva spänningen som når mikrokontrollern och tvingar batterier att arbeta hårdare. Den totala systemeffektiviteten påverkas och sänks [14]. Däremot kan låg luftfuktighet öka risken för elektrostatiska urladdningar som kan skada känslig skyddselektronik [16]. En enhet som arbetar som en brandsensor, ifall de placeras i taket ovanför en spis, kommer de bli utsatta för både koncentrerad värme och fuktig vattenånga. I detta kontext måste Li-Po batterier därför användas i kombination med noggrann fysisk kapslingdesign, fuktisolerande barriärer och avancerad termisk övervakning i mjukvara.

Säkerhetsaspekten är således central i hur batterierna används. Batteriet är en behållare med tätpackad, potentiellt reaktiv energi. En farlig kedjereaktion kan ta plats vid eventuell missbruk vare sig det rör sig om mekanisk skada från stötar under installation, termisk missbruk från omgivningen eller elektriskt missbruk i form av felaktiga laddningsspänningar [17]. Ett systemperspektiv måste därmed anläggas vid utformningen av en applikation, där batteriet anses som ett aktiv, dynamisk och potentiellt ömtålig komponent som styr hela produktens utformning. Ett integrerat samspel mellan batterikemi, skyddshårdvara och applikationsspecifik mjukvara är viktigt för ett säkert system [17].

2.4 Strömförbrukning och driftlägen i ESP32

Ett 1500mAh batteri är dock kvantitativt litet jämfört med exempelvis moderna mobiltelefonbatterier, och eftersom ett kontinuerligt aktivt ESP32-system kan konsumera över 100 mA i genomsnitt, skulle batteriet tömmas fullständigt på under ett dygn om processorn var vaken hela tiden ($1500 \text{ mAh} / 100 \text{ mA} = 15 \text{ h}$). För att tillåta att systemet fungerar under en längre period, kräver programmeraren djupgående förståelse och kontroll över ESP32:ans strömsparfunktioner.

ESP32-arkitekturen är uppbyggd med flexibilitet i åtanke och stöder flera olika driftlägen som drastiskt förändrar mikrokontrollerns energiprofil. Genom strategiska byten mellan dessa effektlägen kan systemets genomsnittliga strömförbrukning minskas dramatiskt.

I Tabell 3 sammanställs egenskaper och strömförbrukning för de olika driftlägena.

Tabell 3. Analys av ESP32:ans effektlägen och deras strömförbrukning.

Driftläge för ESP32	Aktiva Subsystem	Typisk Strömförbrukning	Beskrivning och användningsfall
Active Mode	CPU, RAM, RF (Wi-Fi/BT), Kringutrustning	95 mA – 240 mA	Hela chippet är strömsatt. Används vid komplex databehandling (ex. FFT-analys av sensordata) [7].
Modem-sleep	CPU, RAM	20 mA – 68 mA	Huvudprocessen är igång och kör kod, men de energikrävande radiomodulerna är helt inaktiverade. Användbart vid ren kalkylering [7].
Light-sleep	ULP aktiv, RTC-minne	~0.8 mA	CPU-klockan är pausad. Det interna RAM-minnet bibehåller sitt tillstånd. Chippet kan vakna upp på mikrosekunder och återuppta körning direkt [10].
Deep-sleep	Endast ULP och RTC	10 μ A – 150 μ A	Huvudprocessorn avstängd och huvudminnet raderas. En ultralåg effektprocessor (ULP) och realtidsklockan övervakar specifika pins/sensorer. Vid väckning utförs en mjuk omstart [19].

För ett smart brandlarm måste systemets arkitektur ofrånkomligen vila på *Deep Sleep*-läget. Systemet förblir i dvala och drar en bråkdel av en milliampere, för att därefter väckas av en timer eller ett externt avbrott (interrupt) från en sensor

2.5 Skyddskrets

Den tekniska utmaningen med Li-Po celler är kompromisserna gällande mekanisk robusthet och kemisk volatilitet [20]. En Li-Po-cell uppnår sin smidiga och tunna “pouch”-struktur genom att använda aluminiumfolie för inkapsling, vilket innebär att den saknar det hårda stålhöljet som återfinns hos traditionella cylindriska litiumjonbatterier (exempelvis 18650-cellen) [20].

Om en cell av denna typ drivs utanför sitt hårt definierade operationella och termiska fönster eller skadas mekaniskt, blir konsekvenserna omedelbara, destruktiva och direkt farliga för slutanvändaren [18].

Ifall ett Li-Po-batteri missbrukas kan en serie reaktioner av nedbrytningar ske. Överladdning kan frigöra syre från katodstrukturen och koka elektrolyten, vilket snabbt ökar trycket. Å andra sidan, en urladdning för djupt kan istället leda till att koppar från anoden löses upp i elektrolyten och bildar kortslutande bryggor (dendriter) inuti cellen när batteriet väl laddas igen. [21]. Båda fall genererar enorm intern värmeutveckling. Värmen i sin tur ökar

reaktionshastigheten, och därmed kan cellen hamna i en självförstärkande loop känd som termisk rusning (“thermal runaway”) [21]. I ett sådant tillstånd bryts cellens material ned exotermt, varpå cellen sväller, spricker, avger giftiga gaser, och slutligen självantänder i en våldsam och svårsläckt brand [19].

Inom elektronikindustrin och vid utveckling av inbyggda system ställs rigorösa krav på att all tillämpning av litium-polymer-teknologi måste inkludera dedikerad säkerhetselektronik [15]. Dessa krav är förankrade i internationella säkerhetsstandarder, såsom IEC 62133 för bärbar elektronik och UN 38.3 för säker transport, vilka stipulerar att cellerna måste skyddas elektroniskt mot överladdning, djupurladdning och kortslutning. Detta realiseras vanligen antingen direkt på cellen via en fysisk skyddskrets (PCM, Protection Circuit Module) eller systemövergripande via ett batterihanteringssystem (BMS, Battery Management System) [15]. Efterlevnad av dessa regulatoriska krav är fundamentalt för att helt mitigera risken för termisk rusning och därmed kunna certifiera säkra konsumentprodukter [15].

Mikrokontroller för IoT-applikationer:

Utvecklingen av IoT-system har medfört en övergång från traditionella mikrokontroller enheter (MCU) till mer integrerande System-on-Chip lösningar (SoC). Ett SoC integrerar processor, minne, analoga gränssnitt och trådlös kommunikation såsom Wi-Fi och Bluetooth Low Energy (BLE) på samma mikrochip. Denna integration reducerar systemets fysiska storlek, minskar effektförluster och förenklar den elektriska konstruktionen. För batteridrivna IoT-enheter är denna typ av integration betydelsefull eftersom både energiförbrukning och kommunikationsförmåga påverkar systemets livslängd och funktion.

Mikrokontroller i brandrelaterade IoT-system måste samtidigt hantera signalbehandling och låg energiförbrukning. Sensorbaserade flamdetektion kräver kontinuerlig analys av insignaler för att skilja verkliga brandförlopp från exempelvis bakgrundsljus och termiska störningar. Sådan analys innefattar beräkningsintensiva algoritmer som Fast Fourier Transform (FFT), vilket ställer krav på processorns beräkningskapacitet och instruktionsuppsättning. Samtidigt kräver batteridrivna drift att mikrokontrollern kan växla mellan aktivt läge och energisnåla vilolägen utan att förlora förmågan att reagera på inkommande sensor händelser.

Inom Espressif Systems ESP32-familj finns flera mikrokontroller anpassade för olika IoT-tillämpningar. ESP32-S3 är baserad på en dual-core Xtensa LX7 arkitektur med stöd för vektorinstruktioner som kan förbättra prestanda vid digital signalbehandling [22].

ESP32-C3 och ESP32-C6 är istället baserade på RISC-V arkitektur, dessutom innehåller ESP32-C6 stöd för Wi-Fi-6 samt funktionen Target Wake Time (TWT). Detta resulterar i en reducerad energiförbrukning vid periodisk nätverkskommunikation [23]. Som jämförelse används Nordic Semiconductors nRF-serie, som är konstruerad för ultralåga effektsystem och är vanligt förekommande i batteridrivna Bluetooth Low Energy applikationer.

2.6 Processarkitekturer och instruktionsuppsättningar (ISA)

Xtensa LX7 är en 32-bitars processorarkitektur som är designad med inbyggt stöd för avancerad digital signalbehandling (DSP) och vektorinstruktioner [22]. Detta ger arkitekturen kapacitet att utföra SIMD-operationer (Single Instruction, Multiple Data), vilket innebär att processorn kan applicera en och samma matematiska instruktion på flera datapunkter exakt samtidigt [22]. I kontexten av kontinuerlig sensorövervakning möjliggör denna parallella exekvering en avsevärt snabbare bearbetning av de upprepade matrisberäkningar som krävs vid en Fourier transform (FFT) [25]. Detta blir fördelaktigt för algoritmer som innehåller upprepade multiplikations- och ackumuleringssteg, exempelvis vid Fast Fourier Transform(FFT). Detta reducerar antalet klockcykler som krävs per beräkning jämfört med en traditionell skalär processor. Med en förbättrad exekveringseffektivitet utförs tidskritiska operationer snabbare, vilket blir centralt i realtidstillämpningar som kräver en parallell sensoravläsning och trådlös sändning. Samtidigt bidrar det till en minskad total energiförbrukning eftersom processorn snabbare kan återgå till viloläge.

RISC-V (ESP32-C3 och C6)

RISC-V är en öppen instruktionsuppsättningarkitektur (ISA) som fixerar det standardiserade gränssnittet mellan mjukvara och hårdvara genom en rad specifika instruktioner, register och datatyper. Tack vare den öppna och modulära designen blir det möjligt att anpassa arkitekturen beroende på applikationens krav. Espressif implementerar en 32-bitars RISC-V kärna i ESP32-C3 och ESP32-C6 som är baserad på RV32IMC arkitekturen.[23] Arkitekturen kännetecknas framförallt av de fasta instruktionslängder och en enkel intern struktur som bidrar till en effektiv exekvering per klockcykel, samt en förenklad hårdvaruimplementation [26]. Vid beräkningsintensiva uppgifter likt Fast Fourier

Transform(FFT), eftersom instruktionerna är enkla och förutsägbara behöver processorn inte slösa klockcykler på komplex logik för att tolka dem. Samtidigt saknar standard implementationen stöd för avancerade DSP-utökningar, vilket leder till att prestandan begränsas vid mer komplex signalbehandling. På grund av den modulära uppbyggnaden av arkitekturen tillsammans med dess stöd för komprimerade instruktioner (C-tillägget) blir det möjligt med optimeringar av både kodtätet och energiförbrukning. Resultatet av detta blir en snabb bearbetning med begränsad energikostnad, speciellt i specialversioner som saknar tyngre ISA komponenter eller har särskilda lagliga anpassningar för strömsnål drift [23].

Specifika egenskaper hos ESP32-familjen

ESP32-C3:

ESP32-C3 är en enkelkärnig mikrokontroller som baseras på en 32-bitars RISC-V arkitektur med en maximal klockfrekvens på 160 MHz och 400 kB SRAM [23]. ESP32-C3 är konstruerad för kostnads- och energieffektiva IoT-applikationer där just kraven på beräkningskapacitet är måttlig. Detta skiljer sig ifrån de mer avancerade modellerna från ESP32-familjen där C3-serien saknar stöd för exempelvis parallell exekvering och specifika vektorinstruktioner för digital signalbehandling [23]. Detta resulterar i att beräkningsintensiva operationer såsom frekvensanalys utförs med lägre effektivitet jämfört med exempelvis ESP32-S3. Utöver beräkningskärnan integrerar mikrokontrollern trådlös kommunikation i form av Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n) och Bluetooth Low Energy 5. Denna höga integrationsgrad gör det möjligt för en kompakt systemdesign samtidigt som man eliminerar behovet av externa radiokomponenter vilket i sin tur minskar den totala energiförbrukningen.

ESP32-S3

ESP32-S3 är baserad på en dual-core Xtensa LX7 arkitektur har en maximal klockfrekvens på 240 Mhz och 512kB intern SRAM [22]. Den högpresterande mikrokontrollen är konstruerad för applikationer med omfattande krav på beräkningskapacitet, särskilt inom digital signalbehandling (DSP) och edge baserad databehandling. Den tvåkärniga arkitekturen möjliggör parallell exekvering av uppgifter vilket förbättrar systemets förmåga att hantera samtida processer. Detta resulterar i att systemets förmåga förbättras i kategorier såsom att hantera samtida processer likt komplex sensoravläsning och nätverkskommunikation utan att förlora prestanda. Processorn inkluderar även stöd för vektorinstruktioner, vilket ger en

accelererad prestanda vid beräkningsintensiva operationer inom DSP jämfört med konventionella skalära processorer. S3-serien erbjuder även ett omfattande utbud av perifera gränssnitt, detta inkluderar stöd för kameramoduler och displayer. Dess höga funktionalitets- och integrationsgrad gör det möjligt för implementering av avancerade inbyggda system, detta innebär samtidigt att systemkomplexiteten ökar medan den genomsnittliga energiförbrukningen blir högre [22].

ESP32-C6

Likt ESP32-C3 baseras även ESP32-C6 på en RISC-V arkitektur. Mikrokontrollern är försedd med en huvudprocessor med en klockfrekvens upp till 160 MHz, för energisnåla operationer [25]. Dessutom finns en dedikerad lågeffektsprocessor (LP-core)

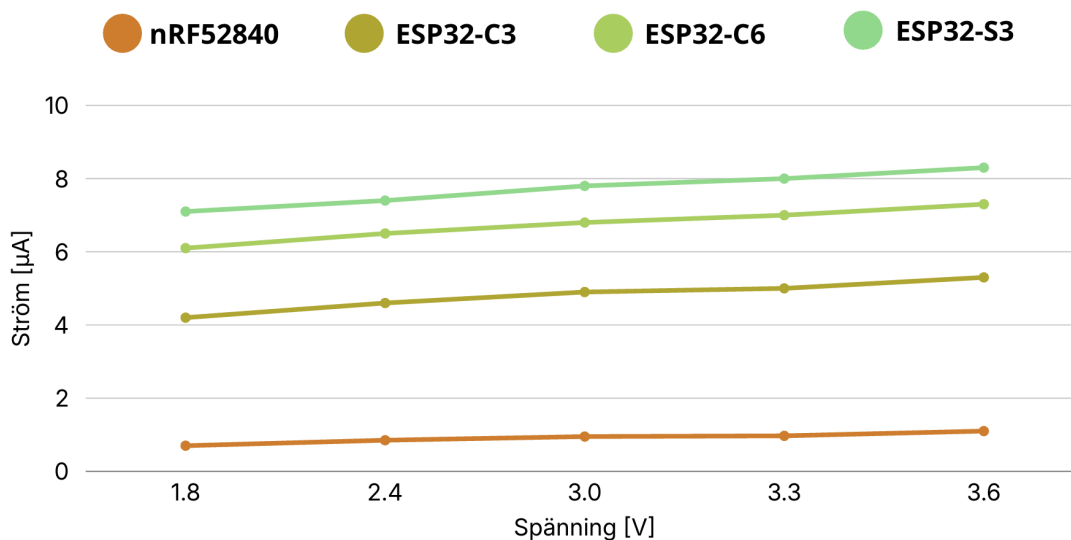
som hanterar enklare bakgrundsoperationer när huvudprocessorn är i deep-sleep mode [22]. ESP32-C6 särskiljer sig från tidigare modeller genom att introducera stöd för Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), utöver Bluetooth Low Energy 5.3 och 802.15.4-protokollet såsom Thread och Zigbee. En central funktion i Wi-Fi 6 standarden är Target Wake Time (TWT), vilket möjliggör en strukturerad schemaläggning av kommunikationen mellan mikrokontrollern och accesspunkten. Genom att definiera specifika tidsintervall för dataöverföringen kan mikrokontrollern befinna sig i energisnåla vilolägen under resterande tid [27]. Detta vilket leder till minskad genomsnittlig energiförbrukningen, speciellt i applikationer där datakommunikation sker periodiskt snarare än kontinuerligt.

2.7 Jämförelse med branschledande: Nordic Semiconductor nRF-serien

För att sätta ESP32-familjen i ett industriellt sammanhang jämförs den med mikrokontrollers från Nordic Semiconductor, vilka utgör en branschledande aktör och en etablerad referenspunkt inom trådlös ultralågeffektselektronik [28]. Deras nRF52- och nRF53-serier är specifikt optimerade för nätverkskommunikation med minimal energiförbrukning. En väsentlig skillnad mellan plattformarna utgörs framförallt av användandet av radioprotokoll och deras tillhörande energikrav. Wi-Fi-baserade system, likt ESP32-enheterna, uppvisar höga toppströmmar under dataöverföring. Exempelvis kan strömförbrukningen vid Wi-Fi-sändning nå över 300 mA beroende på standard och konfiguration [22]. Nordic Semiconductor enheter använder istället protokoll som är utvecklade just lågeffektskommunikation såsom Bluetooth Low Energy och IEEE 802.15.4 (Thread/Zigbee) där sändningströmmar i allra flesta fall ligger i runt omkring några milliampere [28]. Detta

leder till lägre energiförbrukning vid oregelbunden kommunikation samt en mindre variation vid effektuttag. Skillnaderna är visuella även i hur viloläget hanteras genom att Nordic Semiconductor plattformar är utformade låg energiförbrukning, och kan uppnå strömnivåer under 1 μA i djupsömnsläge beroende på konfiguration [28].

ESP32-baserade system tenderar generellt att uppvisa en högre viloström som vanligtvis ligger på 7 μA med undantag till C3 som har en energiförbrukning på 5 μA under viloläge [22].



Figur 1 : Teoretisk jämförelse av strömförbrukning i viloläge (Deep-sleep/System ON) för nRF52840, ESP32-C3, ESP32-C6 och ESP32-S3 som en funktion av matningsspänning. Data är sammanställda från respektive tillverkares datablad.

Utöver aspekterna kring energisparande skiljer de även sig i sin systemarkitektur och beräkningskapacitet. ESP32 och dess enheter medför integrerad Wi-Fi kommunikation samt högre beräkningsprestanda. Detta möjliggör en lokal databehandling och en direkt uppkoppling till nätverket [22]. Nordic Semiconductors enheter har en annan uppsättning av arkitektur där sensorer istället kommunicerar via BLE till en gateway, detta minskar energibehovet som samtidigt begränsar möjligheten till en direkt nätverksanslutning.

Tabell 4: Teknisk jämförelse av mikrokontrollerarkitekturer

Egenskap	Nordic nRF52840	ESP32-C3	ESP32-C6	ESP32-S3
Processorkärna	ARM Cortex-M4	RISC-V (RV32IMC)	RISC-V (RV32IMC)	Xtensa LX7
Antal kärnor	1	1	1 + LP-core (20 MHz)	2 (Dual-core)
Max klockfrekvens	64 MHz	160 MHz	160 MHz	240 MHz
Minne (SRAM)	256 kB	400 kB	512 kB	512 kB
Beräkningsstöd	FPU (Flyttal)	Begränsat	Begränsat	Vektorinstruktioner (SIMD/DSP)
Trådlöst protokoll	BLE, 802.15.4	Wi-Fi 4, BLE 5.0	Wi-Fi 6, BLE 5.3, Zigbee	Wi-Fi 4, BLE 5.0+ Mesh
Unika funktioner	Extremt strömsnål radio	Secure Boot	Target Wake Time (TWT)	Omfattande perifera gränssnitt
Typisk ström i Deep Sleep	< 1 μ A	~5 μ A	~7 μ A	~7–8 μ A

2.8 Thermopile:

En termopil är en strålningssensor som omvandlar termisk energi i form av temperatur eller infraröd strålning till elektrisk energi via den termoelektriska Seebeck-effekten [29]. Sensorn består av flera seriekopplade termoelement, vanligtvis tillverkade av CMOS-kompatibla material såsom p-dopat kisel och aluminium [30]. När dessa element utsätts för en temperaturskillnad (ΔT) genererar varje element en spänning. På grund av dess seriekopplade konfiguration adderas utspänningar vilket gör sensorn extremt känslig för små temperaturvariationer. Den fundamentala principen för en termopil med n seriekopplade termoelement kan approximeras med ekvationen:

$$\Delta V = n \cdot S_r \cdot \Delta T$$

där S_r är den relativa Seebeck-koefficienten som definieras som skillnaden mellan materialens Seebeck-koefficienter [29]. Vid $T_1=T_2$ blir utspänningen noll, vilket innebär att sensorn endast reagerar på temperaturgradienter och inte på absolut temperatur. Eftersom Seebeck-effekten är självgenererande krävs ingen extern spänningsmatning, detta minskar energiförbrukning vilket är en viktig egenskap för batteridrivna IoT-system som brandlarm. I

praktiska tillämpningar utnyttjas sensorns asymmetriska termiska massor för att filtrera bort homogena temperaturförändringar och förhindra falsklarm. Termoelementets varma fog placeras på ett tunt membran, medan den kalla fogen vilar på ett kiselsubstrat som fungerar som kylfläns. Vid en jämn temperaturökning i omgivningen värms båda fogarna upp lika mycket ($\Delta T=0$), vilket gör att ingen spänning genereras. Träffas sensorn däremot av infraröd strålning från en eld värms membranet upp momentant medan substratet förblir svalt. Denna omedelbara temperaturgradient skapar då en mätbar spänningspuls via Seebeckeffekten, varigenom sensorn selektivt kan detektera flammor. Sensorns känslighet beskrivs av spänningskänsligheten SV , som anger hur effektivt strålning omvandlas till elektrisk signal [30].

$$SV = \eta TF \cdot n \cdot Sr/Gth$$

Där ηTF beskriver den optiska effektiviteten och Gth den totala termiska konduktiviteten. För att maximera känsligheten måste Gth minimeras, vilket i moderna sensorer uppnås genom mikromekanisk etsning där termoelementen placeras på ett tunt membran ($\sim 1\mu m$) [31].

Detta isolerar mätpunkten från kiselsubstratet som fungerar som kylfläns och reducerar värmeledning, vilket förstärker temperaturdifferensen över termoelementen [30].

2.9 IR-sensor:

Infraröda sensorer klassificeras som optoelektroniska komponenter vilka har till uppgift att mäta elektromagnetisk strålning. Mätprincipen vilar på det fysikaliska faktumet att alla objekt med en temperatur över den absoluta nollpunkten avger termisk energi. Denna energi emitteras som elektromagnetisk strålning, teoretiskt refererad till som svartkroppsstrålning, vilket i detta specifika sammanhang innebär att strålningens intensitet och våglängd bestäms helt och hållet av objektets temperatur [32]. Det infraröda området av det elektromagnetiska spektrumet delas vanligtvis in i fyra kategorier. Dessa utgörs av kortvågig (SWIR, 1-3 μm), mellanvågig (MWIR, 3-5 μm), långvågig (LWIR, 8-12 μm) samt mycket långvågig (VLWIR, > 12 μm) [32]. Genom mätningar i de specifika våglängdsband möjliggörs identifieringar av karakteristiska emissions- och absorptions mönster från förbränningsprocesser, vilket exempelvis används vid eld- och flamdetektion. Den fundamentala principen för absorption är att den inkommande fotonens energi ($h\nu$) måste överstiga halvledarmaterialets elektroniska bandgap (E_g).

$$h\nu > E_g$$

Till skillnad från termiska detektorer bygger fotodetektorer på en direkt interaktion mellan inkommande fotoner och materialets laddningsbärare. Detta leder till att behovet av att sensorns fysiska massa uppnår termisk jämvikt elimineras och därmed möjliggörs en kortare responstid. I scenarion gällande batteridrivna IoT-brandlarm är den korta responstiden fundamentalt för att sensorn ska hinna reagera på det högfrekventa flimret från en eld. På grund av IR-sensorns känslighet för bakgrundsstrålning kan statiska värmekällor och solljus generera ett termiskt brus som riskerar att orsaka felaktiga detektioner. Genom att analysera sensorns prestanda och dess förmåga att urskilja flam signalen från det underliggande bruset, används måttet specifik detektivitet (D^*).

$$D^* = S_V \sqrt{A_s} / u_{Rn}$$

Där S_V är spännings känsligheten (responsiviteten), A_s är sensorns mätarea medan u_{Rn} representerar den termiska brusspänningen [30]. För att upprätthålla ett optimalt signal-brus förhållande (SNR) är en hög specifik detektivitet (D^*) fundamental. Genom digital signalbehandling kan flammans dynamiska signatur isoleras från statistiskt bakgrundsbrus, vilket i sin tur minimerar risken för falsklarm samtidigt som systemets tillförlitlighet ökar.

2.10 Algoritmer och Mjukvaruarkitektur

Efter att de hårdvarumässiga förutsättningarna och sensorteknikerna har etablerats skiftar rapportens fokus mot systemets digitala arkitektur. En optimerad mjukvaruarkitektur är en förutsättning för att kunna kombinera en beräkningsintensiv riskmodellering med kraven på extrem energieffektivitet. Detta avsnitt introducerar den teoretiska referensramen för systemets programvara, vilket innefattar utvecklingsmiljöns betydelse, signalbehandling via snabb fouriertransform samt den strategiska konfigurationen av mikrokontrollerns olika driftlägen.

2.11 Utvecklingsmiljö (IDE) och Ramverk

Vid programmering av inbyggda system baserade på arkitekturen ESP32 existerar flera mjukvaruramverk med olika abstraktionsnivåer. För snabb framtagning av prototyper tillämpas traditionellt Arduinos ekosystem via utvecklingsmiljöer som Arduino IDE eller PlatformIO.

Dessa verktyg erbjuder en hög abstraktionsnivå vilket förenklar utvecklingsprocessen, men de begränsar samtidigt möjligheten att detaljstyra den bakomliggande hårdvaran. För att uppnå maximal energieffektivitet i strömsnåla tillämpningar krävs istället en mer maskinnära mjukvaruarkitektur.

Det officiella ramverket Espressif IoT Development Framework erbjuder direkt åtkomst till realtids operativsystemet FreeRTOS. Denna åtkomst gör det möjligt att exakt styra vilka uppgifter som tilldelas specifika processorkärnor. Därigenom elimineras onödig processortid och varje klockcykel kan utnyttjas optimalt för att minimera strömförbrukningen.

2.12 Fast Fourier Transform (FFT) för Flamdetektion

Optisk flamdetektion har en fundamental utmaning i att kunna diskriminera en verklig brand från ofarligt bakgrundsbrus, såsom direkt solljus, eller en varm spisplatta. Brandförlopp uppvisar dock en mycket specifik, dynamisk signatur: eldslågan flimrar kontinuerligt. Flimret oscillerar i frekvensspannet mellan 5 Hz och 20 Hz [33].

En statisk infraröd sensor mäter primärt värmestrålningens amplitud, vilket inte ensamt kan bekräfta en eld. En samling av tidsdiskret, dataserie av IR-värden och tillämpning av Fast Fourier Transform (FFT) omvandlar signalen från tidsdomän till frekvensdomän. Statiska värmekällor kan elimineras som falsklarm, eftersom systemet kan isolera och identifiera de dominerande energi komponenterna i signalen. Därmed kan det kritiska 1-20 Hz fönstret utnyttjas.

Processorarkitekturernas påverkan på FFT

FFT är beräkningsintensiv, därmed blir valet av mikrokontroller inom ESP32-familjen avgörande för systemets energiförbrukning vid analysen.

RISC-V arkitektoniska modeller som ESP32-C3 och ESP32-C6 är extremt strömsnåla i viloläge men saknar avancerade instruktioner för komplex signalbehandling. Omvänt är ESP32-S3 välanpassad med sin Xtensa LX7-processor för den typ av beräkning. Dess arkitektur inkluderar hårdvarustöd för vektorinstruktioner (SIMD - Single Instruction, Multiple Data). Espressifs optimerade mjukvarubibliotek (ESP-DSP) istället för standardbibliotek som arduinoFFT, kan ESP32-S3 bearbeta en komplex FFT-algoritm en bra bit över 10 gånger snabbare än sina RISC-V-motsvarigheter. S3-chippet drar mer ström i sitt aktiva läge, men dess förmåga att extremt snabbt utföra FFT-beräkningar och därefter

omedelbart återgå till viloläge kan få den totala energin som förbrukas per mätcykel bli betydligt lägre.

2.13 Konfigurering av Driftlägen (Active, Light Sleep, Deep Sleep)

För att minimera den totala energiförbrukningen krävs en strikt mjukvarustyrning av mikrokontrollerns sömntillstånd. Mjukvaruarkitekturen är programmerad för att hålla enheten i djupsömn under majoriteten av drifttiden. Uppvaknandet sker cykliskt via en intern realtidsklocka eller genom hårdvaruavbrott triggade av externa sensorer. Programvarans primära uppgift är att säkerställa att processorn endast befinner sig i det strömkrävande aktiva läget under de millisekunder som krävs för att exekvera fouriertransformen samt genomföra den trådlösa dataöverföringen.

I applikationer baserade på systemkretsen ESP32 C6 tillämpas dessutom mjukvarustöd för funktionen Target Wake Time via trådlösa nätverk enligt standarden Wi-Fi 6. Denna funktion gör det möjligt för programvaran att förhandla fram exakta, schemalagda kommunikationsfönster med nätverkets accesspunkt. Därmed elimineras behovet av att hålla radiokretsarna aktiva för att lyssna efter inkommande nätverkstrafik, vilket sänker den genomsnittliga strömförbrukningen markant.

2.14 Protokoll för IoT och Kommunikation

Trådlös dataöverföring är centralt för ett smart brandlarm att kunna varna användaren och integreras i ett smart hem. Protokoller som Wi-Fi och Bluetooth är ofta begränsade mellan hög energiförbrukning eller en kort räckvidd som kräver lokal infrastruktur. För att maximera systemets autonomi, bibehålla en rigorös strömsparstrategi, och möjliggöra täckning över stora ytor avgränsas systemet i detta sammanhang till att nyttja LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) som primär kommunikationsstandard.

2.14.1 LoRa och Chirp Spread Spectrum (CSS)

Det finns en fundamental teknisk skillnad mellan LoRa och LoRaWAN. LoRa utgör det fysiska radiolagret och bygger på moduleringstekniken Chirp Spread Spectrum (CSS). CSS sprider informationen över ett brett bandbredd med hjälp av kontinuerliga frekvenssvep istället för att sända på en smal och fast frekvens. Tillämpningen av denna teknik gör radiosignalen robust mot externt brus, signalstörningar och flervägsutbredning som kan uppstå i en dynamisk köksmiljö med mycket metall.

2.14.2 LoRaWAN-arkitektur och Enhetsklasser

LoRaWAN utgör MAC-lagret (Medium Access Control) och definierar nätverksarkitekturen ovanpå LoRa-modulering. I regel är nätverket byggt kring en stjärntopologi ("star-of-stars"). Kommunikationen sker asynkront via den så kallade ALOHA-metoden. Enheten sänder data till lokala gateways som saknar inbyggd databearbetninglogik; de agerar enbart som transparenta radiokonverterare som vidarebefordrar upplänkspaketen till en central nätverksserver över en IP-anslutning. Enheten avlastas från nätverksberäkningar.

LoRaWAN-protokollet delar in ändnoder (enheter som sänder data) i tre driftklasser (A, B, och C), där Klass A är branschstandarden för batteridrivna sensornoder. Klass A-enhet kan hamna i djupt sömnläge och enbart vakna när de initierar en överföring. I samband med försändelsen öppnar enheten två korta, schemalagda mottagningsfönster (RX1 och RX2) för att lyssna efter eventuella ACK (bekräftelser) eller kommandon från servern. Enheten återgår till vila efter försändelsen. Denna asynkrona och kraftigt asymmetriska kommunikationsmodell är den största orsaken till att LoRaWAN-enheter kan uppnå batterilivslängden på 10 till 15 år på små kapaciteter.

2.14.3 Adaptive Data Rate (ADR)

Energieffektiviteten kan maximeras med en mekanism som heter Adaptive Data Rate (ADR). ADR tillåter nätverksservern att dynamiskt övervaka länkens signalkvalitet och fjärrstyra enhetens sändareffekt samt spridningsfaktor (Spreading Factor, SF).

Spridningsfaktorn dikterar hur lång tid varje sändningar tar att sända över radiomediet. En så kallad "Time on Air" bestäms utifrån vilken spridningsfaktor man väljer, där exempelvis SF7 resulterar i en högre datahastighet och en kort sändningstid. En kort sändningstid förbrukar mindre ström samt som de reducerar risken för data kollisioner med andra enheter i nätverket. Kompromissen i sådant fall är något kortare radiotäckning. Implementering av ADR kan säkerställa att enheten automatiskt nyttjar den snabbaste och mest strömsnåla inställningen som fortfarande garanterar en stabil koppling. Därmed fullbordas systemets strömsparoptimering.

3. Metod

För att utvärdera systemets totala energiprofil och undersöka prestandaskillnaderna mellan de olika systemkretsarna tillämpas en vetenskaplig hybridmodell. Denna metodik kombinerar empirisk profilering av beräkningstunga kodblock (FFT, uppvaknande) kombinerad med analytisk härledning av hårdvarubundna tider (IR-sampling, LoRa-sändning). Modellen bygger på att exekveringstiden för systemets kritiska uppgifter, såsom datainsamling och fouriertransformanalys, fastställs genom mjukvaruprofilering på respektive hårdvaruplattform. Genom att integrera dessa tidsperioder med komponenternas specificerade strömvärden kan den totala genomsnittliga strömförbrukningen och den förväntade batterilivslängden modelleras matematiskt för olika driftscenarier.

3.1 Batterival: IoT kontext

Målsättningen är att säkerställa extremt lång autonom drifttid för att minimera underhållsbehovet för användaren, samtidigt som enheten måste driva en krävande nätverksarkitektur och bearbeta sensordata kontinuerligt för att snabbt urskilja en farlig flamma från matlagning [17]. För detta specifika ändamål har ett 1500 mAh litium-polymer (Li-Po) batteri valts i direkt kombination med mikrokontrollern ESP32, i enlighet med de tekniska egenskaper och synergier som redogjorts för i avsnitt 2.3 och 2.4.

3.2 Validering av Li-Po och ESP32-arkitekturen

Motiveringen bakom att designa ett inbyggt system kring ESP32-plattformen i samband med ett Li-Po-batteri på 1500 mAh vilar på flera fundamentala tekniska synergier, vilket grundar sig i de batterikemiska och elektriska egenskaper som beskrivs i avsnitt 2.2 och 2.3.

ESP32 är en kraftfull mikrokontroller med inbyggt stöd för Wi-Fi och Bluetooth, och den är arkitektoniskt designad för att arbeta med en drivspänning mellan 3,0 V och 3,6 V, med 3,3 V som typisk arbetsspänning [21]. Ett Li-Po-batteri arbetar med en nominell spänning på 3,7 V, kan vid maximal uppladdning uppnå 4,2 V och bör urladdas till lägst 3,0 V för att undvika kemisk degradering [20]. Eftersom ESP32-chippet tolererar matningsspänningar ner till 3,0 V, passar detta spänningsfönster väl för systemets strömförsörjning. Genom att använda en högkvalitativ Low Dropout Regulator (LDO) med ett extremt lågt spänningsfall (dropout) på cirka 100–200 mV, kan mikrokontrollern drivas stabilt ner till en batterispänning på cirka

3,1–3,2 V innan systemet riskerar en så kallad brown-out-omstart. Detta fönster möjliggör att systemet säkert kan utnyttja det stipulerade urladdningsdjupet (DoD) på 80 % av batteriets stämplade kapacitet, alternativt kan en högeffektiv Buck/Boost-omvandlare användas för att garantera en stabil och konstant 3,3 V-lina över hela urladdningscykeln [34].

1500 mAh utgör en mycket väl avvägd kompromiss mellan enhetens fysiska storlek och den totala energimängden [34]. Ett brandlarm måste rent estetiskt och praktiskt vara diskret när det monteras i en hemmiljö. Eftersom Li-Po-batterier bygger på den flexibla “pouch”-designen kan cellen tillverkas platt, vilket underlättar en slimmad produktdesign till skillnad från om man hade använt klumpiga cylindriska standardbatterier (som 18650 celler) [35]. Batteriet har med marginal den nödvändiga kapaciteten och den låga inre resistansen för att hantera de plötsliga strömtopparna som kan överstiga 200 mA utan att orsaka spänningsdippar eller instabilitet [34].

3.3 Teoretisk datainsamling (Strömförbrukning)

För att fastställa den elektriska belastningen under olika driftlägen genomfördes en litteratur- och databladstudie för att teoretiskt utvärdera hårdvarans energikrav.

- **Mikrokontrollers:** Teoretisk strömförbrukning i Active Mode och Deep Sleep hämtades från XIAOs officiella datablad för mikrokontrollerna ESP32-C3, ESP32-C6 och ESP32 S3
- **Kringutrustning:** Teoretisk strömförbrukning för de perifera komponenterna, specifikt temperatursensorn (DS18B20), IR-sensorn (MLX90614) och LoRa-modulen (SX1262) hämtades från respektive datablad.

De aktiva strömvärdena utgör en sammansatt approximation baserad på systemkretsens grundförbrukning adderat med perifera sensorers strömförbrukning och en estimerad förlust i spänningsomvandlaren. Som exempel beräknas XIAO ESP32-C6 vid en temperaturmätning till 40 mA genom att kombinera SoC:ns grundström med sensorns konverteringsström samt en marginal för förluster och transienter.

Den analytiska modelleringen av strömförbrukning är dels ett medvetet metodval, dels en följd av hårdvaru- och utrustningsbegränsningar som omöjliggjorde empiriska strömmätningar på kretskortnivå (se 5.1).

Att ansatsen ändå bedöms tillförlitlig motiveras i 3.8, där databladens standardiserade mätvärden samt den konsekventa, konservativa adderingen av läckströmmar diskuteras.

3.4 Analytisk och Empirisk datainsamling (Exekveringstid)

Mätmetodiken skiljde sig åt beroende på processtyp och är uppdelad enligt följande principer: FFT-exekveringstiden mättes empiriskt via inbyggda hårdvarutimers (`micros()`) på respektive utvecklingskort, i enlighet med den arkitektoniska analys som presenteras i avsnitt 2.6. IR-samplingstiden härleddes analytiskt från samplingsfrekvens och blockstorlek. LoRa-sändningstiden hämtades från tillverkarens specifikationer för Time on Air vid SF7. Uppvaknande- och initialiseringstiden modellerades teoretiskt enligt Double Wake-strategin (se nedan), och utgör en optimeringsgräns snarare än ett uppmätt värde

- Exekveringstiderna via en kombination av matematisk kalkylering av kodens interna fördröjningar (exempelvis IR-sensors definierade samplingshastighet) och mjukvaruprofilering på generiska utvecklingskort. Mikrokontrollerns inbyggda hårdvarutimers användes för att tidsstämpla block.
- Flerstegs väckningsarkitektur (duty cycling) strukturerades i mjukvaran för att efterlikna en realistisk IoT-tillämpning.

Den empiriska datainsamlingen genomfördes genom mjukvaruprofilering i utvecklingsmiljön Arduino IDE (version 2.2.1) på generiska utvecklingskort för respektive systemkrets (SoC): ESP32-C3, ESP32-C6, och ESP32-S3. Tidsstämplingen av specifika kodblock utnyttjade mikrokontrollerns inbyggda hårdvarutimers via funktionen `micros()` i Arduino-ramverket. Registreringen av tidsdifferensen i mikrosekunder omedelbart före och efter exekveringen av fouriertransformen kunde exekveringstiden för en 128-punkters FFT-analys isoleras och mätas med hög precision för samtliga tre arkitekturer. För att säkerställa hög statistisk tillförlitlighet genomfördes FFT-mätningarna genom tiotals iterativa körningar per plattform, varpå ett medelvärde beräknades. Mätningarna utfördes med processorkärnorna konfigurerade till standardfrekvenser (240 MHz för ESP32-S3 och 160 MHz för ESP32-C3 samt ESP32-C6). Tidsåtgången för SoC-enheternas uppvaknandefas och initialisering mättes empiriskt med samma metodik.

För de processor som är strikt bundna till perifera hårdvarukomponenter tillämpades en analytisk och matematisk härledning baserad på tidsfördröjningar i källkoden och sensorernas

hårdvarudefinierade samplingshastighet. Exekveringstiden för IR-samplingen (T_{active} för sensorn MLX90614) är direkt avhängig antalet samplingspunkter och samplingsfrekvensen. Med en fastställd samplingsfrekvens på 100 Hz (motsvarande ett tidsintervall på 10 ms mellan mätpunkter) och en blockstorlek på 128 sampel, beräknas den aktiva tiden för datainsamling matematiskt enligt:

$$128 \text{ sampel} \times 10 \text{ ms} = 1280 \text{ ms}$$

Inklusive mätning med temperatursensorn (DS18B20) och periferispecifik initialisering fastställdes den totala IR-samplingstiden analytiskt till 1285,0 ms, vilket förblir konstant oberoende av vilken SoC-plattform som används. Tidsåtgången för LoRa-sändningen via modulen SX1262 uppskattas till en fast transient om 50,0 ms baserat på tillverkarens specifikationer för sändningstid (Time on Air) vid en optimerad spridningsfaktor (SF7). För att minimera fördröjning och energiförbrukning vid ett larm förutsätter modellen att enheten är konfigurerad med nätverksmekanismen Activation By Personalization (ABP) och sänder meddelanden som *Unconfirmed Data Up*. Detta eliminerar den energikrävande handskakningen vid en nätverksanslutning (OTAA Join). De obligatoriska mottagningsfönstren (RX1 och RX2) för Klass A-enheter exkluderas från den explicita tidsmätningen på 50 ms, men deras resulterande energikrav bedöms vara kompenserade genom den konservativa säkerhetsmarginalen i sändningsströmmen (120–130 mA).

Double Wake Strategi

Temperaturmätningarna med DS18B20 tillämpar en Double Wake-strategi för att minimera energiförbrukning under sensorns konverteringsfas. Sensorn har standardkonfiguration på 12-bitars upplösning, men konfigurerades till 9-bitars upplösning för att minimera konverteringstiden. Konverteringenstiden blir därmed 93.75 ms. Processorn väcks i 2 ms för att initiera konverteringen, fortsätta i Deep Sleep under 94 ms, och sedan väcks sedan på nytt i 2 ms för att läsa av det digitala temperaturvärdet. Den totala processtiden (T_{Active}) för en mätning reduceras till 4 ms. Den exceptionellt korta uppvaknandetiden på 2 ms är en teoretisk optimering som förutsätter exekvering av specifik kod direkt från RTC-minnet (en så kallad RTC-stub), alternativt utnyttjande av mikrosömn (Light Sleep) under konverteringsfasen. Detta krävs för att kringgå huvudprocessorns fullständiga bootsekvens. I en standardkonfiguration med traditionell djupsömn (Deep Sleep) tillkommer en

hårdvarudefinierad fördröjning på cirka 10–50 ms för ROM-bootloadern, vilket systemmodellen i dess nuvarande form har exkluderat i syfte att påvisa maskinvarans absoluta optimeringsgräns. Eftersom FFT- och uppvaknandetider är arkitekturberoende men i praktiken oberoende av kortets perifera kretsdesign, bedöms tidsmätning på generiska utvecklingskort vara representativ för respektive SoC, medan strömförbrukningen modelleras kortspezifikt utifrån XIAO-databladet där just kortlayouten är avgörande.

Modellen approximerar strömuttaget under den 94 ms långa konverteringsfasen med systemets viloström.

3.5 Definition av utvärderingsscenarier

Med de uppmätta och analytiskt härledda exekveringstiderna från avsnitt 3.4 som underlag definieras tre driftscenarier för att utvärdera hårdvarans och mjukvarans kombinerade energiförbrukning i en realistisk IoT-tillämpning. Dessa scenarier simulerar enhetens beteende under dess livscykel och ligger till grund för resultatkapitlets matematiska beräkningar:

- Scenario 1 - Normal drift (Enbart temperaturmätning): Scenariot representerar systemets vilotillstånd under merparten av driften. Cykeltiden (T_{Cycle}) på 5 sekunder väcker mikrokontrollern periodiskt, varpå temperatursensorn DS18B20 läser av omgivningstemperaturen. Om ingen temperaturavvikelse (spik) registreras, stängs nätverks- och beräkningsmoduler omedelbart av och enheten återgår till djupsömn (Deep Sleep) via flerstegs väckningsarkitekturen. Sändning via LoRaWAN antas ske kontinuerligt för temperaturbevakning.
- Scenario 2 - Spik detekteras: Scenariot initierar endast temperatursensor registerar en temperaturökning som överskrider en fördefinierad tröskel. Strömförsörjning till IR-sensorn (MLX90614) aktiveras för att samla in 128 datapunkter. FFT-analys exekveras i datapunkterna för att i realtid identifiera det karakteristiska flimmer området (5-20 Hz). Vid bekräftat flimmer aktiveras även LoRa-modulen (SX1262) för att sända ett larmpaket. Det antas i modellen att enheten befinner sig kontinuerligt i detta feltillstånd under utvärderingen.
- Scenario 3 - Optimeringsutvärdering (Duty Cycling): För att kvantitativt utvärdera hur mjukvarans tidsintervall påverkar systemets autonomi, modelleras Scenario 1 (normal drift) för samtliga plattformarna ESP32-C6, ESP32-C3, och ESP32-S3 från

tillverkaren XIAO under tre olika cykeltider (T_{Cycle}): 1 sekund, 5 sekunder respektive 10 sekunder. Syftet är att analysera kompromissen mellan systemets reaktivitet och den totala batterilivslängden.

3.6 Energimodellering och Analys

Tiden (T) och den teoretiska strömmen (I), definierad för varje tillstånd, användes för att modellera systemets totala genomsnittliga strömförbrukning (I_{avg}), baserat på de driftlägen och strömvärden som specificeras i avsnitt 2.4. Modellen utgick från formeln angiven nedan:

$$I_{\text{avg}} = ((I_{\text{active}} \times T_{\text{active}}) + (I_{\text{sleep}} \times T_{\text{sleep}})) \div T_{\text{cycle}}$$

Resultatet användes för att estimerar drifttiden på ett 1500 mAh Li-Po batteri med en rekommenderad maximal urladdningsgrad (DoD) på 80%

Val av sensorupplösning och dess påverkan på prestanda

Temperatursensorn DS18B20 erbjuder konfigurerbar upplösning från 9 till 12 bitar. Upplösningen har en direkt inverkan på både mätnoggrannhet och systemets energiförbrukning. Vid 12-bitars upplösning ($0,0625^{\circ}\text{C}$ noggrannhet) kräver sensorn upp till 750 ms för att genomföra en mätning. Under denna tid måste mikrokontrollern förbli i ett aktivt läge, vilket drastiskt ökar energikonsumtionen.

För denna applikation, där syftet är att detektera hastiga temperaturförändringar relaterade till brand, bedöms en extremt hög upplösning vara överflödig. Genom att istället konfigurera sensorn till 9-bitars upplösning ($0,5^{\circ}\text{C}$ noggrannhet) reduceras konverteringstiden till maximalt 94 ms. Denna optimering minskar den aktiva exekveringstiden för mätfasen med nästan 87 %, vilket är avgörande för att förlänga batteriets livslängd i en duty-cycling-arkitektur.

3.7 Teoretisk beräkning och optimering av batterilivslängd

En mätcykel (T_{Cycle}) på 5 sekunder (5000 ms) består av mätning och dataöverföring. För en korrekt beräkning måste sensorernas och sändarens exekveringstider inkluderas.

För att etablera en konservativ och garanterad miniminivå för systemets drifttid utgår den teoretiska beräkningen nedan från ett worst-case-scenario. Även om mjukvaran potentiellt

kan utnyttja en strömsnål "Double Wake"-strategi, modelleras systemet här som att mikrokontrollern förblir fullt aktiv (40 mA) under hela temperatursensorns konverteringstid (94 ms). Detta för att ta höjd för oförutsedda fördröjningar i uppvaknandefasen.

Följande antaganden för XIAO ESP32-C6 tillämpas:

- $I_{\text{MCU_Active}}$ - 40 mA
- $I_{\text{MCU_Sleep}}$ - 0,025 mA (25 μ A)
- I_{Sensor} - 1,5 mA
- I_{TX} - 120 mA (LoRa sändning)
- T_{Sensor} - 94 ms (0,094 s)
- T_{TX} - 50 ms (0,050 s)

Den totala aktiva tiden per cykel blir $T_{\text{Active}} = 0,094 + 0,050 = 0,144$ s.

Energin under den aktiva fasen (E_{Active}) i milliampere-sekunder (mAs) blir:

$$E_{\text{MCU}} = 40 \times 0,144 = 5,76 \text{ mAs}$$

$$E_{\text{Sensor}} = 1,5 \times 0,094 = 0,141 \text{ mAs}$$

$$E_{\text{TX}} = 120 \times 0,050 = 6,00 \text{ mAs}$$

$$\text{Totalt } E_{\text{Active}} = 5,76 + 0,141 + 6,00 = 11,901 \text{ mAs}$$

Genomsnittlig strömförbrukning (I_{avg}) med djupsömn ($T_{\text{Sleep}} = 5 - 0,144 = 4,856$ s) inräknad:

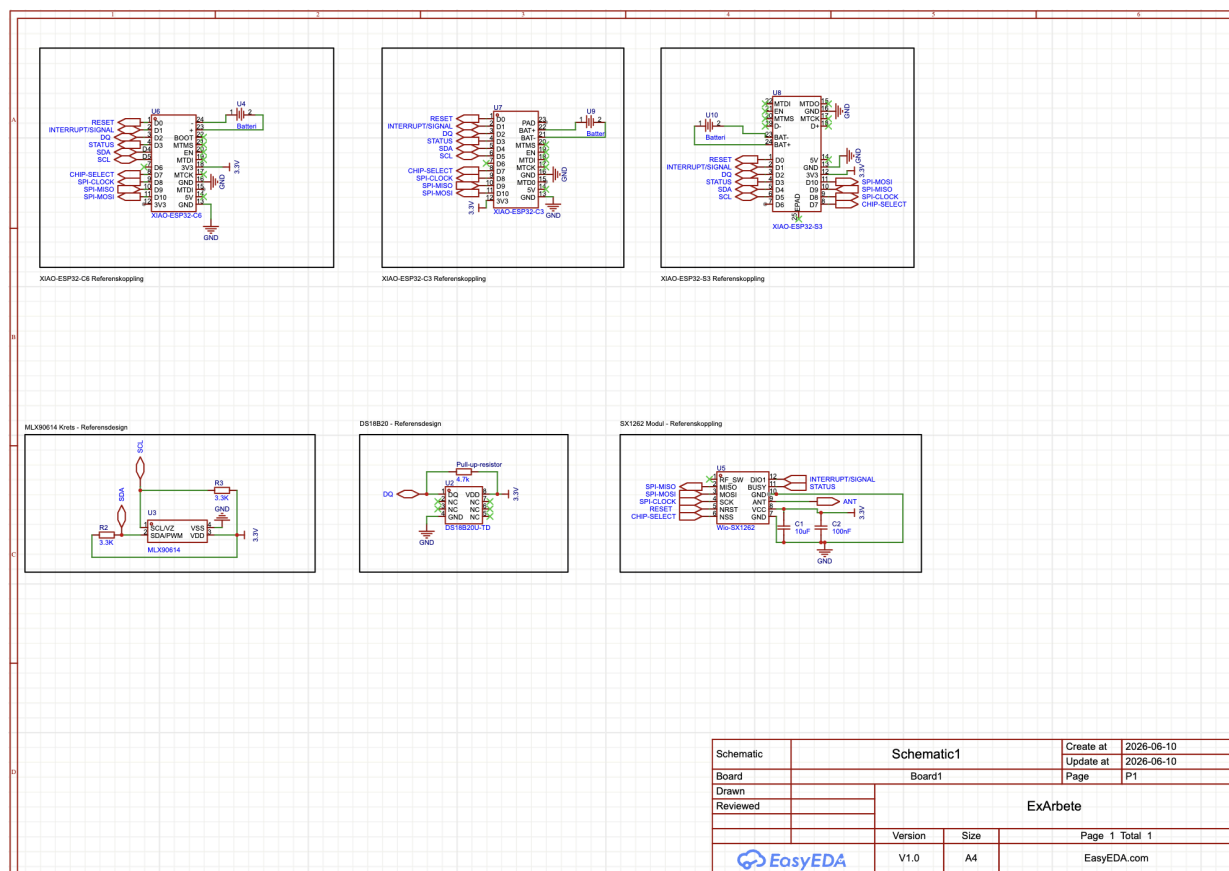
$$I_{\text{avg}} = (11,901 + (0,025 \times 4,856)) / 5 \approx 2,40 \text{ mA}$$

Med ett 1500 mAh Li-Po-batteri (DoD 80 % = 1200 mAh tillgängligt) blir livslängden:

$$T_{\text{Runtime}} = 1200 \text{ mAh} / 2,40 \text{ mA} = 500 \text{ h} \approx 20,8 \text{ dagar}$$

Resultatet är ungefär 20,8 dagar av kontinuerlig drift från ett enda 1500mAh-batteri. Dessa kalkyler illustrerar kraften i korrekt strömspar optimering. Optimeringar som att sänka LDO-läckaget genom specialdesignad hårdvara istället för utvecklingskort, eller att använda ESP32:ans ULP processor för att läsa sensorn via I2C utan att väcka CPU:n, kan drifttiden utökas ännu mer, potentiellt till flera år. [18]

Kretsschema för reproducerbarhet



Figur 2, Kretsschema med beskrivning av varje block samt kopplingar för varje plattform. EasyEDA användes som verktyg.

För att säkerställa reproducerbarhet av resultaten har ett fullständigt kretsschema för hårdvaruuppställningen (Figur 2) tagits fram. Den mjukvarukod som har utvecklats för att styra mikrokontrollern, hantera mätintervallen via Duty Cycling och kommunicera via LoRa finns bifogad i sin helhet i Bilaga A.

3.8 Källkritik

Den teoretiska referensramen och energimodelleringen i denna studie vilar primärt på tre typer av källor: officiella datablad från hårdvarutillverkare, vetenskapliga publikationer, och tekniska branschrappporter.

Datablad från Espressif Systems [22] och Nordic Semiconductor [28] utgör den primära källan för mikrokontrollers strömförbrukning och arkitektoniska specifikationer. Dessa

bedöms ha mycket hög tillförlitlighet då de utgör tillverkarnas egna, standardiserade mätningar. En potentiell felkälla är dock att dylika dokument i regel redovisar mätvärden under ideala laboratorieförhållanden. För att kompensera för detta, och undvika missvisande glädjekalkyler, har en konservativ ansats tillämpats i studiens energimodellering genom konsekvent addering av strömläckage för passiv kringutrustning och LDO-regulatorer i beräkningarna.

Batterikemi, strömförsörjning och termisk degraderingsteori bygger till stor del på fackgranskade artiklar från vetenskapliga journaler [20], samt whitepapers från etablerade aktörer inom batteriindustrin [19]. Vetenskapliga publikationer garanterar en hög akademisk standard och objektivitet, medan tillverkarnas branschrappporter bidrar med nödvändig insikt i praktiska IoT-implementationer. Branschrappporter kan innefatta kommersiella incitament, därför har insamlad data medvetet korsrefererats med oberoende akademisk forskning [36]. I synnerhet rörande litium-polymer-batteriets inre resistans och känslighet för temperaturfluktuationer. Den valda källkombinationen bedöms sammantaget utgöra en robust, tillförlitlig och objektiv grund för arbetets metodik och slutsatser.

4. Resultat

I detta kapitel redovisas systemets förväntade batterilivslängd. Detta uppnås genom att integrera de empiriska och analytiska tidsmätningarna med komponenternas teoretiska strömförbrukning.

4.1 Exekveringstider och Arkitekturens påverkan

Den beräkningsintensiva FFT-analysen skiljer sig markant mellan arkitekturerna. Tidsmätningarna visar även att processer bundna till perifera sensorer är konstanta över plattformarna.

Tabell 5: Total aktiv tid vid larm

Process	ESP32-C3 (RISC-V)	ESP32-C6 (RISC-V)	ESP32-S3 (Xtensa)
Väckning & DS18B20-mätning	94,0 ms	94,0 ms	94,0 ms
IR-sampling (128 samples)	1285,0 ms	1285,0 ms	1285,0 ms
FFT-analys (128-punkter)	6,5 ms	6,0 ms	1,5 ms
LoRa Sändning (SX1262)	50,0 ms	50,0 ms	50,0 ms
Total aktiv tid vid Larm (Tactive)	1435,5 ms	1435,0 ms	1430,5 ms

4.2 Teoretisk strömförbrukning per plattform

Tabell 6: Teoretisk strömförbrukning per plattform, strömvärden i aktivt läge representerar en approximation av SoC

Systemläge	ESP32-C3	ESP32-C6	ESP32-S3
Deep Sleep (Isleep)	0,054 mA	0,025 mA	0,024 mA
Aktiv: DS18B20 Mätning	36,5 mA	41,5 mA	51,5 mA
Aktiv: IR & FFT-analys	81,5 mA	86,5 mA	101,5 mA
Aktiv: LoRa Sändning	120,0 mA	120,0 mA	130,0 mA

4.3 Batterilivslängd - Jämförande Scenarier

Tre driftscenarier modellerades för att belysa systemets hållbarhet, alla med en cykeltid (T_{cycle}) på 5 sekunder (5000 ms).

För att analysera systemets energiförbrukning och batterilivslängd under olika driftförhållanden utfördes simuleringar för tre representativa scenarier. Dessa scenarier valdes för att täcka in systemets typiska användningsprofil från kontinuerlig normaldrift till mer transienta och belastande situationer. Det första scenariot representerar normal drift, där systemet utför periodisk temperaturmätning med en cykeltid på 5 sekunder. Detta scenario utgör ett basfall och möjliggör en referensbedömning av energiförbrukningen under stabila förhållanden. Det andra scenariot simulerar ett transient tillstånd där en detekterad temperaturspik initierar en förlängd aktiv fas med högre strömförbrukning. Detta scenario är av särskilt intresse då det illustrerar systemets dynamiska respons på avvikelser från normaldriften, samt hur dessa tillfälliga toppbelastningar påverkar den genomsnittliga energiförbrukningen över tid. Slutligen fokuserar det tredje scenariot på systemets arbetscykel (*duty cycling*). I detta scenario varieras mätintervallen systematiskt för att kartlägga hur denna parameter påverkar den totala energibudgeten, vilket möjliggör en optimering av den långsiktiga batterilivslängden. De numeriska resultaten från dessa tre scenarier sammanställs i Tabell 7, Tabell 8 respektive Tabell 9.

Tabell 7: Scenario 1 - Normal drift

Mikrokontroller	Aktiv energi per cykel (Eactive)*	Energi i djupsömn (Esleep)*	Genomsnittlig ström (Iavg)*
XIAO ESP32-C3	9,43 mAs	0,26 mAs	~1,94 mA
XIAO ESP32-C6	9,90 mAs	0,12 mAs	~2,00 mA
XIAO ESP32-S3	11,34 mAs	0,12 mAs	~2,29 mA

Tabell 8: Scenario 2 - Spik detekteras

Mikrokontroller	Aktiv tid per larm (Tactive)	Genomsnittlig ström (Iavg)	Uppskattad livslängd (Timmar)
XIAO ESP32-C3	1435,5 ms	~22,98 mA	~52,2 timmar
XIAO ESP32-C6	1435,0 ms	~24,33 mA	~49,3 timmar
XIAO ESP32-S3	1430,5 ms	~28,40 mA	~42,2 timmar

Mätintervall (Tcycle)	Andel aktiv tid (Duty Cycle %)	Genomsnittlig ström (Iavg)	Teoretisk livslängd
5 sekunder	2,88 %	2,00 mA	~25 dagar
10 sekunder	1,44 %	1,01 mA	~49 dagar
60 sekunder (1 min)	0,24 %	0,19 mA (190 µA)	~263 dagar
900 sekunder (15 min)	0,016 %	0,036 mA (32 µA)	~1389 dagar

Tabell 9: Scenario 3 - Optimeringsutvärdering

Notera: Den teoretiska livslängden för 900 sekunder (1389 dagar) är en strikt matematisk kalkyl baserad på systemets strömförbrukning. Den tar inte hänsyn till batteriets kemiska självurladdning eller maximala hylltid, vilket i praktiken begränsar drifttiden.

5. Diskussion

I detta kapitel analyseras och utvärderas de empiriska och analytiska resultat som presenterats i föregående avsnitt. Metodikens tillförlitlighet och energimodellens giltighet granskas kritiskt i ljuset av de hårdvarubegränsningar och utrustningsproblem som uppstod under projektets gång. Vidare diskuteras de praktiska och kommersiella implikationerna av systemets arkitekturval, duty cycling-parametrar samt alternativa strömförsörjningslösningar i relation till reaktivitet och brandsäkerhet.

5.1 Metodkritik och Modellens tillförlitlighet

Budgetrestriktioner gällande avancerad mätutrustning samt ett sent hårdvaruhaveri tvingade fram ett skifte i metodiken. Detta skiftet resulterade i avsaknad av empiriska strömmätningar på kretskortnivå. En robust modell framställdes för att tjäna studiens syfte genom att studera referensdokument och simulera energiförbrukningen utifrån tillverkarnas datablad.

Resultatens giltighet säkerställdes genom analytisk härledning. Exempelvis kan den dominerande tidsfaktorn i den aktiva fasen (T_{active}) härledas matematiskt från mjukvarans struktur: 128 samplingspunkter dividerat med en frekvens på 100 Hz resulterar undantagslöst i en exekveringstid på över 1,28 sekunder. Detta överensstämmer med de mätvärden som presenteras i **Tabell 5**, där IR-samplingen fastställdes till 1285,0 ms. Tidsåtgången för FFT-algoritmen utvärderades empiriskt via tidsstämpling funktionen (`micros()`) under mjukvaruprofilering, vilket reflekterar de verkliga prestanda skillnaderna mellan arkitekturerna. (Se **Tabell 5**, där ESP32-S3 exekverar FFT-analysen på 1,5 ms jämfört med 6,5 ms för ESP32-C3)

Viktigt att notera att i beräkningar sker följande: approximationen av DS18B20:s konverteringsfas (94 ms) med systemets viloström, den 2,0 ms korta RTC-baserade uppvakningen som exkluderar ROM-bootloaderns fördröjning på 10–50 ms, samt exkluderingen av de obligatoriska mottagningsfönstren RX1 och RX2 för Klass A-enheter.

5.2 Val av Mikrokontroller (RISC-V vs Xtensa)

Den första frågeställningen i detta arbete syftade till att utvärdera hur valet av processorarkitektur påverkar exekveringstiden för digital signalbehandling, med fokus på Fast Fourier Transform (FFT). Utifrån insamlad data i Tabell 5 framgår det tydligt att Xtensa-arkitekturen i ESP32-S3 besitter en mätbar fördel vid ren beräkningskapacitet. Med

en exekveringstid på 1,5 ms för FFT-beräkningen är den avsevärt snabbare än de RISC-V-baserade alternativen, där ESP32-C6 kräver cirka 6 ms för samma operation. Denna prestandaskillnad kan härledas till Xtensa-kärnans arkitektoniska stöd för hårdvaruaccelererade vektorinstruktioner och DSP-tillägg, vilket saknas i de mer strömsnåla RISC-V-kärnorna.

När dessa värden sätts i ett systemkontext blir dock beräkningsfördelen sekundär. Systemets största tidsmässiga flaskhals är den perifera IR-sensorns analoga insamlingstid, vilken uppgår till hela 1285 ms (Tabell 5). Under denna tid måste mikrokontrollern förbli i aktivt läge för att ta emot sensordata. Den tidsskillnad på 4,5 ms som Xtensa-arkitekturen sparar in under själva FFT-beräkningen utgör därmed mindre än 0,4 % av den totala vakentiden (~1,4 sekunder per cykel). Slutsatsen blir att för denna specifika tillämpning – där systemet är extremt I/O-bundet av långsamma perifera sensorer – ger en högpresterande arkitektur med DSP-tillägg ingen reell prestandavinst i praktiken. Beräkningshastigheten är helt enkelt inte den begränsande faktorn för systemets runda.

5.3 Schemaläggning, driftlägen och duty cycling-parametrar

De återstående frågeställningarna berörde hur mjukvarans driftlägen och samplingsfrekvenser bäst konfigureras för att maximera batteritiden utan att äventyra säkerhetsfunktionen. Analysen av Tabell 6 visar att ESP32-S3 har den lägsta djupsömnströmmen (0,024 mA mot ESP32-C6:s 0,025 mA). Trots detta faller S3 ut som det minst energieffektiva valet i den totala livslängdsanalysen (Tabell 7). Förklaringen ligger i dess aktiva strömförbrukning. När enheten är vaken drar ESP32-S3 101,5 mA vid larmtillstånd, medan ESP32-C6 drar 86,5 mA. Eftersom den perifera sensorn tvingar mikrokontrollern att vara vaken under en relativt lång period blir den aktiva förbrukningen den dominanta faktorn i energibudgeten. ESP32-C6 vinner därmed på sin förmåga att hålla nere strömmen under den långa mät- och sändningsfasen.

När det gäller parametriseringen av *duty cycling* belyser Tabell 9 en kritisk kompromiss mellan autonom drifttid och systemets latens (reaktionstid). Om enheten konfigureras med ett mätintervall på 5 sekunder, vilket vore optimalt ur ett strikt brandsäkerhetsperspektiv för att snabbt upptäcka en termisk avvikelse på en spis, blir den teoretiska livslängden endast cirka 25 dagar med ett 1500 mAh batteri. Detta är inte kommersiellt eller praktiskt gångbart för en fristående konsumentprodukt. När mätintervallen (*duty cycling*) förlängs, exempelvis till 15

minuter (900 sekunder i Scenario 3), minskar systemets genomsnittliga strömförbrukning till endast **0,036 mA**. Den rent ideala beräkningen ger en teoretisk drifttid på drygt 3,8 år (1389 dagar). I ett sådant utdraget tidsperspektiv kan dock batteriets kemiska självurladdning inte längre försummas, eftersom den interna energiförlusten överstiger systemets faktiska förbrukning.

Ett standard Li-Po-batteri uppvisar en självurladdning på cirka **3–5 % per månad**. Om vi applicerar ett konservativt värde på 5 % per månad på ett 1500 mAh batteri, motsvarar detta en kapacitetsförlust på 75 mAh per månad. Omvandlat till en kontinuerlig ekvivalent läckström ($I_{\text{Self-Discharge}}$) för en standard månad (30 dagar, 720 timmar) blir beräkningen:

$$I_{\text{Self-Discharge}} = 75 \text{ mAh} / 720 \text{ h} \approx 0,104 \text{ mA}$$

Den totala effektiva strömförbrukningen (I_{Total}) måste därmed definieras som summan av systemets förbrukning och batteriets självurladdning:

$$I_{\text{Total}} = 0,036 \text{ mA} + 0,104 \text{ mA} = 0,140 \text{ mA}$$

När den användbara batterikapaciteten på 1200 mAh (80 % DoD av 1500 mAh) istället divideras med denna totala ekvivalenta ström, reduceras den förväntade livslängden drastiskt:

$$T_{\text{Runtime}} = 1200 \text{ mAh} / 0,140 \text{ mA} \approx 8571 \text{ timmar} \approx 357 \text{ dagar}$$

Denna kalkylering demonstrerar att systemets faktiska livslängd i scenariot med 15 minuters intervall sjunker från 3,8 år till knappt 1 år. Denna drifttid begränsas dessutom ytterligare av Li-Po batteriets generella hylltid (shelf life), som dikterar att cellen av rent kemiskt åldrande degraderar kraftigt efter 2–3 år. Slutsatsen är att optimering via extrem duty cycling förlorar sin verkan om batterikemin i sig agerar som den primära energiförbrukaren.

Ifall systemet ska väckas oftare än varje 900 sekunder så finns det flera vägar till att optimera batteritiden samt tillförlitligheten av enheten.

En tänkbar lösning är att implementera ett adaptivt "Double Wake"- eller tröskelbaserat schema. Enheten skulle kunna vakna med låg frekvens (t.ex. var femte minut) i ett viloläge, men om den integrerade temperatursensorn (t.ex. DS18B20) eller IR-sensorn upptäcker en gradientförändring över ett visst gränsvärde, skiftar mjukvaran omedelbart till ett högfrekvent

mätläge (t.ex. var 5:e sekund) tills faran är överblåst. På så sätt förbrukas den tunga aktiva energin endast när en faktisk indikation på matlagning eller termisk aktivitet föreligger.

5.4 Batterijämförelse och alternativa lösningar

Jämförelse av användbar kapacitet vid normal drift (Li-Po vs Alkaliskt)

Vid en mätcykel på 5 sekunder beräknas systemets genomsnittliga strömförbrukning till cirka 2,40 mA. I den primära designen valdes ett Li-Po-batteri på 1500 mAh. För att göra en objektiv utvärdering gentemot traditionella alkaliska AA-batterier (exempelvis Zn-MnO₂ med en nominell kapacitet på cirka 2500 mAh) måste hänsyn tas till batteriernas respektive tillåtna urladdningsdjup (DoD).

Ett 1500 mAh Li-Po-batteri kan på ett säkert sätt utnyttjas till 80 %, vilket resulterar i en praktiskt användbar kapacitet på 1200 mAh. Detta ger en teoretisk drifttid på cirka 21 dagar (1200 mAh / 2,40 mA). Två seriekopplade alkaliska batterier kan, på grund av sin specifika urladdningskurva, typiskt sett endast utnyttjas till cirka 50 % i en applikation med pulslaster innan spänningen per cell sjunker till en kritisk gräns på 1,15 V. Detta ger en användbar kapacitet på 1250 mAh och därmed en nästan identisk drifttid på drygt 21 dagar (1250 mAh / 2,40 mA). Den tillgängliga energi som faktiskt kan driva mikrokontrollern är alltså mycket likvärdig mellan de två teknologierna. Självurladdningen för båda batterityperna är försumbar i detta intensiva scenario då batteriet töms på under en månad.

Hantering av alkaliska batteriers spänningsfall

Alkaliska batterier medför dock ett kritiskt maskinvaruproblem. När LoRa-modulen aktiveras uppstår korta strömspikar på uppemot 120–200 mA. På grund av alkaliska batteriers höga inre resistans leder detta till ett kraftigt momentant spänningsfall (voltage sag). Om spänningen sjunker under den tröskel på 3,0 V som krävs av ESP32-arkitekturen, riskerar systemet en ofrivillig omstart (brown-out reset) trots att majoriteten av batteriets energi finns kvar.

För att mitigera detta problem kan en etablerad maskinvarulösning tillämpas: att placera kondensatorer (exempelvis väl tilltagna avkopplingskondensatorer eller en superkondensator) parallellt med batterimatningen. Kondensatorn agerar som en extremt snabb energibuffert som sväljer den korta LoRa-strömspiken på 50 ms och stabiliserar spänningen. För att dessutom maximera energiuttaget när batteriernas vilospänning successivt sjunker ner mot 1,8 V totalt (0,9 V per cell), kan systemet kompletteras med en Buck/Boost-omvandlare istället för en enkel LDO-regulator. Även om omvandlaren introducerar en effektivitetsförlust (10–15 %) och en ökad viloström, eliminerar kombinationen av omvandlare och kondensatorer spänningsfallet helt, vilket gör alkaliska batterier till ett robust alternativ.

Långtidsdrift och påverkan av självurladdning

Den stora fördelen med alkaliska batterier framträder i applikationer med extrem duty cycling. Som beräknats i avsnitt 5.3 sjunker Li-Po-batteriets faktiska drifttid i 15-minutersscenariot till cirka 357 dagar primärt på grund av en kemisk självurladdning på 3–5 % per månad.

Som jämförelse har alkaliska batterier en exceptionellt låg självurladdning på endast cirka 3 % per år. Om vi räknar med ett kapacitetsbortfall på 3 % av 2500 mAh över ett helt år (8760 timmar), får vi en ekvivalent läckström ($I_{\text{Self-Discharge-Alkaline}}$) på:

$$I_{\text{Self-Discharge-Alkaline}} = 75 \text{ mAh} / 8760 \text{ h} \approx 0,0085 \text{ mA}$$

Med systemets genomsnittliga strömförbrukning på 0,036 mA i 15-minutersscenariot, blir den totala ekvivalenta belastningen:

$$I_{\text{Total-Alkaline}} = 0,036 \text{ mA} + 0,0085 \text{ mA} = 0,0445 \text{ mA}$$

Givet den användbara kapaciteten på 1250 mAh (50 % av 2500 mAh till 1,15 V per cell) blir den teoretiska livslängden för den alkaliska lösningen:

$$T_{\text{Runtime-Alkaline}} = 1250 \text{ mAh} / 0,0445 \text{ mA} \approx 28090 \text{ timmar} \approx 1170 \text{ dagar} \approx 3,2 \text{ år}$$

Denna jämförelse visar objektivt att medan Li-Po-batteriet erbjuder en smidigare formfaktor och inbyggd tolerans mot strömspikar, är en alkalisk lösning (försedd med kondensatorer) teoretiskt överlägsen för flerårig, underhållsfri drift – 3,2 år jämfört med Li-Po-batteriets knappa 1 år.

6. Slutsats

Detta examensarbete har utvärderat energitillgänglighet och arkitekturval för en autonom, batteridrivnen branddetektionsenhet avsedd för köksmiljöer. Baserat på de analytiska modellerna och de empiriska tidsmätningarna kan följande slutsatser dras:

- **ESP32-C6 är den bäst lämpade plattformen:** Trots att ESP32-S3 uppvisar marginellt lägre strömförbrukning i djupsömn, gör dess höga aktiva strömförbrukning (101,5 mA) den olämplig för tillämpningar med långa vakentider. ESP32-C6 erbjuder den bästa övergripande energibalansen med en djupsömnström på 0,025 mA och en aktiv förbrukning på 86,5 mA.
- **Periferins hårdvara dikterar energibudgeten:** Valet av processorarkitektur (RISC-V kontra Xtensa) och dess beräkningsprestanda vid digital signalbehandling (FFT) har en försumbar inverkan på batteritiden. Den perifera IR-sensors inneboende insamlingstid på 1285 ms utgör systemets primära flaskhals och tvingar mikrokontrollern att förbli i ett aktivt, energikrävande läge oavsett beräkningshastighet.
- **Statiska intervall är otillräckliga:** Ett fast mätintervall kan inte tillgodose kraven på både hög brandsäkerhet och lång batteritid. Ett tätt intervall (5 sekunder) tömmer batteriet på 25 dagar, medan ett långt intervall (15 minuter) ger 3,8 års livslängd men medför en livsfarlig fördröjning i larmkedjan. Framtida system bör tillämpa adaptiv duty cycling där samplingsfrekvensen styrs dynamiskt av miljödata.

7. Framtida utvecklingsmöjligheter

Det utvecklade systemet demonstrerar en tillförlitlig grundfunktion för proaktiv branddetektion genom kombinationen av infraröd sensorteknik och frekvensanalys. För att kommersialisera plattformen eller öka dess tillförlitlighet i komplexa miljöer identifieras dock flera områden för framtida vidareutveckling.

7.1 Sensorfusion och avancerad riskmodellering

Det nuvarande systemet förlitar sig primärt på en kombination av en punktmätande infraröd sensor (MLX90614) och en digital temperatursensor (DS18B20). I industriella eller storskaliga köksmiljöer bör framtida forskning undersöka integrationen av sensorfusion. Det optiska flimmerdetektion kan kompletteras med halvledarbaserade gassensorer för detektering av kolmonoxid (CO), koldioxid (CO₂) samt flyktiga organiska föreningar (VOC) kan en multikriterie riskmodell etableras.

7.2 Edge AI och maskininlärning (TinyML)

Den implementerade algoritmen baseras på en fastställd tröskelmetod där spektralenergin inom frekvensbandet 5-20 Hz summeras. Detta effektivt filtrerar bort störningskällor, men dynamiska men ofarliga händelser såsom snabba handrörelser framför spisen eller flamberingen kan aktivera spiken som krävs för att generera ett falsklarm. Edge AI kan implementeras via ramverket TinyML för resursbegränsade inbyggda system. Träning av ett lättviktigt artificiella neuronnät (ANN) eller en stödvektormaskin (SVM) direkt på mikrokontrollern skulle systemet kunna lära sig att klassificera komplexa tidsserier av sensordata. Detta skulle möjliggöra en exakt diskriminering mellan specifika matlagningsmönster och faktiska brandförlopp.

7.3 Hårdvaruoptimering via Ultra-Low-Power (ULP)

I den nuvarande mjukvaruarkitekturen väcks mikrokontrollers huvudprocessor periodiskt för att läsa av sensorerna, vilket genererar transienta strömspikar. ESP32-S3 och ESP32-C6 plattformarna har tillgång till en dedikerad ultralåg effektprocessor (ULP-core) integrerad på chipnivå. Framtida mjukvaruoptimering bör fokusera på att flytta hela datainsamlingsfasen och I2C-kommunikationen med IR-sensorn till denna ULP-kärna. Huvudprocessen skulle därmed kunna förbli i djupsömn oavbrutet fram till att ULP-kärnan detekterar en kritisk tröskelöverträdelse och genererar ett hårdvaruavbrott (interrupt). En sådan implementering uppskattas kunna reducera den genomsnittliga strömförbrukningen ytterligare, vilket potentiellt skulle förlänga batterilivslängden till att sträcka sig över flera år.

8. Reflektion över etiska aspekter

Utvecklingen och distributionen av autonoma övervakningssystem i privata sfärer reser fundamentala etiska frågeställningar som kräver noggrann belysning. Detta rör främst personlig integritet, datasäkerhet samt systemtillförlitlighet i relation till personfara.

8.1 Personlig integritet och dataövervakning i hemmet

Det proaktiva brandlarmet är avsett för kontinuerlig övervakning i bostäder, vilket även uppsätter en utmaning i bearbetningen av datan som samlas in. Den tidsdiskreta data om individers dagliga vanor, närvaro och matlagningsbeteenden kan kränka den personliga integriteten om den faller i orätta händer. Även om systemet inte registrerar optiska bilder eller ljud. Det finns ett etiskt krav på dataeliminering; rådata i form av samplingsblock måste bearbetas omedelbart i mikrokontrollers flyktiga minne (RAM) och får inte aggregeras eller lagras permanent. Tillämpningen av edge computing garanterar att endast binära statusrapporter eller larmindikationer lämnar den fysiska enheten, vilket eliminerar övervakningaspekten.

8.2 Datasäkerhet och kryptering vid trådlös överföring

En sårbarhet för avlyssning eller externa cyberattacker kan uppstå när data överförs trådlöst via LoRaWAN eller Wi-Fi. Sabotering av infrastrukturen samt sändning av falsklarm hade kunnat uppstå om en skadlig aktör lyckas manipulera nätverkstrafiken. Ur ett etiskt och säkerhetsmässigt perspektiv är det därför obligatoriskt att tillämpa rigorösa kryptografiska protokoll. Vid LoRaWAN-kommunikation måste hårdvarubaserad AES-128-kryptering med unika sessionnycklar användas för att säkerställa dataintegritet och konfidentialitet mellan ändnoden och nätverksservern.

8.3 Systemtillförlitlighet och risken för falsk trygghet

En kritisk etisk aspekt rör systemets tillförlitlighet. Eftersom algoritmen är proaktiv och fattar beslut baserat på statistisk frekvensanalys, finns det alltid en teoretisk sannolikhet för falska negativa utfall. Dual-use eller felaktig tillit till ett icke-certifierat system kan invagga boende i en falsk trygghet, vilket i värsta fall kan leda till livsfara om traditionella, rökdetekterande brandvarnare monteras ned. Det är därför av största vikt att systemet tydligt definieras som ett komplementärt skyddssystem för tidig varning, och inte som en ersättning för lagstadgad säkerhetsutrustning. Utvecklaren har ett etiskt ansvar att genom omfattande simuleringar och valideringar verifiera algoritmens robusthet innan systemet introduceras i miljöer där mänskliga liv är beroende av dess funktion.

9. Referenser

- [1] Brandskyddsföreningen, "Så här förebygger du en brand i din bostad," 2023. [Online]. Tillgänglig: <https://www.brandskyddsforeningen.se/brandsakerhet-i-hemmet/sa-har-forebygger-du-en-brand-i-din-bostad/>
- [2] SAFT, "Which types of batteries for you IoT devices?," 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://saft.com/en/energizing-iot/types-batteries-iot-devices>
- [3] C. Gabañach et al., "Navigating Battery Choices in IoT: An Extensive Survey of Technologies and Their Applications," Batteries, vol. 9, nr. 12, s. 580, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries9120580>
- [4] NICHICON, "Energy Storage for IoT," 2023. [Online]. Tillgänglig: <https://www.nichicon.com/en-us/news-and-resources/white-papers/energy-storage-for-iot/>
- [5] P. Phogat et al., "Powering the sustainable future: a review of emerging battery technologies and their environmental impact," Sustainability, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1039/d5su00127g>
- [6] Espressif Systems, "Current Consumption Measurement of Modules," 2026. [Online]. Tillgänglig: <https://docs.espressif.com>
- [7] Motoma.com, "3.7V LiPo Battery Explained - How to Choose, How it Works and Where It's Used," 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://www.motoma.com>
- [8] A. Rodríguez et al., "A Comparative Analysis of Lithium-Ion Batteries Using a Proposed Electrothermal Model Based on Numerical Simulation," World Electric Vehicle Journal, vol. 16, nr. 2, s. 60, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj16020060>
- [9] Programming Electronics, "A Practical Guide to ESP32 Deep Sleep Modes," 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://www.programmingelectronics.com>
- [10] XIAO, "Getting Started with Seeed Studio XIAO ESP32C6", 2024. [Online]. Tillgänglig: https://wiki.seeedstudio.com/xiao_esp32c6_getting_started/

- [11] Qoitech, "Choosing the right battery for IoT devices," 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://www.qoitech.com>
- [12] SAFT, "The Impact of the Temperature on your IoT application's power consumption," 2021. [Online]. Tillgänglig: <https://saft.com>
- [13] W. Shen et. al, "Heat Generation and Degradation Mechanism of Lithium-Ion Batteries during High-Temperature Aging," PMC, 2022. DOI: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c04093>
- [14] SAFT, "Temperature and Batteries for IoT what you need to know," 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://saft.com/en/energizing-iot/temperature-and-batteries-iot-what-you-need-know>
- [15] Chalmers Tekniska Högskola, "Battery Management Systems for Lithium-Ion Batteries," Chalmers, Gothenburg, 2012. [Online]. Tillgänglig: <https://publications.lib.chalmers.se>
- [16] H. Luo et. al, "Lithium-Ion Batteries under Low-Temperature Environment: Challenges and Prospects," Molecules, vol. 12, nr. 4, 2022. DOI: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/22/8166>
- [17] P. Arora, R. E. White and M. Doyle, "Capacity Fade Mechanisms and Side Reactions in Lithium-Ion Batteries," Journal of The Electrochemical Society, vol. 145, nr. 10, s. 3647-3667, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1838820>
- [18] Jauch Battery, "Guide to the design of Lithium Polymer Batteries," BCE, 2019. [Online]. Tillgänglig: <https://www.bce.it>
- [19] Texas Instruments, "Achieve extremely long battery life in wireless sensor nodes," 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://www.ti.com>
- [20] M. Kaliaperumal et. al, "Cause and Mitigation of Lithium-Ion Battery Failure - A Review," PMC, 2021. DOI: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/19/5676>
- [21] Z. Chen et. al, "Thermal Runaway in Lithium-Ion Batteries: A Review of Mechanisms, Prediction Approaches, and Mitigation Strategies," Batteries, vol. 12, nr. 3, s. 88, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries12030088>

- [22] Espressif Systems, "ESP32-S3 Series Datasheet Version 2.2," 2026. [Online]. Tillgänglig: <https://www.espressif.com>
- [23] Espressif Systems, "ESP32-C3 Series Datasheet Version 2.3," 2026. [Online]. Tillgänglig: <https://www.espressif.com>
- [24] Espressif Systems, "ESP32-C6 Series Datasheet Version 1.5," 2026. [Online]. Tillgänglig: <https://www.espressif.com>
- [25] M. Udurume et. al, "Developing a Fire Monitoring System Based on MQTT, ESP-NOW, and a REM in Industrial Environments," Applied Sciences, vol. 15, nr. 2, s. 500, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15020500>
- [26] A. P. Navik et al., "RISC-V: Redefining the Future of Computing, Architecture, Innovations, and Beyond," IEMENTech, s. 1-5, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMENTech65115.2025.10959584>
- [27] VDMA, "Technology WLAN IEEE 802.11ax, Wi-Fi 6 6E," 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://vdma.eu>
- [28] Nordic Semiconductor, "nRF52840 Product Specification v1.9," 2026. [Online]. Tillgänglig: https://docs.nordicsemi.com/bundle/nRF52840_PS_v1.9/resource/nRF52840_PS_v1.9.pdf
- [29] S. Thapa et al., "The thermopile: An anisotropic temperature sensor," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 180, s. 63-70, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.03.020>
- [30] J. Schieferdecker et al., "Infrared thermopile sensors with high sensitivity and very low temperature coefficient," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 47, nr. 1-3, s. 422-427, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(94\)00993-3](https://doi.org/10.1016/0924-4247(94)00993-3)
- [31] A. W. van Herwaarden et al., "Integrated Thermopile Sensors," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 22, nr. 1-3, s. 621-630, 1989. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(89\)80046-5](https://doi.org/10.1016/0924-4247(89)80046-5)
- [32] N. Argirusis et al., "IR Sensors, Related Materials, and Applications," Sensors, vol. 25, nr. 3, s. 673, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25030673>

- [33] Johnson Controls, "Flame Detection Application Manual," 2020. [Online]. Tillgänglig: https://www.johnsoncontrols.com/-/media/project/jci-global/johnson-controls/us-region/united-states-johnson-controls/insights/files/2020/flame_detection_application_manual.pdf
- [34] C. Hanshans, "IoT on an ESP32: Optimization Methods Regarding Battery Life and Write Speed to an SD-Card," ResearchGate, 2023. [Online]. Tillgänglig: <https://www.researchgate.net/publication/369763204>
- [35] A. Mishra, "Preventing Thermal Runaway Propagation in Lithium-Ion Batteries: A Holistic Review of Materials, Systems, and Predictive Strategies," 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://www.researchgate.net/publication/392403229>
- [36] Z. Cao et. al, "Wireless Battery Management Systems: Innovations, Challenges, and Future Perspectives," Energies, vol. 17, nr. 13, s. 3277, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17133277>

10. Appendix

Bilaga A:

```
#include <RadioLib.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MLX90614.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// --- PIN-DEFINITIONER FÖR ESP32-C6 ---
#define LORA_NSS      D7
#define LORA_DIO1     D1
#define LORA_NRST     D0
#define LORA_BUSY     D3

#define ONE_WIRE_BUS D2
#define I2C_SDA       D4
#define I2C_SCL       D5

// --- OBJEKT ---
SX1262 radio = new Module(LORA_NSS, LORA_DIO1, LORA_NRST, LORA_BUSY);
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature ds18b20(&oneWire);
Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();

// --- SCENARIO-KONFIGURATION ---
// Ändra denna variabel till 1, 2 eller 3 för att testa de olika scenarierna i
// uppsatsen
const int CURRENT_SCENARIO = 1;

// Variabel för Duty Cycling (Scenario 3 ändrar denna)
uint64_t timeToSleep_us = 5000000; // Standard 5 sekunder i mikrosekunder

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  while(!Serial); // Kommentera bort detta i skarp batteridrift

  Serial.println("Vaknar från Deep Sleep...");
  unsigned long wakeUpTime = micros();

  // 1. Initiera kommunikation (MLX90614 har redan ström via 3.3V-railen)
  ds18b20.begin();
  Wire.begin(I2C_SDA, I2C_SCL);
```

```

    if (!mlx.begin()) {
        Serial.println("Fel: MLX90614 hittades inte på I2C-bussen.");
    }

    // 2. Initiera LoRa enligt examensarbetet (SF7, ABP, ingen ACK)
    int state = radio.begin(868.0, 125.0, 7, 5, 0x12, 10, 8, 1.6, false);
    if (state != RADIOLIB_ERR_NONE) {
        Serial.print("LoRa-fel: "); Serial.println(state);
    }

    // Kör logiken baserat på valt scenario
    runScenarioLogic();

    // 3. Analys av total aktiv tid
    unsigned long goToSleepTime = micros();
    unsigned long totalActiveTime = goToSleepTime - wakeUpTime;
    Serial.print("Total exekveringstid innan djupsömn: ");
    Serial.print(totalActiveTime);
    Serial.println(" us");

    // 4. Förbered mikrokontrollern för Deep Sleep
    // Vi lämnar I2C-pinnarna högimpediva (INPUT) för att undvika strömläckage genom
    pull-up-motstånden
    Wire.end();
    pinMode(I2C_SDA, INPUT);
    pinMode(I2C_SCL, INPUT);
    radio.sleep(); // Sätt LoRa i sleep (<1 uA)

    Serial.print("Går i djupsömn i ");
    Serial.print(timeToSleep_us / 1000000);
    Serial.println(" sekunder.");
    Serial.flush();

    // Starta Deep Sleep (Systemet startar om från setup() nästa gång)
    esp_sleep_enable_timer_wakeup(timeToSleep_us);
    esp_deep_sleep_start();
}

void loop() {
    // Tom. Deep sleep hoppar alltid tillbaka till setup()
}

// --- FUNKTIONER FÖR SCENARIER ---

void runScenarioLogic() {

```

```

switch (CURRENT_SCENARIO) {

case 1: {
    // SCENARIO 1: Normal drift (Enbart temperaturmätning) - 5 sekunders intervall
    Serial.println("--- KÖR SCENARIO 1 ---");
    timeToSleep_us = 5000000;

    // Mätning
    ds18b20.requestTemperatures();
    float tempDS = ds18b20.getTempCByIndex(0);
    float tempMLX_amb = mlx.readAmbientTempC();

    // Skicka Data (Liten payload)
    String payload = "S1:" + String(tempDS) + "," + String(tempMLX_amb);
    sendLoRaData(payload);
    break;
}

case 2: {
    // SCENARIO 2: Spik detekteras (Simulerar 128 sampel + fouriertransform)
    Serial.println("--- KÖR SCENARIO 2 ---");
    timeToSleep_us = 5000000;

    unsigned long samplingStart = micros();

    // Simulera insamling av 128 sampel i 100Hz
    float ir_samples[128];
    for(int i = 0; i < 128; i++) {
        ir_samples[i] = mlx.readObjectTempC();
        delay(10); // 10ms mellanrum = 100Hz
    }
    unsigned long samplingEnd = micros();

    Serial.print("IR-Samplingstid (128 sampel): ");
    Serial.print(samplingEnd - samplingStart);
    Serial.println(" us");

    // Simulering av FFT (fouriertransform)
    unsigned long fftStart = micros();
    delay(6); // Beräknad tid för FFT på C6 (ca 6ms)
    unsigned long fftEnd = micros();

    Serial.print("FFT Exekveringstid: ");
    Serial.print(fftEnd - fftStart);
    Serial.println(" us");
}
}

```

```

    // Skicka larm (Payload)
    String payload = "ALARM! SPIK DETEKTERAD";
    sendLoRaData(payload);
    break;
}

case 3: {
    // SCENARIO 3: Optimeringsutvärdering (Duty Cycling)
    Serial.println("--- KÖR SCENARIO 3 ---");

    // Ändra detta intervall manuellt för testerna (1, 5 eller 10 sekunder)
    int testInterval_seconds = 10;
    timeToSleep_us = testInterval_seconds * 1000000ULL;

    ds18b20.requestTemperatures();
    float tempDS = ds18b20.getTempCByIndex(0);

    String payload = "S3:DC_" + String(testInterval_seconds) + "s," +
String(tempDS);
    sendLoRaData(payload);
    break;
}
}

void sendLoRaData(String payload) {
    Serial.print("Sänder payload: ");
    Serial.println(payload);

    unsigned long txStart = micros();
    int state = radio.transmit(payload); // Blockeras tills sändningen lämnat antennen
    unsigned long txEnd = micros();

    if (state == RADIOLIB_ERR_NONE) {
        Serial.print("LoRa Sändningstid (Time-on-Air): ");
        Serial.print(txEnd - txStart);
        Serial.println(" us");
    } else {
        Serial.print("Sändning misslyckades. Kod: ");
        Serial.println(state);
    }
}

```

OBS!

Viktigt att notera att i ArduinoIDE var boarden satt till XIAO_ESP32C6 för att koden ska kunna verifieras och kompileras