



JÖNKÖPING UNIVERSITY  
*School of Engineering*

# Dataöverföring med Bluetooth 5

En jämförelse mellan Classic och Low Energy  
vad beträffar prestanda

HUVUDOMRÅDE: *Datateknik*

**FÖRFATTARE:** John Bergelin och Felix Ericsson

**HANDLEDARE:** Sigurd Israelsson

JÖNKÖPING 2019 juli

Detta examensarbete är utfört vid Tekniska Högskolan i Jönköping inom Datateknik – Inbyggda system. Författarna svarar själva för framförda åsikter, slutsatser och resultat.

Examinator: Anders Adlemo

Handledare: Sigurd Israelsson

Omfattning: 15 hp (grundnivå)

Datum: 2019-07-08

Postadress:  
Box 1026  
551 11 Jönköping

Besöksadress:  
Gjuterigatan 5

Telefon:  
036-10 10 00 (vx)

## **Förord**

Detta arbete har varit mycket givande och intressant att genomföra. Det hade dock varit väldigt tufft utan det stöd vi fått från människor i vår närhet under resans gång. Vi vill passa på att tacka några väl utvalda personer för den hjälp ni bidragit med:

Sigurd Israelsson, Jerry Svensson, Magnus Petersson och Andreas Axelsson.

Vi vill även ägna ett tack till våra nära och kära som stöttat och funnits där för oss under detta halvår.

Tack!

## **Abstract**

A comparative study between the techniques Bluetooth Low Energy and Bluetooth Classic has been performed in cooperation with Saab AB with the purpose to determine which technique is best suited for transmission of data between an Android unit and an embedded system. The parameters that has been analyzed are throughput, energy efficiency and susceptibility. The study has been performed in accordance with the method Design Science Research and has therefore produced an artefact in the form of a system that has been evaluated in an experiment where performance parameters have been measured and analyzed. The results show that BLE is more robust in environments with a high level of noise and can handle lower SNR levels than BR/EDR; 3 dB vs 7,5 dB. If enough transfer speed is reached, BLE would also give the best energy efficiency and if the specified maximum throughput is reached, BLE would, according to this study, have more than double the energy efficiency as BR/EDR. BLE is, according to most measures, preferable from Bluetooth version 5 and is future-proof but BR/EDR still provides the highest throughput.

## Sammanfattning

I samarbete med Saab AB har en jämförande studie gjorts mellan teknikerna Bluetooth Low Energy och Bluetooth Classic med syftet att avgöra vilken av dessa som lämpar sig bäst för implementationer där data skall överföras från en Androidenhet till ett inbyggt system. De parametrar som undersökts är överföringshastighet, energieffektivitet samt störningskänslighet. Studien har utförts enligt metoden Design Science Research vilket har lett till utvecklingen av en artefakt i form av ett system som sedan utvärderats i ett experiment där prestandaparametrarna mätts och analyserats. Resultaten visar att BLE är robustare i störningstäta miljöer än BR/EDR och klarar betydligt lägre SNR-nivåer; 3 dB respektive 7,5 dB. Om tillräckligt hög hastighet uppnås ger BLE även bäst prestanda gällande energieffektivitet och om den specificerade maxhastigheten uppnås bör BLE, enligt denna studies resultat, ha mer än dubbelt så hög energieffektivitet som BR/EDR. BLE är, enligt de flesta måtten, att föredra i och med Bluetooth version 5 och har framtiden för sig men BR/EDR tillhandahåller fortfarande högst överföringshastighet.

# Innehållsförteckning

<b>I</b>	<b>Introduktion .....</b>	<b>1</b>
1.1	BAKGRUND .....	1
1.2	PROBLEMBESKRIVNING .....	2
1.3	SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR.....	3
1.4	OMFÅNG OCH AVGRÄNSNINGAR .....	4
1.5	DISPOSITION .....	4
<b>2</b>	<b>Metod och genomförande.....</b>	<b>5</b>
2.1	KOPPLING MELLAN FRÅGESTÄLLNINGAR OCH METOD .....	5
2.2	ARBETSPROCESSEN .....	5
2.3	ANSATS.....	5
2.4	DESIGN.....	6
2.5	UTVECKLINGSPROCESSEN .....	7
2.6	DATAINSAMLING .....	7
2.6.1	Förstudie.....	7
2.6.2	Experiment .....	8
2.7	DATAANALYS .....	11
2.8	TROVÄRDIGHET .....	12
<b>3</b>	<b>Tekniskt ramverk .....</b>	<b>13</b>
3.1	BLUETOOTH.....	13
3.2	BLUETOOTH CLASSIC .....	13
3.2.1	Controller.....	14
3.2.2	Host.....	15
3.3	BLUETOOTH LOW ENERGY .....	15
3.3.1	Controller.....	15
3.3.2	Host.....	16
<b>4</b>	<b>Teoretiskt ramverk .....</b>	<b>18</b>
4.1	KOPPLING MELLAN FRÅGESTÄLLNINGAR OCH TEORI .....	18
4.2	TIDIGARE FORSKNING.....	18
<b>5</b>	<b>Empiri .....</b>	<b>20</b>
5.1	ÖVERFÖRINGSHASTIGHET .....	20

5.2	ENERGIEFFEKTIVITET .....	21
5.3	STÖRNINGSKÄNSLIGHET.....	23
<b>6</b>	<b>Analys.....</b>	<b>25</b>
6.1	HUR FÖRHÅLLER SIG BR/EDR OCH BLE TILL VARANDRA MED AVSEENDE PÅ ÖVERFÖRINGSHASTIGHET, ENERGIEFFEKTIVITET OCH STÖRNINGSKÄNSLIGHET VID DATAÖVERFÖRING I OLIKA SIGNALFÖRHÅLLANDEN?.....	25
6.1.1	Överföringshastighet .....	25
6.1.2	Energieffektivitet .....	26
6.1.3	Störningskänslighet.....	27
6.2	VILKA LIKHETER ELLER SKILLNADER I MÄTRESULTAT KAN PÅVISAS MELLAN TIDIGARE FORSKNING OCH STUDIEN KRING UTVÄRDERINGAR AV BLE - BR/EDR MED AVSEENDE PÅ ÖVERFÖRINGSHASTIGHET, ENERGIEFFEKTIVITET OCH STÖRNINGSKÄNSLIGHET?.....	27
<b>7</b>	<b>Diskussion och slutsats .....</b>	<b>29</b>
7.1	RESULTAT.....	29
7.1.1	Hur förhåller sig BR/EDR och BLE till varandra med avseende på överföringshastighet, energieffektivitet och störningskänslighet vid dataöverföring i olika signalförhållanden? .....	29
7.1.2	Vilka likheter eller skillnader i mätresultat kan påvisas mellan tidigare forskning och studien kring utvärderingar av BLE - BR/EDR med avseende på överföringshastighet, energieffektivitet och störningskänslighet?.....	29
7.2	IMPLIKATIONER .....	30
7.3	BEGRÄNSNINGAR.....	30
7.4	SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER .....	30
7.5	VIDARE FORSKNING.....	30
<b>8</b>	<b>Referenser .....</b>	<b>31</b>
<b>9</b>	<b>Bilagor.....</b>	<b>33</b>
	BILAGA 1 .....	34

# 1 Introduktion

Kapitlet ger en bakgrund till studien och det problemområde som studien byggts upp kring. Vidare presenteras studiens syfte och dess frågeställningar. Därtill beskrivs studiens omfång och avgränsningar. Kapitlet avslutas med rapportens disposition.

## 1.1 Bakgrund

De allra flesta elektroniska produkter som finns på marknaden innehåller någon form av mjukvara som sköter deras funktionalitet. Denna mjukvara behöver då och då uppdateras, antingen för att erhålla utökad funktionalitet eller för att täppa till eventuella säkerhetshål som upptäckts. Inte sällan innebär detta att slutkunden är den som måste uppdatera enheten. Storleken på det datapaket som behöver överföras kan variera kraftigt. Storlekar från bråkdelar av en kilobyte upp till flertalet gigabyte är inte ovanliga. Av dessa anledningar är det av stor vikt att implementera ett gränssnitt som är både smidigt och lättåtkomligt för användaren att bruka samt som kan hantera mängden data på ett effektivt vis.

Tillverkare av elektronisk utrustning av sådan typ som innehåller mjukvara har valet att antingen göra överföringsmetoden trådbunden eller trådlös. När det gäller trådbunden överföring har seriella gränssnitt som RS-232 och parallella sådana, t.ex. IEEE1284, varit populära historiskt sett men på senare tid har USB och Ethernet tagit över och dominerar nu marknaden. På den trådlösa sidan används tekniker som WiFi, ZigBee och Bluetooth. Även IR har använts tidigare men då det kräver att sändare och mottagare befinner sig inom varandras synfält samt att förflyttning under överföringen lätt bidrar till att sändningen avbryts och måste återinitieras är radioöverföring att föredra.

I begreppet radioöverföring innefattas alla tekniker som på något sätt överför data genom att den moduleras och skickas ut som radiovågor. Det innebär att en viss mån av hinder kan finnas mellan sändare och mottagare utan att kommunikationen avbryts samt att uteffekt och räckvidd kan varieras för att passa in i en viss miljö. Olika miljöer och användningsområden kräver olika tekniker för att fungera på ett önskat vis. Radiobrus finns i alla miljöer och det är viktigt att en produkt är anpassad för brusnivån där den skall brukas. Ett vanligt mått på detta är *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), vilket är förhållandet mellan signalstyrkan och befintliga signaler som måste överröstas.

*Wi-Fi* [1] är en teknik för trådlösa nätverk och används till största del för att ge tillgång till Ethernet från bärbara enheter. Tekniken är inriktad mot enheter som behöver en konstant uppkoppling med höga hastigheter och är inom räckvidd av en accesspunkt. *Zigbee* [2] är en teknik för enheter som kommunicerar över mindre trådlösa nätverk med begränsad räckvidd. Tekniken är utvecklad för styrning och övervakning av hushålls-, medicinsk och industriell utrustning. Zigbee byggs ofta upp som ett mesh-nätverk vilket gör att alla kopplade enheter kan prata fritt sinsemellan genom att skicka data från nod till nod [3].

Bluetooth har funnits sedan 1998 men började utvecklas i ett projekt på Ericsson Mobile Communications nästan tio år tidigare [4]. Till en början var tekniken tänkt som ett trådlöst alternativ till serieporten men med åren har användningsområdena utökats och täcker idag allt ifrån strömning av ljud till övervakning av sensorer och kommunikation med sjukvårdsutrustning. För att anpassa sig till dessa olika områden har en stor mängd olika kommunikationsprotokoll och -profiler introducerats i Bluetooth-specifikationen. Detta har gjorts i etapper och varje ny version har inneburit stora förbättringar, både prestanda- och säkerhetsmässigt. De första tre versionerna



bygger alla på en teknik som kommit att kallas *Basic Rate / Enhanced Data Rate* (BR/EDR) eller *Bluetooth Classic*. Här etableras en punkt-till-punkt-anslutning mellan en master- och en eller flera slavenheter. BR/EDR används främst till applikationer där en kontinuerlig anslutning skall hållas öppen, till exempel vid strömning av ljud till en högtalare eller ett par hörlurar. För asynkron dataöverföring finns ett protokoll vid namn *RFCOMM* [5] vilket ger en möjlighet att emulera seriekommunikation. Flertalet profiler använder RFCOMM som transportprotokoll och den vanligast förekommande kallas för *Serial Port Profile* (SPP) [6]. I och med tillkännagivandet av Bluetooth version 4.0, 2009, introducerades en ny generation av Bluetooth, kallad *Low Energy*, förkortad BLE, eller *Bluetooth Smart*. Som namnet avslöjar görs här en ansats att dra ner på energiförbrukningen för kommunikationen, mycket på grund av det växande fenomenet med *Internet of Things* (IoT) där enheter, till exempel sensorer, behöver skicka eller ta emot små mängder data i omgångar och därmed inte kräver en kontinuerlig anslutning [7].

Även om de båda teknikerna kommunicerar på samma frekvensband skiljer de sig åt på många andra punkter. BLE kommunicerar på dubbelt så breda kanaler jämfört med BR/EDR vilket medför en större teoretisk bandbredd. I specifikationen går det att läsa att BR/EDR har en överföringshastighet på upp till 54 Mbps. Detta är dock ett specialfall där 802.11-protokollet används för själva dataöverföringen vilket kräver att hårdvarustöd finns för tekniken i både sändare och mottagare. Tekniken introducerades i version 3.0 av Bluetooth och går under namnet *Alternate MAC/PHY* (AMP) eller *High Speed* (HS). Bortsett från detta specialfall har BR/EDR en specificerad maximal överföringshastighet på 3 Mbps och BLE en sådan på 2 Mbps i och med Bluetooth 5.0 [8].

BLE-enheter befinner sig i ett viloläge mellan sina kommunikationssessioner där strömförbrukningen är minimal medan BR/EDR håller en kontinuerlig anslutning öppen utan djupare vilolägen. De data som skall skickas paketeras med hjälp av så kallade profiler [9] och skickas sedan via specifika protokoll vidare för att prepareras för radioöverföring. Dessa profiler skiljer sig mycket åt mellan teknikerna där BLE har introducerat ett generellt protokoll kallat för *Attribute Protocol*, eller ATT förkortat, med tillhörande profil, *Generic Attribute Profile* (GATT) som möjliggör skapandet av skraddarsyddade underordnade profiler. Även metoderna för att parkoppla enheter samt med vilka protokoll dessa kommunicerar har förändrats under åren [3].

## 1.2 Problembeskrivning

Saab AB, liksom många andra tillverkare av elektronisk utrustning, ställs i sitt utvecklingsarbete inför många val när det kommer till teknik för att överföra data trådlöst. Att bygga in stöd för Bluetoothkommunikation i en hårdvarulösning öppnar för stora möjligheter då i stort sett alla mobila enheter, såsom mobiltelefoner, surfplattor och bärbara datorer har stöd för denna teknik. På så sätt krävs ingen extra hårdvara för att etablera en trådlös anslutning och hantera överföring av mjukvara och annan data. De flesta mobila enheter som finns på marknaden kombinerar BR/EDR och BLE i en hårdvarulösning som kallas Bluetooth Dual Mode eller Bluetooth Smart Ready [8]. I ett inbyggt system bör en modul som enbart stödjer en av teknikerna väljas enligt Saab AB. Detta för att minimera kostnad, storlek och komplexitet på applikationen. Om fel val görs kan applikationer istället bli långsamma och ostabila.

BR/EDR har tidigare varit att föredra till applikationer där ljud och bild skall strömmas samt vid överföring av större datamängder medan BLE främst varit tänkt att användas för små sändningar med större tidsintervall. Dock har den femte Bluetooth-versionen utökat BLE:s överföringshastighet till det dubbla vilket ger en viss konkurrenskraft gentemot den äldre tekniken. När det kommer till nyttolast i ett datapaket har BR/EDR en maximal sådan på 1021 bytes medan BLE maximalt kan skicka 244 nyttobytes per

paket. Paketstorleken tillsammans med den högre överföringshastigheten gör BR/EDR till ett fördelaktigt val om dessa kriterier är prioriterade. Å andra sidan har BLE en betydligt lägre strömförbrukning enligt specifikationen [8], något som ofta är eftertraktat i batteridrivna produkter. BLE innefattar generiska profiler som möjliggör en bakåt- och framåtcompatibilitet. Om det jämförs med BR/EDR som istället har hela 27 hårt typade profiler vilka kräver stöd hos både mottagare och sändare innebär det en klar fördel för BLE och dess möjliga användningsområden.

Vid val av teknik för att överföra data trådlöst måste de olika teknikernas specifikationer vägas mot varandra. Om valet enbart görs på teoretiska grunder finns risken att applikationens prestanda inte lever upp till förväntningarna. På uppdrag av Saab AB – Training & Simulation har därför en jämförande studie utförts för att testa huruvida det går att avgöra vilken Bluetooth-teknik som är bäst lämpad för dataöverföring samt jämföra dessa resultat med litterära studier. Systemet som har utvecklats har därför kunnat testa och mäta följande parametrar:

- Överföringshastighet
- Energieffektivitet
- Störningskänslighet

### 1.3 Syfte och frågeställningar

Som framgår av problembeskrivningen spelar många parametrar in vid valet av teknik för dataöverföring via Bluetooth. Det finns tidigare studier som visar och jämför skillnader mellan de olika versionerna av Bluetooth [7], [10], [11]. I dessa jämförs teoretiska specifikationer och begränsningar utan att göra några fysiska tester för att bekräfta teorin. I den femte versionen av Bluetooth-specifikationen introducerades funktionalitet för högre överföringshastigheter för BLE vilket har lett till ökade användningsmöjligheter och en konkurrens med den äldre tekniken, BR/EDR, även vid överföring av större datamängder. Detta har lett till en svårighet att välja rätt teknik till rätt applikation. Därmed är syftet med denna studie:

Att utveckla en artefakt i form av ett system för att med hjälp av denna, utifrån prestandaparametrarna överföringshastighet, energieffektivitet och störningskänslighet, jämföra de olika teknikerna för att se huruvida det finns ett självklart val mellan teknikerna BR/EDR och BLE vid överföring av data från en mobil enhet med operativsystemet Android till ett system bestyckat med en Bluetooth-modul.

**Överföringshastighet** definieras som nyttolast per tidsenhet med enheten bytes per sekund.

**Energieffektivitet** definieras som nyttolast per energienhet med enheten bytes per joule.

**Störningskänslighet** definieras som vilken påverkan förhållandet mellan signal och brus har på överföringen.

**Rådata** definieras som en ordnad sekvens bytes av godtycklig storlek.

För att kunna besvara syftet har studien brutits ned i två frågeställningar. Då Bluetooth inte är ett specifikt protokoll utan snarare en samling sådana under ett och samma namn finns ett stort antal möjliga varianter att överföra data på. Specifikationerna för Bluetooth anger de teoretiska gränserna för de olika protokollen men inte hur de presterar i faktiska applikationer. Därmed är studiens första frågeställning:

- Hur förhåller sig BR/EDR och BLE till varandra med avseende på överföringshastighet, energieffektivitet och störningskänslighet vid dataöverföring i olika signalförhållanden?

Det finns ett flertal teoretiska utvärderingar av de olika teknikerna. Nikoukar [7] diskuterar skillnaderna och väger för- och nackdelar mellan de olika teknikerna med avseende på applikationer som smarta hem, smart sjukvård med flera. I en studie utförd av Tosi et al. [11] beskrivs BLE:s teoretiska gränser men de menar att det finns behov av rigorösa experimentella studier för att förstå de verkliga gränserna. På samma sätt redogör Razavi [10] för gränserna för de pakettyper som kan skickas med EDR-tekniken. Zanella [12] presenterar ett matematiskt ramverk för att analysera prestandan hos EDR:s pakettyper. Denna studie syftar till att bidra med data som eventuellt kan validera dessa studier. Därmed är studiens andra frågeställning:

- Vilka likheter eller skillnader i mätresultat kan påvisas mellan tidigare forskning och studien kring utvärderingar av BLE - BR/EDR med avseende på överföringshastighet, energieffektivitet och störningskänslighet?

För att besvara frågeställningarna och därmed uppfylla syftet har ett experiment genomförts på Saab AB i Huskvarna.

#### 1.4 Omfång och avgränsningar

För att syftet med detta arbete skall vara generaliserbart och kunna anpassas till andra produkter och applikationer måste omfånget avgränsas. Då studien utförts i samarbete med Saab AB kommer vissa av företagets önskemål speglas i valet av hård- och mjukvara samt teknik. Tester har ej utförts med tekniken AMP då detta kräver hårdvarustöd i båda enheterna och då denna studie inte inkluderar 802.11. Dessutom har den applikation som utvecklats för ändamålet enbart skapats för plattformen Android. Stöd för Android-versioner tidigare än 8.0 har ej implementerats då det hade inneburit att Bluetooth-standardens maxgränser ej skulle stödjas.

Gällande val av protokoll och profiler för dataöverföringstesterna har studien enbart fokuserat på SPP [6] över RFCOMM [5] vid BR/EDR-tester samt en egenutvecklad GATT-profil vid tester med BLE. Detta för att åstadkomma så goda prestandaförutsättningar som möjligt i enlighet med Bluetooth-specifikationen [6]. Systemet som har utvecklats för testerna har inte innehållit några andra modeller av Bluetooth-moduler än CYW20719 [13]. Vid studiens energimätningar har modulens basförbrukning ej inkluderats.

#### 1.5 Disposition

Rapporten är, efter introduktionskapitlet, indelad i sex kapitel. Först kommer ”Metod och genomförande” som redogör för hur arbetsprocessen och datainsamlingen har gått till. Här presenteras även de vetenskapliga metoder som legat som grund för arbetssättet. Därefter återfinns kapitlet ”Tekniskt ramverk” som ger den tekniska bakgrund som krävs för att få förståelse för Bluetooth och övriga tekniska aspekter som lyfts fram i arbetet. I nästkommande kapitel, ”Teoretiskt ramverk” redogörs för tidigare studier i de ämnen som berörs i studien. Här presenteras de teorier som ligger till grund för denna studies frågeställningar. Den bearbetade data som samlats in i studien återfinns i kapitlet ”Empiri” och analyseras sedan i det sjätte kapitlet ”Analys”. Efter analysen diskuteras resultatet av studien i kapitlet ”Diskussion och slutsatser”. Där ges även rekommendationer och förslag till vidare forskning.

## 2 Metod och genomförande

Här ges en beskrivning av de metoder som valts för att utföra studien samt hur arbetsprocessen genomförts. Vidare beskrivs den vetenskapliga ansatsen samt arbetets design och datainsamling. Kapitlet avslutas med en diskussion kring studiens trovärdighet.

### 2.1 Koppling mellan frågeställningar och metod

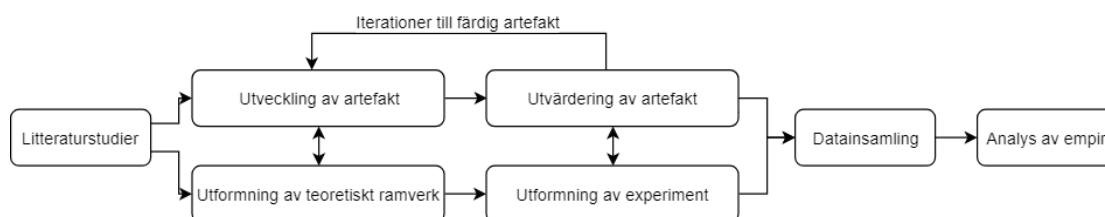
För att uppnå studiens syfte har den utförts i två steg. Dels i form av *Design Science Research*, DSR, där en artefakt har utvecklats på uppdrag av Saab AB, och dels i form av ett experiment. De båda delarna föregicks av litteraturstudier för att skapa bästa möjliga förutsättningar.

För att besvara studiens första frågeställning har experimentet utförts på ett sätt som gjort resultatet generaliserbart och visat på faktiska skillnader mellan de olika teknikerna.

För att besvara studiens andra frågeställning har de empiriska resultaten jämförts med tekniska specifikationer samt tidigare studier för att eventuellt kunna validera deras resultat. De studier som valts presenterar en variation av teorier kring de olika teknikernas prestandaparametrar och har valts ut bland ett större urval främst på grund av att deras fokus är relevant för ämnet och därmed ger denna studie en större teoretisk grund.

### 2.2 Arbetsprocessen

Arbetsprocessen inleddes med fördjupande litteraturstudier för att erhålla en god kännedom i de ämnen som studien berör. Till att börja med studerades tekniken kring Bluetooth så att den artefakt som utvecklades kunde utföra och mäta det den var tänkt att göra. Därefter utvecklades artefakten och denna inkluderades i ett experiment för att anskaffa empiriska data för att med dessa kunna hitta och jämföra skillnader mellan de olika Bluetooth-teknikerna och på så sätt hitta en optimal teknik för överföring av rådata.



**Figur 1:** Studiens arbetsprocess

### 2.3 Ansats

I denna studie har främst en empirisk-atomistisk [14], även kallad kvantitativ, forskningsansats tagits [15]. En atomistisk världsåskådning betyder i stora drag att en värld är summan av dess delar. Det innebär att föremålet eller företeelsen för studien ses som isolerad och kontextfri. På så sätt blir den väl avgränsad och lättare att studera och resultatet kan sedan generaliseras och appliceras på omvärlden om stickprovet är representativt. Den eller de personer som utför studien skall förhålla sig objektiva och vara utbytbara [15].

Denna studies kvantitativa data har samlats in genom ett experiment och kvalitativa data har erhållits genom litteraturstudier. De data som insamlats har analyserats så

att slutsatser som kunnat bevisa experimentets hypotes har kunnat dras. Hypotesen har formulerats som följer:

Det går att identifiera vilken av Bluetooth-teknikerna BR/EDR och BLE som är mest lämpad för överföring av rådata baserat på prestandaparametrarna överföringshastighet, energieffektivitet samt störningskänslighet.

## 2.4 Design

I Wieringa [16] kan man läsa att DSR går ut på att iterera genom två aktiviteter. Dels att designa en artefakt och sedan att studera denna i en kontext. Wieringa menar att cykeln för DSR består av följande fem delmoment:

**Problemutredning** – Vilket fenomen skall förbättras och varför?

**Behandlingsdesign** – Designa en eller flera artefakter som kan behandla problemet.

**Lösningsvalidering** – Skulle dessa artefakter behandla problemet?

**Lösningsimplementation** – Behandla problemet med en av de designade artefakterna.

**Implementationsutvärdering** – Hur lyckad har behandlingen varit?

Efter det sista momentet kan en ny iteration i designcykeln startas om problemet ej är löst.

Hevner [17] ger en beskrivning för hur DSR kan utföras på informationssystem och presenterar sju riktlinjer för att förstå, genomföra och utvärdera forskningen. Dessa presenteras kortfattat i tabell 1.

Riktlinje	Beskrivning
1. Design som en artefakt	DSR måste producera en fungerande artefakt i form av en konstruktion, en modell, en metod eller en instans.
2. Problemrelevans	Målet med DSR är att utveckla teknikbaserade lösningar till viktiga och relevanta verksamhetsproblem.
3. Designutvärdering	Nyttan, kvaliteten och effektiviteten hos en konstruktionsartefakt måste strikt demonstreras via väl genomförda utvärderingsmetoder.
4. Forskningsbidrag	Effektiv DSR måste ge tydliga och bevisliga bidrag inom designartefaktens och/eller designmetodens områden.
5. Forskningsstringens	DSR bygger på tillämpningen av strikta metoder både i konstruktion och utvärdering av designartefakten.
6. Design som en sökprocess	Sökandet efter en effektiv artefakt kräver att man använder tillgängliga medel för att nå önskade ändamål samtidigt som man uppfyller lagar i problemmiljön.
7. Kommunikation av forskning	DSR måste presenteras på ett sätt som är effektivt både för teknik- och ledningsorienterad publik.

**Tabell 1:** Riktlinjer för Design Science Research [17]

Artefakten som har designats och utvecklats under denna studie har tagits fram i samråd med Saab Training & Simulation för att genom ett experiment kunna visa vilken teknik som lämpar sig bäst för företagets tillämpningar. Experimentets resultat kommer även ge en fingervisning för liknande tillämpningar och fungera som en lathund för andra verksamheter när produkter skall utvecklas. Artefakten designades med hänsyn till rådande state-of-the-art för att studiens resultat skall vara aktuellt.

## 2.5 Utvecklingsprocessen

I enlighet med Wieringas fem delmoment för DSR [16] inleddes utvecklingsprocessen med en utredning av vilket problem som behöver behandlas. I detta fall rörde det sig om svårigheten att välja rätt Bluetooth-teknik för en tillämpning där rådata skall överföras. Här har även Hevners riktlinjer [17] angående problemrelevans och forskningsbidrag vägts in i arbetet genom att resultatet skall presenteras som en lathund där de olika teknikernas för- och nackdelar vägs mot varandra. En angreppsplan skapades och vissa önskemål gällande tekniska specifikationer lyftes fram av Saab AB. Arbetet gick sedan in i delmoment två, design av den artefakt som skulle bidra till att behandla problemet. Design- och utvecklingsarbetet skedde i ett flertal iterationer. Veckovisa möten med Saab har hållits för att presentera arbetets delresultat samt för att motta feedback för att artefakten skall hålla den kvalitet som önskas. Under dessa möten har även lösningar på de tekniska svårigheter som uppkommit kunnat diskuteras och på så sätt har svårigheterna snabbt kunnat avhjälpas.

Samtliga iterationer har innehållit tester i form av hastighets- och stabilitetsmätningar för att utvärdera huruvida den önskade prestandan uppnåtts eller ej och på så sätt kunna validera att problemet de facto skulle kunna behandlas med artefakten. Delmoment fyra utfördes i form av det experiment där de båda Bluetooth-teknikerna ställs mot varandra för att på så sätt skapa en bättre möjlighet att välja rätt teknik till tillämpningen. En implementationsutvärdering har utförts i varje iteration under utvecklingens gång. Då den testkammare som skulle husera de slutliga testerna ej fanns att tillgå under utvecklingen utformades och kördes tester i kontorsmiljö där hastigheten uppmättes för att se hur nära de teoretiska gränserna artefakten presterade.

Hevners sju riktlinjer går i många fall ihop med Wieringas delmoment men beskriver processen ur ett mer teoretiskt perspektiv. Denna studie har utformats för att uppfylla samtliga riktlinjer och har därmed tillämpat strikta metoder genom samtliga delmoment. Dessutom presenteras studiens resultat för att nå ut till både teknik- och ledningsorienterade läsare.

## 2.6 Datainsamling

Datainsamlingen genomfördes i två steg: en förstudie samt ett experiment. Förstudien resulterade i en artefakt som sedan kom att utvärderas i studiens experiment som en del av metoden DSR. Experimentet bidrog även med empiriska data för senare analys.

### 2.6.1 Förstudie

För att lägga en god teoretisk grund inleddes arbetet med en förstudie där aktuell forskning i ämnet samt tekniska data kring Bluetooth sammanställdes. På så sätt kunde artefaktens design planeras för att ge så goda förutsättningar som möjligt i det experiment som följde. Här valdes den mjukvara och de hårdvarukomponenter ut som skulle användas för att utveckla artefakten.

Android Studio valdes som utvecklingsmiljö då en mobilapplikation till operativsystemet Android skulle ingå som del av artefakten. Applikationen skapades för att kunna initiera och automatisera de önskade testerna. Systemets hårdvarudel, det vill säga den Bluetooth-modul som skulle agera mottagare i systemet, var tvungen att kunna kommunicera över både BR/EDR och BLE, en så kallad "Dual Mode"-modul. Valet föll på ett utvecklingskort av modell CYW920719Q40EVB-01 från Cypress Semiconductor Corporation som är bestyckat med en Bluetooth-modul av modell CYW20719 [13]. Cypress tillhandahåller en utvecklingsmiljö, kallad WICED, för att skriva rutiner och programmera sina moduler. Där ges möjligheter att konfigurera en mängd parametrar och kodskelett kan genereras genom att följa guider.

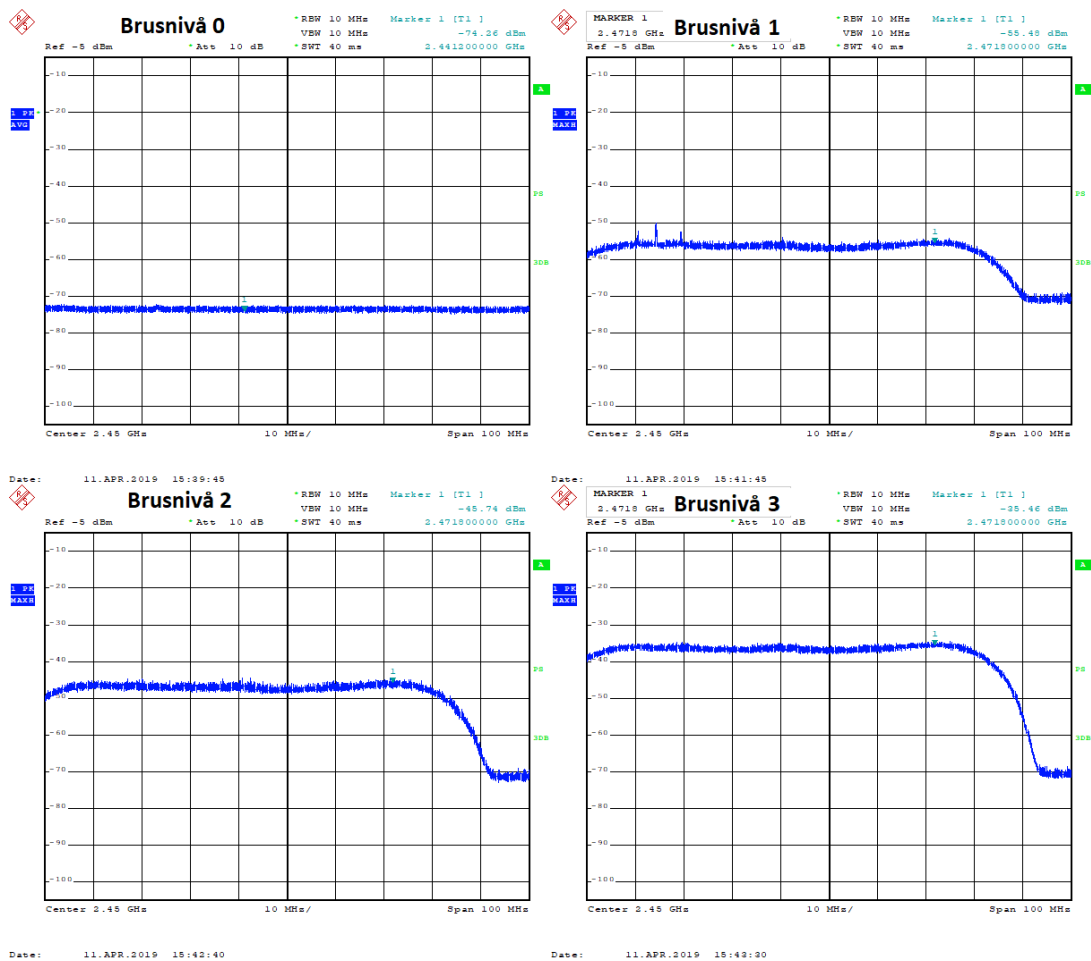
I Android-applikationens startskärm väljs först vilken teknik som skall användas, BR/EDR eller BLE, därefter söker telefonen efter Bluetooth-enheter som finns i närheten. När en enhet parkopplats och anslutits presenteras själva testvyn för användaren. Här startas en serie på 20 överföringar med en kort paus mellan varje. Den mängd data som skickas har satts till 50 000 bytes och har valts i samråd med Saab AB. Datan består av upprepade sekvenser med oktetter innehållande värdena 0x00 – 0xFE. Därefter skickas 5000 bytes till, samtliga med värdet 0xFF. I mottagarenheten startar en timer vid första indikationen på att data tagits emot. Därefter sparas alla mottagna data i en stor minnesbuffert tills målantalet har uppnåtts. Sedan itereras bufferten igenom och kontrollerar att rätt värde ligger på rätt plats. Om så inte är fallet inkrementeras en felräknare. Dessutom räknas antalet förekomster av 0xFF i slutet av bufferten för att på så sätt kunna svara på hur många bytes som gått förlorade. När kontrollen är genomförd placerar mottagaren statusdata i en sträng för retur och flaggar sedan med notifikation till sändaren som då tar emot statuspaketet och startar nästa överföring. Källkod och projektfiler för artefaktens olika delar kan ses i det Git-repo som hänvisas till i Bilaga 1.

### 2.6.2 Experiment

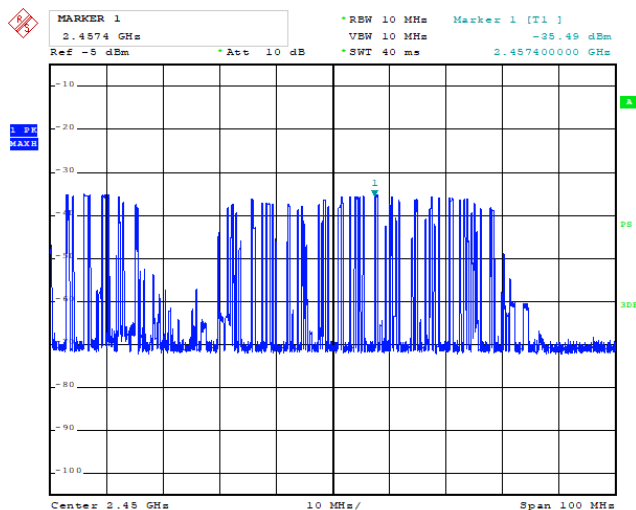
För att svara på studiens frågeställningar och därmed uppfylla dess syfte har ett experiment utförts. Flertalet instrument och hjälpmedel krävdes för att mäta experimentets beroende variabler, det vill säga de variabler som påverkas av manipulation [15] i detta fall överföringshastighet, energieffektivitet samt störningskänslighet. Två stycken programmerbara vektorsignalgeneratorer av modell SMBV100A från Rhode & Schwarz [18] användes för att generera olika nivåer av brus och på så sätt försöka störa ut Bluetooth-överföringen. Dessa generatorer har en bandbredd på 40 MHz och då Bluetooth har en total spridning på det dubbla [8] behövde två stycken generatorer användas vars centrumfrekvenser lades på 2420 respektive 2460 MHz. Signalen som genererades var 1024QAM-modulerad och bestod av slumpmässiga data för att simulera ett jämnt bakgrundsbrus. QAM-modulering innebär att både amplitud och fasläge varierar [19]. Till Bluetooth-modulen kopplades en amperemeter av modell  $\mu$ Current GOLD [20] in i serie med radiodelen. Den matar ut en spänning som är linjär mot ingångsströmmen. Spänningsutgången kopplades sedan vidare till ett digitalt oscilloskop av modell Infinivision DSOX3012T med stort minne och funktioner för att lagra samplade data på ett USB-minne för överföring till en PC där bearbetning och analys kunde ske. En antenn placerades närmast utvecklingskortet och kopplades till en spektrumanalysator utanför testkammaren. På så sätt kunde signalnivåerna som utvecklingskortet utsattes för återspeglas grafiskt. Androidapplikationen installerades på en Sony Xperia XZ2 Compact med stöd för Bluetooth 5. Valet föll på den modellen på grund av tillgång och bekvämlighet.

De empiriska data som samlats in i experimentet har sedan kunnat valideras mot de teoretiska resultaten. Metoden är vanligt förekommande då syftet baseras på en hypotes. Det kallas då att studien har ett deduktivt upplägg [21]. Denna studies experiment har syftat till att mäta energieffektivitet, överföringshastighet och störningskänslighet vid överföring av data över Bluetooth. Innan mätningarna började kalibrerades instrumenten in. Brusgolvet mättes upp till -74.26 dBm och Androidenhetens utsignal till -35.49 dBm. Utifrån dessa värden valdes brusnivåerna till -55 dBm, -45 dBm samt -35 dBm vilket gav SNR-förhållanden på 40, 20, 10 och 0 dB, brusgolvet inkluderat. Dessa benämns som brusnivå 0, 1, 2 och 3 där 0 representerar 40 dB och 3 representerar 0 dB. Att just dessa nivåer valdes berodde på att EMC-kammarens bakgrundsbrus låg ca 40 dB under den signal som sändes ut. Utifrån den nivån halverades sedan SNR-nivån två gånger för att närma sig 0 dB. I figur 2 ses de fyra olika nivåernas spektrum och i figur 3 de uppmätta signalerna när data skickades från den mobila enheten till utvecklingskortet. Vid den lägsta SNR-

nivån, 0 dB, upplevdes stora problem att överföra data. Därför gjordes en stegvis ökning av brusnivån för att på så sätt kunna närma sig den lägsta möjliga SNR-nivå där tre fullständiga tester kunde köras.



**Figur 2:** Spektrumet för de olika nivåerna av störande brus.

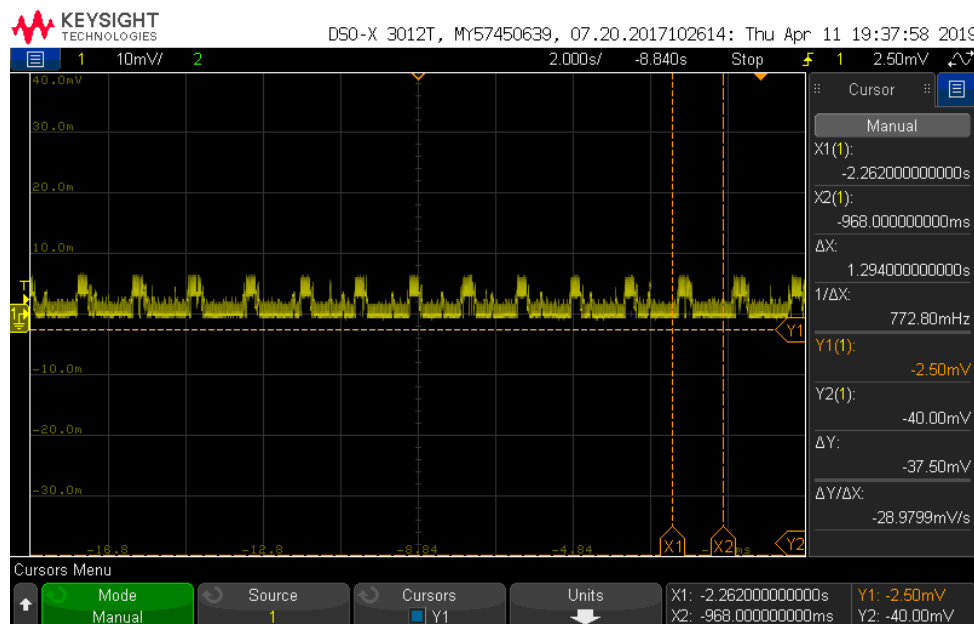


**Figur 3:** Uppmätt utsignal från Android-enhet.

Utvecklingskortets strömförbrukning när det inte sände eller tog emot data mättes upp till 1.30 mA med en amperemeter. Detta värde användes sedan för att justera, det i



realtid uppmätta, värdet till en korrekt nivå. I Figur 4 ses strömnivån vid 14 stycken datatransaktioner. Varje sådan upphöjning exporterades till en fil i textformat med samtliga mätpunkter för att kunna utföra en integralberäkning och därmed erhålla den totala strömförbrukningen för respektive överföring. Då filerna innehöll mer än bara själva transaktionens strömvärden, isolerades den region som var av intresse med hjälp av den aktuella överföringstid som loggats i den mobila enheten.



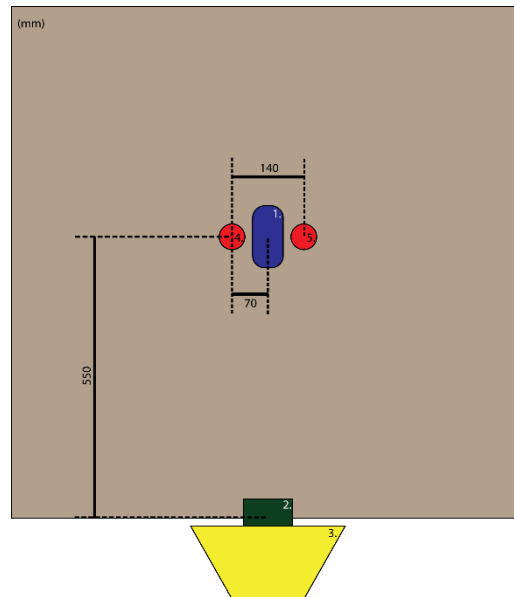
**Figur 4:** Loggad strömdata från oscilloskop

Testerna har körts via de båda Bluetooth-teknikerna och dessutom repeterats med olika nivåer av brus. Varje deltest har upprepat 20 gånger för att minimera avvikelser och yttre påverkan. Att just 20 tester valts beror främst på experimentets tidsramar samt det faktum att fler mätningar ej skulle ha någon större påverkan på studiens resultat. Utförda tester visas i tabell 2.

	Bluetooth-teknik	Signal-to-Noise Ratio	Antal
1	Classic	40 dB	20
2	Classic	20 dB	20
3	Classic	10 dB	20
4	Classic	0 dB	20
5	BLE	40 dB	20
6	BLE	20 dB	20
7	BLE	10 dB	20
8	BLE	0 dB	20

**Tabell 2:** Experimentets deltester

Som kan ses i figur 5, placerades utvecklingskortet 550 mm från den mobila enheten och på var sida om denna, de två signalgeneratorerna. Avståndet valdes godtyckligt utifrån de resurser som fanns att tillgå i testkammaren och presenteras här för att experimentet skall kunna reproduceras. Viktigt var dock att signalgeneratorerna och den mobila enheten var på samma avstånd från utvecklingskortet. På så sätt skapades bästa möjliga förutsättningar att uppmäta korrekta värden vid antennen.



**Figur 5:** Uppsättning av experimentutrustning. (1) Androidenhet (2) Utvecklingskort (3) Antenn kopplad till spektrumanalysator, (4 & 5) Rundstrålande antenner från signalgeneratorer

## 2.7 Dataanalys

För att analysera studiens empiri har signifikansanalyser med tväsidigt "Students t-test" [22] utförts på den insamlade datan och utifrån dessa t-värden har signifikansvärden beräknats. Detta för att kunna dra en slutsats huruvida slumpen kan förklara skillnaden mellan två grupper eller ej.

$$t = \frac{(\bar{x}_{br/edr} - \bar{x}_{ble})}{\sqrt{\frac{\sigma_{br/edr}^2 + \sigma_{ble}^2}{n}}}$$

**Formel 1:** Students t-test

T-värdet, som kan beräknas med formel 1, ger ett förhållande mellan två normalfördelade populationers medelvärden med hänsyn tagen till deras varianser samt storlek. Ju större t-värde, desto större skillnad mellan de båda populationerna. T-värdet kan sedan omvandlas till ett signifikansvärde, även kallat p-värde, utifrån testets frihetsgrad. I denna studie gjordes omvandlingen till p-värde med hjälp av funktionen "T.FÖRD.2T" i Microsoft Excel. Frihetsgraden i ett test där dess populationer är lika stora beräknas med formel 2.

$$df = (2n - 2)$$

**Formel 2:** Frihetsgrader i students t-test

Det p-värde som tagits fram för ett t-test kan sedan jämföras med en signifikansnivå som normalt sett brukar vara 1, 5 eller 10%. Signifikansnivån är sannolikheten för att ett utfall slumpmässigt hamnar i ett kritiskt område trots att nollhypotesen är sann. Ett lågt signifikansvärde innebär alltså att nollhypotesen kan förkastas med stor sannolikhet.

Resultaten har jämförts med tidigare studiers för att kunna besvara den andra frågeställningen.

## 2.8 Trovärdighet

För att en studies resultat skall bli trovärdigt krävs att dess validitet och reliabilitet är höga [15]. För att nå en hög validitet krävs det att de mätvärden som samlas in är relevanta och verkligen mäter det som skall mätas. En hög reliabilitet nås genom att säkerställa att studiens försök kan återskapas och att mätningar utformas och utförs på ett trovärdigt sätt.

Metoden DSR har valts för att i samråd med Saab AB kunna utveckla och utvärdera en artefakt. Detta för att kunna samla in relevanta mätvärden och därmed öka validiteten. Validiteten har säkerställts genom att utformningen och designen av studiens artefakt och experiment har skett med hjälp av kunniga rådgivare och handledare på Saab AB. Specifika och relevanta verktyg och instrument har funnits att tillgå vilket har stärkt studiens validitet ytterligare. De slutgiltiga testerna utfördes dessutom i en testkammare som isolerats från yttre signaler för att ge en så ren radiomiljö som möjligt vilket bidragit till resultatens reliabilitet.

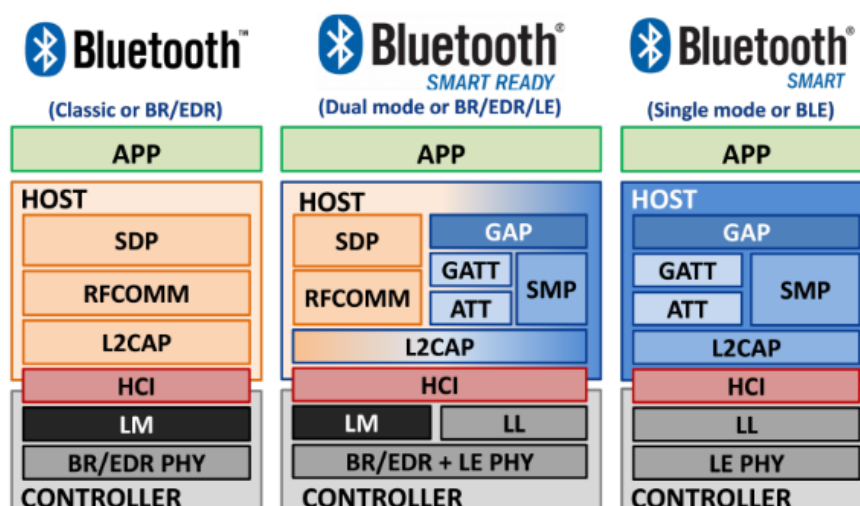
Experimentet har utformats så att 20 tester utförts för varje mätning för att erhålla en större datapool vilket eliminerar enskilda avvikelser och extremvärden. Experimentets reliabilitet hade dock kunnat öka ytterligare om mer tid funnits med de verktyg som används för att till exempel justera och konfigurera utrustningen på ett mer effektivt vis.

### 3 Tekniskt ramverk

Här presenteras tekniska aspekter som krävs för att främja denna studies artefaktutformning och för att på så sätt ge en god förutsättning att besvara frågeställningarna.

#### 3.1 Bluetooth

Bluetooth är en samling trådlösa standarder som kommunicerar över det licensfria ISM-bandet på 2.4 GHz. Bluetooth-specifikationen delas in i två huvudtekniker; BR/EDR och BLE. Gemensamt för de båda teknikernas kärnsystem är att de består av två huvudstackar; en host och en controller. Som en brygga mellan dessa finns ett så kallat *Host Controller Interface*, HCI, som möjliggör kommunikation i båda riktningarna. Host-stacken definieras som en logisk enhet som innehåller alla lager under de profiler som ej ingår i kärnan samt ovanför HCI:n. Det enda gemensamma protokollet för BLE och BR/EDR i host-stacken är det så kallade *Logical Link Control and Adaptation Layer Protocol*, L2CAP, som ligger närmast HCI:n och har som uppgift att t. ex. multiplexa data mellan protokoll i högre lager samt segmentera och återskapa paket [8]. Kontrollstacken ligger i botten av modellen och består av ett fysiskt lager, kallat *PHY*, och ett länklager, *LM* för BR/EDR och *LL* för BLE. PHY är det lägsta lagret i stacken och är det lager som ansvarar för att skicka och ta emot rådata från radiobandet och digitalisera data för LL/LM som i sin tur kommunicerar med HCI.



Figur 6: De olika Bluetooth-stackarna [11]

Båda teknikerna använder sig av *Adaptive Frequency Hopping*, AFH, som använder binära radiomodulationer för att undvika kanaler med störningar som finns i radiobandet. AFH klassificerar respektive tekniks kanaler som "använda" och "oanvända" och utnyttjar en pseudoalgoritm för att hoppa mellan dessa och kan på så sätt undvika statistiska störningar på radiobandet [8]. Dessa hopp sker mellan sändning och mottagning. De två teknikerna och dess respektive stackar med tillhörande PHY och LL/LM kommer förklaras närmare under nästkommande två rubriker för att ge en grund för att utföra experimentet och besvara frågeställningarna i studien.

#### 3.2 Bluetooth Classic

Bluetooth Classic är ett samlingsnamn för de olika delteknikerna Basic Rate, Enhanced Data Rate och Alternate MAC/PHY vilka var de enda som fanns innan Bluetooth 4.0 släpptes. Tekniken är bäst anpassad för att överföra mycket data över korta distanser samt för att hantera ljudströmning. BR har en teoretisk överföringshastighet på 1 Mbps

och EDR kan genom så kallad PSK-modulation uppnå 2 till 3 Mbps beroende på vilken typ av PSK som applicerats [8]. Den högsta teoretiska överföringshastigheten för BR/EDR är ca 2,18 Mbps. Med AMP kan hastigheter på upp till 54 Mbps nås då tekniken använder sig av en inbyggd 802.11-radio för själva datautbytet.

### 3.2.1 Controller

De lager som tillhör Controller-stacken för BR/EDR är *Radio* och *Baseband*, som tillsammans bildar PHY-lagret, samt Link Manager som kan ses i figur 6. BR/EDR kan använda tre olika modulationstyper och beroende på vilken som används påverkas överföringshastigheten och störningskänsligheten hos data som skickas på olika sätt. De olika PHY-varianterna för BR/EDR är:

- BR PHY                    1 Mbps (GFSK)
- EDR PHY                 2 Mbps ( $\pi/4$ -DQPSK)
- EDR PHY                 3 Mbps (8DPSK)

GFSK står för *Gaussian frequency shift keying* [19] och är standardmodulationen för samtliga överföringar med BR. Tekniken existerar för att kunna särskilja symbolerna 0 och 1 när de skickas på radiobandet. EDR:s två PHY använder också GFSK men bara för de två första paketdelarna, Access Code och Header. Därefter följer Guard Time-blocket där PHY:n och dess modulation ändras för resten av paketet till  $\pi/4$ -DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*) eller 8DPSK (*Differential Phase Shift Keying*) beroende på tekniskt stöd i modulen. De olika moduleringarna ger möjlighet för fler databitar per symbol att hanteras [8]. I  $\pi/4$ -DQPSK så är det två bitar istället för en vilket därför ger dubbel hastigheten jämfört med GFSK. Med 8DPSK så ökade även antal bytes som kan utnyttjas för nyttodata från 339 till 1021 vilket bidrar till ökad effektivitet och därmed hastighet.

BR/EDR delar in 2,4 GHz-bandet i 79 kanaler med en kanalbredd på 1 MHz enligt formel 3.

$$f = 2402 + k \text{ MHz}, k \in \mathbb{N}\{0, \dots, 78\}$$

**Formel 3:** Kanalformel för BR/EDR

BR/EDR delas in i tre stycken så kallade Power Classes (1 – 3) beroende på maximal uteffekt som modulens sändare är avsedd för. Enheter som stödjer den högre klassen måste även kunna sänka sin uteffekt om en sådan förfrågan kommer från en enhet som den kommunicerar med. Klasserna påverkar räckvidd och strömförbrukning.

- Klass 1 maximal styrka: 100 mW (20 dBm) minimal styrka: 1 mW (0 dBm)
- Klass 2 maximal styrka: 2,5 mW (4 dBm) minimal styrka: 0,25 mW (-6 dBm)
- Klass 3 maximal styrka: 1 mW (0 dBm) minimal styrka: -

*Time Division Duplex*, eller TDD, är en teknik som BR/EDR använder i PHY-lagret. Tekniken delar upp tiden mellan sändning och mottagning i så kallade slots som är 625  $\mu$ s. TDD tvingar mottagningar och sändningar att placeras inom dessa slots för att bättre hantera ojämn överföringshastighet mellan kommunicerande enheter. Ett paket som skickas eller tas emot kan sträcka sig upp till fem slots.

Access Code			Header	Information Bytes (2-341 bytes)		CRC
Preamble	Sync Word	Trailer (optional)	7 bytes	Payload Header	Payload	2 bytes
4 bits	8 bytes	4 bits		2 bytes	0-339 bytes	

**Figur 7:** BR-paket (DH5) [8]

Access Code			Header	Guard Time	SYNC Sequence	Information Bytes (0-1023 bytes)		CRC
Preamble	Sync Word	Trailer (optional)	7 bytes	4.75-5.25 $\mu$ s	11 $\mu$ s	Payload Header	Payload	2 bytes
4 bits	8 bytes	4 bits				2 bytes	0 - 1021 bytes	

**Figur 8:** EDR-paket (3-DH5) [8]

Link Manager-lagret kontrollerar och tar hand om förhandlingen mellan kopplade enheter. *Asynchronous Connection-Less*, ACL, *Synchronous Connection-Oriented*, SCO, och *Extended SCO*, eSCO, är olika överföringsprotokoll som används av BR/EDR. ACL-paket är avsedda för dataöverföring medan SCO och eSCO är till för ljud. I denna studie appliceras enbart ACL då ljud inte är aktuellt. Det finns olika ACL-pakettyper definierade i standarden men enbart typen kallad 3-DH5 används i denna studie då den tillåter den högsta hastigheten och även störst nyttolast. 3-DH5-paket moduleras med 8DPSK efter Guard Time och kan bära upp till 1021 nyttobytes. Se figur 7 och figur 8 för en jämförelse mellan de största paketen för BR respektive EDR.

### 3.2.2 Host

För att strukturera och paketera data använder sig Bluetooth av något som kallas profiler. För att två enheter skall kunna kommunicera behöver båda ha tillgång till verktyg för att kunna hantera samma profil. Det finns 27 olika profiler specificerade för BR/EDR som var och en har definierade användningsområden. Den profil som främst används för dataöverföring och därmed har varit intressant för denna studie är Serial Port Profile. SPP använder RFCOMM-protokollet och nyttjas när Bluetooth skall efterlikna en seriell kabel såsom RS-232 [8]. BR/EDR-enheter kommer själva förhandla fram det senaste paketformat som stöds för den profil som kopplats mellan enheterna.

## 3.3 Bluetooth Low Energy

BLE är en nyare teknik som introducerades i och med Bluetooth 4.0. BLE:s huvudsyfte är att ha en mycket lägre total strömförbrukning som gör tekniken ideal för IoT-enheter som skall skicka mindre mängder data under korta intervaller vilket potentiellt kan ändra en produkts batteritid från dagar till år. Med Bluetooth 5 har maxhastigheten ökat till 2 Mbps för att kunna tänja gränserna för denna teknik. Den högsta teoretiska överföringshastigheten av nyttodata kan beräknas med en formel som beskrivs i en artikel på Bluetooths webbsida till 1,4 Mbps [23]. BLE har 4 olika PHY:s som modulerar och paketerar data på olika sätt och därmed resulterar i olika räckvidder, energiförbrukning och överföringshastigheter [24].

### 3.3.1 Controller

BLE:s Controller-stack är uppdelad i PHY och LL. De olika PHY-varianterna är:

- LE 1M PHY            1 Mbps
- LE 2M PHY            2 Mbps
- LE Coded  $s=2$         500 kbps
- LE Coded  $s=8$         125 kbps

LE 1M PHY är standard för BLE och en anslutning initieras alltid med denna. En förfrågan måste sedan ske från en kopplad enhet för att byta PHY. Båda enheterna måste dessutom ha stöd för den nya. Moduleringen GFSK används för samtliga överföringar för BLE. I Bluetooth 4.2 introducerades *Data Length Extension* (DLE) som är en metod att öka nyttolasten i ett paket till maximalt 244 bytes istället för 20 som det var tidigare.

2,4 GHz-bandet är uppdelat i 40 kanaler med 2 MHz kanalbredd enligt formel 4 om BLE används. Tre kanaler (37, 38, 39) används då enbart för adressering för att tillåta andra att se den egna enheten.

$$f = 2402 + 2k \text{ MHz}, k \in \mathbb{N}\{0, \dots, 39\}$$

**Formel 4:** Kanalberäkning för BLE

Enheter som stödjer BLE får ha en uteffekt på 0.01 mW (-20 dBm) upp till 100 mW (20 dBm). Innan Bluetooth 5 var maxvärdet istället 10 mW (10 dBm).

Preamble	Access Address	PDU (2-257 bytes)					CRC	
		Link Layer Header	Payload (0-251 bytes)			MIC (optional)		
1M PHY: 1 byte	4 bytes	2 bytes	L2CAP Header	Att Data (0-247 bytes)		4 bytes	3 bytes	
2M PHY: 2 bytes			4 bytes	ATT Header				Att Payload
				Op Code	Attribute Handle			
			1 byte	2 bytes				

**Figur 9:** BLE-paket [8]

Link Layer-lagret kopplar PHY-lagret mot högre lager och kontrollerar vilka tillstånd en koppling mellan enheter har, d.v.s. om enheter är i scanning-, adversering- eller anslutningsläge samt om de är master eller slav.

BLE använder något som kallas anslutningsintervall som är en viktig del av länklagret och som används för att hantera strömförbrukning och överföringshastighet. Termen anger tiden från starten av en sändningssekvens till starten på nästa, så kallade ankarpunkter. När ett nytt intervall kommer så förhandlar enheterna och kollar om det finns data som skall skickas från något håll och bearbetar i så fall överföringen. En överföring, oavsett storlek, måste börja i takt med anslutningsintervallet. Om inget skall skickas eller tas emot vid en sådan ankarpunkt stänger enheterna av sina radiodelar och går därmed ned i viloläge. Antalet paket som kan skickas under ett intervall kan beräknas med formel 5.

$$N_{round-trip} = \left\lfloor \frac{connInterval}{T_{round-trip}} \right\rfloor$$

**Formel 5:** Beräkning av antalet paket per anslutningsintervall [11]

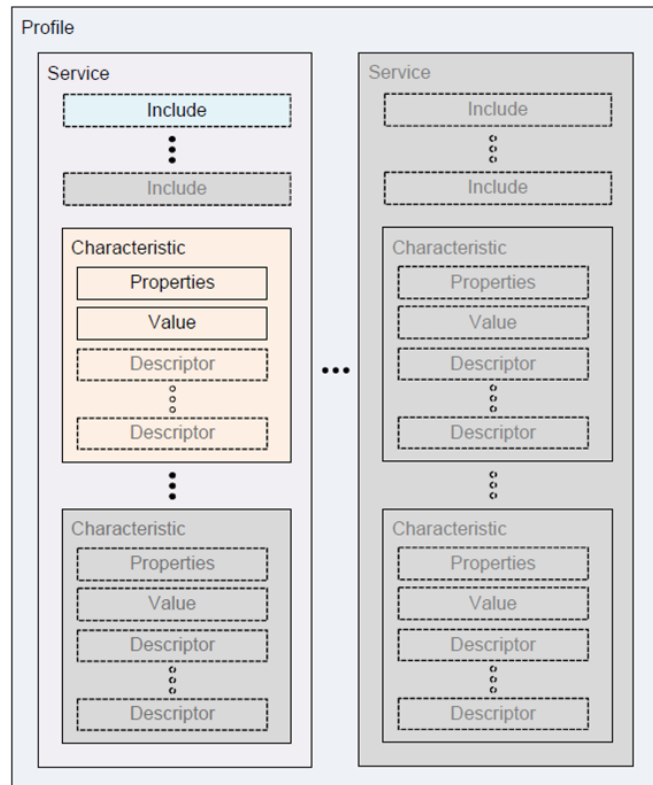
$T_{round-trip}$  anger tiden det tar för ett paket att skickas inklusive ack från mottagaren och kan beräknas till 1,408 ms förutsatt att 244 bytes nyttolast skickas samt att 2M PHY används. Om ett anslutningsintervall på 7,5 ms används, vilket är standard för Android, skulle maximalt fem paket kunna skickas under ett intervall.

### 3.3.2 Host

BLE använder sig av ATT och GATT istället för fasta definierade profiler. Detta ger möjlighet att skapa skräddarsydda profiler vid behov, men det finns även ett antal färdiga profiler att nyttja såsom *Object Transfer Profile*, förkortad OTP, *Alert Notification Profile*, ANP. I denna studie skapades en skräddarsydd GATT-profil för att på ett generationsikt sätt kunna skicka mycket data. ATT är ett generiskt protokoll som hanterar attributen på både klient och server. På serversidan visas de tillgängliga attributen som klienten kan agera med. Attribut består av Attribute Type, Attribute Handle, Attribute Value och Attribute Permission. Attribute Type är definierat med ett unikt ID-nummer som identifierar attributen. Attribute Handle är ett värde som används för att kunna identifiera och referera till specifika attribut på servern för klienten. Attribute Value innehåller data för attributen. Attribute Permission innehåller vilka tillstånd som attributen i fråga tillåter såsom skriv-, läs-, indikering- och notifieringstillstånd samt krypteringskrav.

GATT definierar hur kopplade enheter skall kommunicera med varandra när en koppling har skett. GATT är basprofilen som alla BLE-profiler är grundade på. Den bygger på ett antal olika attribut som tillsammans kallas för services och characteristics

och resulterar i en profil i figur 10 visas en överblick av hierarkin som GATT är uppbyggd av.



**Figur 10:** Överblick av GATT-hierarkin [9]



## 4 Teoretiskt ramverk

Kapitlet ger en teoretisk grund och förklaringsansats till studien och det syfte och frågeställning som formulerats.

### 4.1 Koppling mellan frågeställningar och teori

Då syftet med denna studie varit att hitta tydliga skillnader mellan Bluetooth-teknikerna vid överföring av rådata har teorier och forskning från tidigare studier och utvärderingar i ämnet lyfts fram. För att kunna stödja utvecklingsprocessen av artefakten och utföra pålitliga tester med denna har teorier kring överföringshastighet, energieffektivitet samt trådlös störning vid användning av Bluetooth tagits fram och studerats. Sökningen efter relevant litteratur gjordes i stora databaser så som Scopus, Google Scholar och IEEE Xplore. Sökningarna avgränsades för att enbart visa referentgranskade publiceringar och även tidsmässigt till de senaste tio åren för att säkerställa att aktuell information erhöles. Ett urval av de sökord som användes är "Bluetooth", "Performance", "Throughput", "Classic", "Low Energy". Utöver de akademiska databaserna har information sökts via Googles sökmotor och på Bluetooths hemsida.

### 4.2 Tidigare forskning

Nikoukar et al. [7] har i sin studie gjort en noggrann jämförelse mellan de olika Bluetooth-teknikernas MAC- och PHY-lager och deras teoretiska egenskaper. Här pekar de på att en av bristerna med BR/EDR är dess höga energiförbrukning i förhållande till andra tekniker. Framst beror detta på att master-enheten pollar slavarne kontinuerligt även då ingen data finns att hämta. Om pollningen kan schemaläggas med en mer effektiv algoritm skulle energiförbrukningen kunna sänkas. Dessutom påverkas energiförbrukningen av att BR/EDR upptäcker andra enheter genom att skanna hela 32 kanaler. Detta faktum kommer vägas in i jämförelsen mellan de två teknikerna för att se huruvida skillnaden visar sig i denna studies mätningar. Nikoukar et al. ger även förslag på förbättringar vilka bland annat går ut på att utgå ifrån en sannolikhetsmodell och på så sätt skära ner på antalet skanningar.

Razavi et al. [10] ställer i sin artikel upp en tabell med hur maximal överföringshastighet kan nås med EDR. Även variationen av pakets Signal-to-Noise Ratio samt begränsningar och förhållanden mellan dessa diskuteras. Artikeln jämför olika pakettyper inom ACL-protokollet och vilka typer av felkorrigering som är möjliga då de olika paketen överförs. Resultatet visar att paket av typen 3-DH5 borde ge en faktisk hastighet på 2,1 Mbps. Denna studie syftar till att mäta just denna pakettyps hastighet och resultaten kommer sedan kunna jämföras med de teoretiska resultaten som Razavi et al. diskuterar. 3-DH5 står för "3 Mbit Data High Rate with 5 Time Slots" och kan bära en maximal nyttolast på 1021 bytes men den har ingen kontrolldel som korrigerar fel.

Tosi et al. [11] gör en djupgående teoretisk analys av BLE med målet att identifiera de faktiska begränsningarna med tekniken i förhållande till applikationer. Studiens resultat visar att BLE:s teoretiska maxhastighet inte sträcker sig högre än ca 230 kbps om BLE:s 1M PHY används. Detta kan beräknas med hjälp av formel 6. Oftast finns andra parametrar som sänker denna hastighet ytterligare. Studien analyserar även den teoretiska energiförbrukningen för ett visst BLE-chip och uppskattar att en genomsnittlig förbrukning på  $\sim 13 \mu\text{A}$  om anslutningsintervallet är 2s och  $\sim 3200 \mu\text{A}$  om intervallet istället är 7,5 ms. Översatt till effekt innebär det mellan 39 och 9600  $\mu\text{W}$  beroende på applikation.

$$\delta_{Max} = \frac{\left\lfloor \frac{connInterval}{T_{round-trip}} \right\rfloor * N_{payload} * 8}{connInterval}$$

**Formel 6:** Beräkning av maximal överföringshastighet ( $\delta_{Max}$ ).  $N_{payload}$  är antalet nyttobytes i ett paket,  $connInterval$  är anslutningsintervallet [11]

Zanella [12] presenterar ett matematiskt ramverk för att analysera BR/EDR:s prestanda i kanaler med störningar. Studien visar att bästa prestanda i stort sett alltid uppnås om den största paketstorleken används vid dataöverföringar och gällande val av överföringshastighet bör 2 Mbps användas vid låga till medellåga SNR-förhållanden och 3 Mbps vid höga SNR-förhållanden. Resultaten från Zanellas studie har använts vid analys av denna studies resultat.

## 5 Empiri

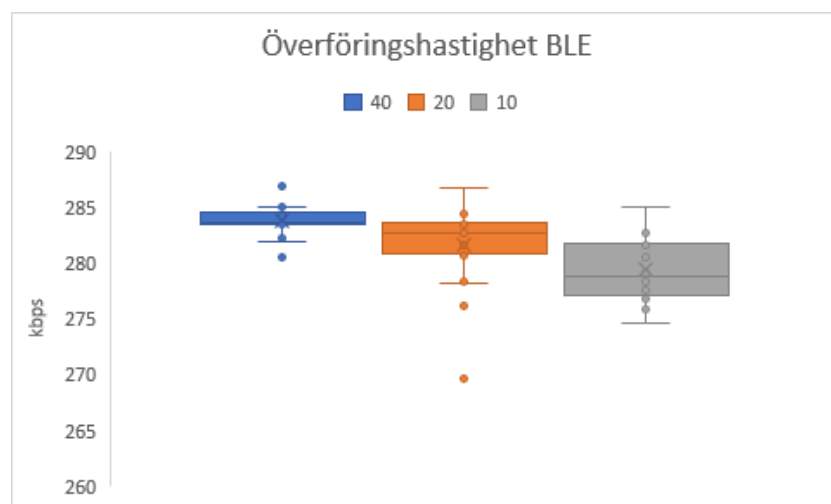
För att besvara studiens frågeställningar och uppfylla dess syfte så presenteras här de data som samlats in under experimentet för att sedan kunna analyseras tillsammans med data från litteraturstudier.

### 5.1 Överföringshastighet

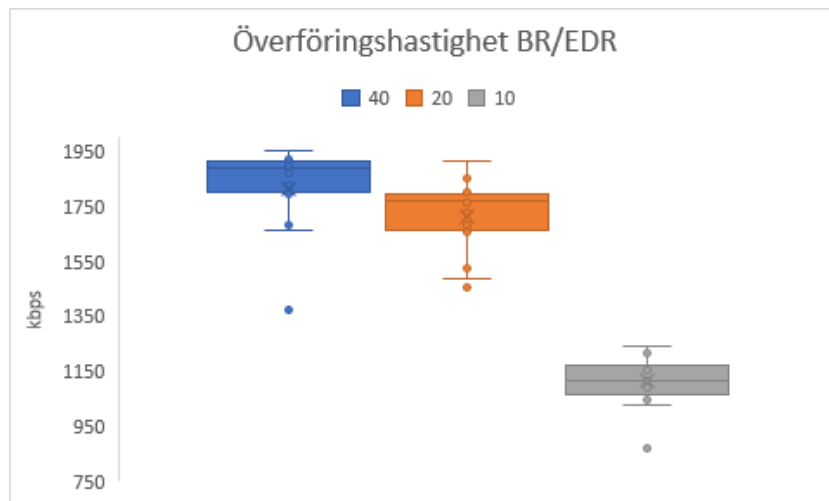
Här presenteras den insamlade data som berör överföringshastighet. Den uppmätta tiden för varje dataöverföring grupperades efter SNR-nivå och sammanställdes i en tabell, dessutom har värdena plottats ut i låddiagram. Då inga värden kunde erhållas på den lägsta SNR-nivån, 0 dB, finns inga värden presenterade för denna.

Överföringshastighet (kbps)						
	BLE			BR/EDR		
SNR	40 dB	20 dB	10 dB	40 dB	20 dB	10 dB
Medelvärde	283,8	281,6	279,4	1813	1715	1117
Median	283,7	239,0	278,8	1887	1768	1114
Standardavvikelse	1,364	3,738	2,781	166,6	124,6	86,81
Standardfel	0,3049	0,8359	0,6218	37,26	27,87	19,41

**Tabell 3:** Uppmätta värden för överföringshastighet vid respektive SNR-nivå



**Figur 11:** Spridningen för BLE:s överföringshastighet vid brusnivå 0, 1 och 2.



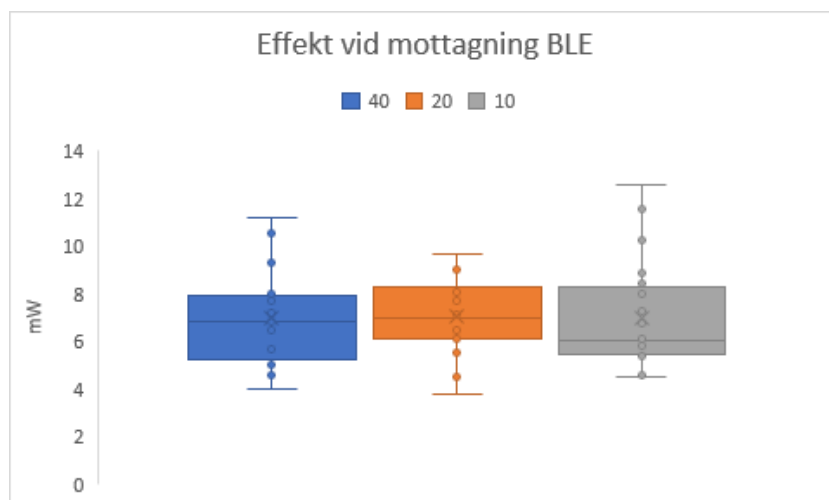
**Figur 12:** Spridningen för BR/EDR:s överföringshastighet vid brusnivå 0, 1 och 2

## 5.2 Energieffektivitet

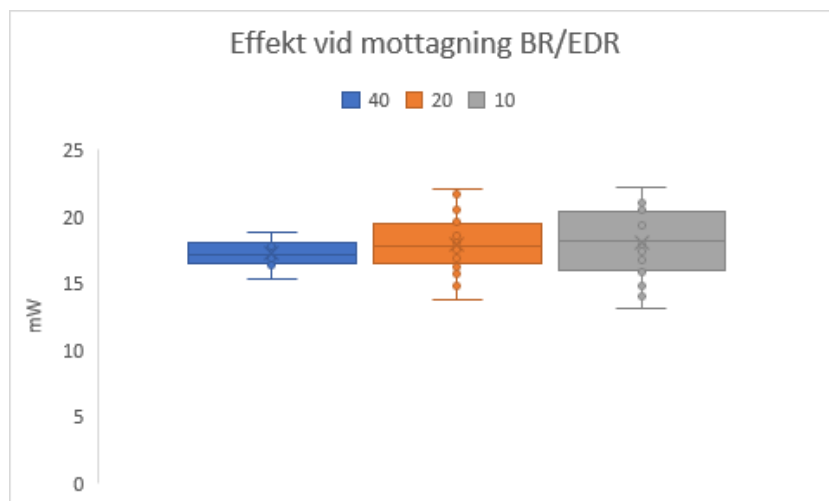
Här presenteras den insamlade data som berör strömförbrukning. De uppmätta förbrukningarna vid mottagning för varje SNR-nivå och för respektive teknik visas i följande låddiagram. Då den insamlade datan från experimentet var i enheten milliampere sekunder (mAs), konverterades den först till mWs genom att multiplicera med systemets spänning enligt effektformeln effekten (W) = spänningen (V) \* strömmen (A). Därefter dividerades de uppmätta energinivåerna med tiden för överföring och på så sätt kunde mottagningseffekten beräknas med enheten mW.

Effekt vid mottagning (mW)						
	BLE			BR/EDR		
SNR	40 dB	20 dB	10 dB	40 dB	20 dB	10 dB
Medelvärde	6,946	7,046	6,981	17,24	17,95	18,06
Median	6,843	6,944	6,040	17,08	17,80	18,17
Standardavvikelse	1,990	1,584	2,287	0,8866	2,294	2,587
Standardfel	0,445	0,354	0,511	0,1983	0,5131	0,5785

**Tabell 4:** Uppmätta värden för mottagningseffekt vid respektive SNR-nivå



**Figur 13:** Spridningen för BLE:s mottagningseffekt vid brusnivå 0, 1 och 2.

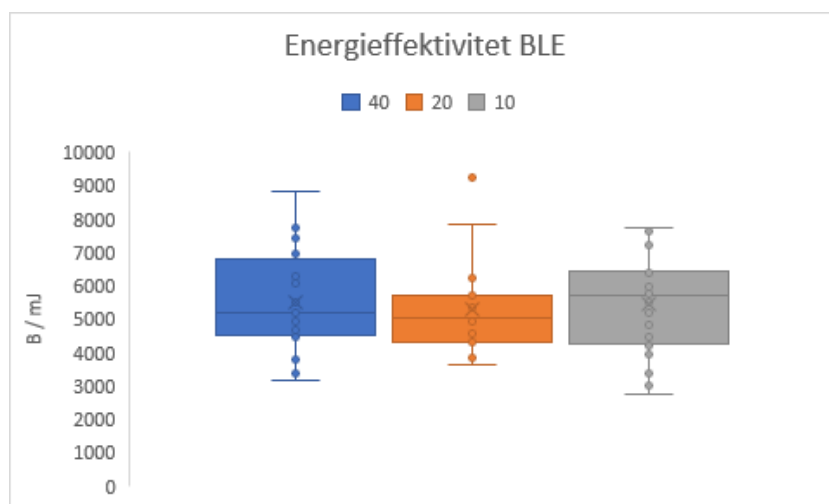


**Figur 14:** Spridningen för BR/EDR:s mottagningseffekt vid brusnivå 0, 1 och 2

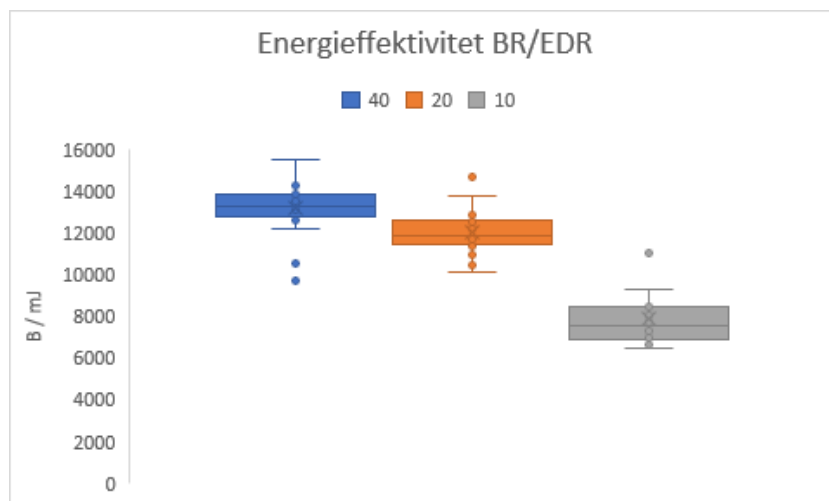
Följande tabell och diagram visar energieffektiviteten i enheten bytes per millijoule (B/mJ). Beräkningen har skett genom att dividera antalet bytes i en sändning med den energi som mätts upp för samma sändning.

Energieffektivitet (B/mJ)						
	BLE			BR/EDR		
SNR	40 dB	20 dB	10 dB	40 dB	20 dB	10 dB
Medelvärde	5509	5277	5437	13 170	12 050	7854
Median	5181	5042	5729	13 290	11 910	7574
Standardavvikelse	1541	1381	1449	1272	1110	1099
Standardfel	344,6	308,8	324,1	284,4	248,3	245,9

**Tabell 5:** Uppmätta värden för energieffektivitet vid respektive SNR-nivå



**Figur 15:** Spridningen för BLE:s effektförbrukning vid brusnivå 0, 1 och 2



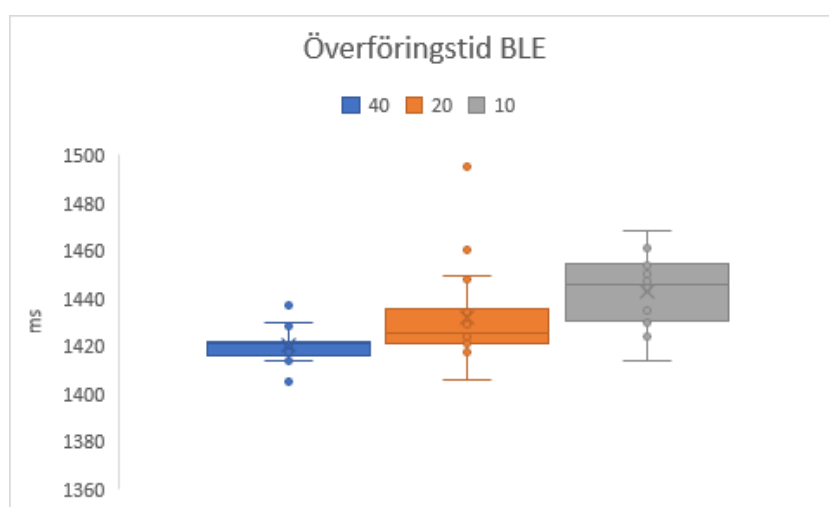
**Figur 16:** Spridningen för BR/EDR:s effektförbrukning vid brusnivå 0, 1 och 2

### 5.3 Störningskänslighet

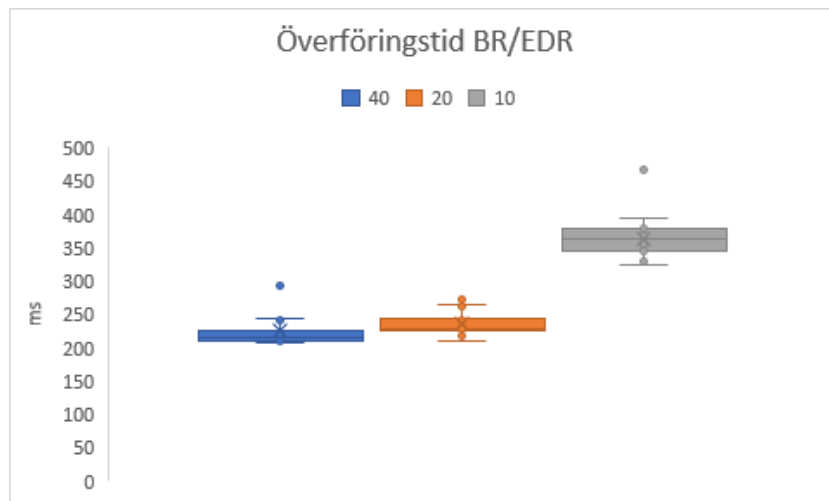
Här presenteras den insamlade data som berör störningskänslighet. Här har överföringstiden valts som mått för att på ett enkelt sätt se förändringen mellan de olika testerna. I följande tabell och diagram presenteras tiden i enheten millisekunder för respektive SNR-nivå och Bluetooth-teknik. Precis som för överföringshastigheten presenteras mätdata för de lägsta SNR-nivåerna för respektive teknik enbart i tabellen.

Överföringstid (ms)						
	BLE			BR/EDR		
SNR	40 dB	20 dB	10 dB	40 dB	20 dB	10 dB
Medelvärde	1421	1432	1443	225,0	236,9	363,9
Median	1421	1426	1446	214,0	228,5	362,5
Standardavvikelse	6,833	19,46	14,32	25,10	18,37	31,32
Standardfel	1,528	4,352	3,202	5,612	4,108	7,004

**Tabell 6:** Uppmätta överföringstider vid respektive SNR-nivå



**Figur 17:** Spridningen för BLE:s överföringstid vid brusnivå 0, 1 och 2



**Figur 18:** Spridningen för BR/EDR:s överföringstid vid brusnivå 0, 1 och 2

För att se studiens fullständiga empiri, hänvisas läsare till det Git-repository som finns under bilaga 1.

## 6 Analys

Här presenteras en analys av de data som samlats i studien. Analysen baseras på de teorier som behandlats i tidigare kapitel samt avser att besvara studiens frågeställningar.

### 6.1 Hur förhåller sig BR/EDR och BLE till varandra med avseende på överföringshastighet, energieffektivitet och störningskänslighet vid dataöverföring i olika signalförhållanden?

För att besvara den första frågeställningen krävs en jämförelse mellan de båda teknikerna baserad på de specificerade prestandaparametrarna överföringshastighet, energieffektivitet samt störningskänslighet. Studiens insamlade data kommer användas som grund för analysen. Nedan följer dels statistiska analyser och dels teoretiska sådana.

#### 6.1.1 Överföringshastighet

I specifikationen kan det läsas att BR/EDR skall ha en teoretisk maximal överföringshastighet på 2,18 Mbps och att BLE, efter härledning av specifikationens beskrivningar kring teknikens inställningar, skall kunna nå upp till 1,30 Mbps. Dessa siffror är baserade på att båda enheterna stödjer de senaste teknikerna och tilläggen i standarden. För BR/EDR krävs att den PHY som modulerar datan med 8DPSK används samt att paket av typen 3-DH5 skickas. När det gäller BLE måste LE 2M användas tillsammans med DLE och fem paket måste skickas per anslutningsintervall för att uppnå maximal hastighet.

Denna studies resultat visar att BR/EDR presterar bäst på alla SNR-nivåer gällande överföringshastighet. Med SNR på 40 dB erhöles en medelhastighet på 283,8 kbps för BLE vilket innebär att BR/EDR är ca 6,39 gånger snabbare. För 20 dBm SNR är värdena istället 281,6 kbps för BLE och 1715 kbps för BR/EDR vilket gör BR/EDR ca 6,09 gånger snabbare. Vid en SNR-nivå på 10 dB skickar BLE data i 279,4 kbps och BR/EDR i 1117 kbps vilket gör BR/EDR 4,00 gånger snabbare. Om överföringar vid de lägsta SNR-nivåerna för respektive teknik jämförs visar det sig att BR/EDR är 7,54 gånger snabbare. Dock skiljer det 4,5 dB mellan då båda SNR-nivåerna vilket är ett egentligt effektförhållande på 2,82 gånger. I tabell 7 presenteras en signifikansanalys med Students t-test mellan de båda teknikerna. I samtliga tester ses en tydlig skillnad mellan teknikerna där BR/EDR alltid ger en högre hastighet.

T-test överföringshastighet			
SNR	40 dB	20 dB	10 dB
t-värde	41,03	51,39	43,13
p-värde	4,430E-33	9,926E-37	6,946E-34
Resultat	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01

**Tabell 7:** Signifikansanalys av överföringshastighet

Då studiens empiriska data ej nått upp till den nivå som eftersöktes gällande BLE:s överföringshastighet har teoretiska beräkningar utförts enligt Bluetooth SIG:s formler [23] för att identifiera vilken faktor som misslyckats. Resultaten visar enligt dessa beräkningar att studiens artefakt enbart skickar ett datapaket per anslutningsintervall istället för det maximala antalet, fem. Därför har de värden som erhållits för BLE multiplicerats med en faktor 5 för att sedan utföra ytterligare en signifikansanalys enligt tabell 8. Här visas en betydligt mindre skillnad mellan teknikerna vid samtliga SNR-nivåer. Vid 10 dB skulle BLE teoretiskt vara snabbare än BR/EDR.



T-test överföringshastighet med uppskalad BLE			
SNR	40 dB	20 dB	10 dB
t-värde	10,56	10,87	-14,25
p-värde	7,356E-13	3,196E-13	8,014E-17
Resultat	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01

**Tabell 8:** Signifikansanalys av överföringshastighet där BLE:s värden skalats upp med faktor på 5

Om analysen utgår från de data som samlats in visar det sig att BR/EDR har ett klart övertag vid samtliga tester.

### 6.1.2 Energieffektivitet

När en signifikansanalys görs på studiens insamlade data som berör mottagningseffekt ses en tydlig fördel för BLE som förväntat (se tabell 9). Om de båda teknikernas medeleffekter jämförs sinsemellan syns ett förhållande på 2,48. Mottagningseffekten för BLE håller sig stadig även under ansträngande miljöer med stora störningar. Den förändring som syns mellan respektive störningsnivå rör sig i intervallet  $\pm 100 \mu\text{W}$  eller ca 1,4%. För BR/EDR syns en liten ökning i mottagningseffekt när SNR-nivån sjunker. Totalt ökar mottagningseffekten med ca 4,8% mellan SNR-nivåerna 40 dB och 10 dB.

T-test: Effekt vid mottagning			
SNR	40 dB	20 dB	10 dB
t-värde	21,12	17,49	14,35
p-värde	1,335E-22	9,102E-20	6,329E-17
Resultat	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01

**Tabell 9:** Signifikansanalys av mottagningseffekt

Om den totala datamängden som överförs i en sändning delas med energiförbrukningen för densamma erhålls energieffektiviteten i bytes per millijoule. För de tester som genomförts i denna studie ses en markant skillnad med fördel för BR/EDR gällande energieffektiviteten som signifikansanalysen i tabell 10 visar. Vid en SNR-nivå på 40 dB har BR/EDR en 2,39 gånger högre energieffektivitet än BLE. Vid 20 dB är förhållandet istället 2,28 och vid 10 dB börjar BLE närma sig och BR/EDR har då bara 1,44 gånger högre effektivitet. Detta analyseras närmare under kapitel 6.1.3.

T-test: Energieffektivitet			
SNR	40 dB	20 dB	10 dB
t-värde	17,14	17,09	5,941
p-värde	1,793E-19	1,978E-19	6,851E-07
Resultat	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01

**Tabell 10:** Signifikansanalys av energieffektivitet

Då effekten tycks ligga stadigt under mottagning görs även en jämförelse, i form av en signifikansanalys, av hur energieffektiviteten skulle se ut om överföringstiderna för BLE skalats ned med en faktor på 5 men mottagningseffekten bibehållits. Detta kan antas rimligt då den mottagande enheten håller sig vaken under hela anslutningsintervallet och därmed bör ligga på samma effektnivå oavsett om paket tas emot under hela intervallet eller ej. Värdena som syns i tabell 11 talar tydligt för att

BLE skulle ge en betydligt bättre energieffektivitet om dess maximala hastighet skulle uppnås.

T-test: Energieffektivitet med uppskalad BLE			
SNR	40 dB	20 dB	10 dB
t-värde	-8,235	-9,168	-11,79
p-värde	5,616E-10	3,605E-11	2,868E-14
Resultat	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01

**Tabell 11:** Signifikansanalys av energieffektivitet då BLE:s värden skalats upp med en faktor på 5

### 6.1.3 Störningskänslighet

För att analysera studiens empiri utifrån parametern störningskänslighet har en signifikansanalys gjorts på testernas överföringstid. I kombination med energieffektiviteten ger det en indikation på att BLE i de flesta fallen tycks vara mer resistent mot störningar och brus i dess omgivning. I tabell 12 visas resultaten av de t-test som gjorts på mätningarnas överföringstider. Precis som med överföringshastigheten syns här en stor skillnad mellan teknikerna. Denna jämnar dock ut sig markant när SNR-nivån börjar sjunka och BLE visar starkare tålighet mot störningar. Om de båda teknikernas respektive mätningar från brusnivå 0 jämförs med värden från brusnivå 2, ses ett förhållande på ca 0,98 för BLE och 0,62 för BR/EDR.

T-test: Överföringstid			
SNR	40 dB	20 dB	10 dB
t-värde	-205,6	-199,6	-140,1
p-värde	1,683E-59	5,118E-59	3,494E-53
Resultat	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01

**Tabell 12:** Signifikansanalys av överföringstiden vid de olika SNR-nivåerna

Om tidigare analyserade parametrar vägs in ses en generell trend för att BLE är tåligare än BR/EDR när det gäller störningar i omgivningen. I tabell 13 jämförs teknikernas mätningar vid 40 dB SNR med de för 10 dB SNR. Gällande överföringshastighet försämras den 59,8% mer för BR/EDR än för BLE. Energieffektiviteten uppvisar liknande indikationer med en försämring på 65,5%. Även mottagningseffekten försämras, om än marginellt, mer för BR/EDR än för BLE.

Förhållande mellan 40 dB och 10 dB			
	BLE	BR/EDR	Skillnad
Överföringshastighet	0,9845	0,6162	59,8%
Energieffektivitet	0,9869	0,5965	65,5%
Mottagningseffekt	1,005	1,048	4,09%

**Tabell 13:** Jämförelse av prestandaparmetrar mellan SNR-nivåerna 40 dB och 10 dB

6.2 Vilka likheter eller skillnader i mätresultat kan påvisas mellan tidigare forskning och studien kring utvärderingar av BLE - BR/EDR med avseende på överföringshastighet, energieffektivitet och störningskänslighet?

Resultaten i Nikoukar et al.:s [7] jämförelse pekar på att en stor brist med BR/EDR är dess strömförbrukning. Denna studies resultat ger indikationer på att BR/EDR har en

2,5 gånger större medeleffekt vid mottagning av data vilket kan ge viss validering till tidigare uppskattning. Gällande överföringshastigheten menar Nikoukar et al. att data skickad med BLE potentiellt skulle kunna uppnå en hastighet på 1,4 Mbps medan överföringar med BR/EDR skulle kunna nå upp till 2,1 Mbps. Då denna studies resultat inte gav förväntade hastigheter på BLE kan den därmed inte heller ställas i jämförelse mot tidigare uppskattningar. Anledningen till den bristande hastigheten är troligtvis, som tidigare nämnts i 6.1.1, att enbart ett paket skickas per anslutningsintervall istället för fem. Däremot ses hastigheter för BR/EDR på upp emot 1,81 Mbps vilket betyder att de teoretiska uppskattningarna i Nikoukar et al.:s studie bara är 16% högre än de uppmätta värdena i denna studie.

Razavi et al. [10] och Zanella [12] presenterar jämförelser hur de olika EDR-paketerna presterar i kanaler med varierande SNR-nivåer. I tabell 14 visas en jämförelse mellan denna studies uppmätta värden och de två tidigare studiernas beräknade värden. Här syns en tydlig skillnad på de lägre SNR-nivåerna där EDR-paketet förväntas ha stora svårigheter att överföra data medan de uppmätta resultaten pekar åt andra hållet. Skillnaden kan bero på att det brus som avses i de olika teoretiska studierna beräknats av matematiska modeller medan det brus som genererats i denna studie består av faktisk 1024QAM-modulerad data.

Överföringshastighet per SNR-nivå (kbps)			
	40 dB	20 dB	10 dB
Uppmätta värden	1813	1715	1117
Zanella	2178	800	0
Razavi et. al	1250	0	0

**Tabell 14:** Jämförelse mellan uppmätta hastigheter och beräknade sådana.

Tosi et al. presenterar en ekvation för att beräkna maximal överföringshastighet baserad på antal paket per anslutningsintervall. Dock beräknas dessa värden utifrån den tidigare PHY:n, LE 1M, och med en nyttolast på 20 bytes men ekvationen kan justeras för att beräkna hastigheten för LE 2M med 244 bytes nyttolast där ett paket tar 1408  $\mu$ s att skicka och anslutningsintervallet är 7,5 ms [23]. Formel 4 visar hur detta beräknas. Om värden för den pakettyp denna studie testat appliceras i formel 4 erhålls en maximal överföringshastighet på 1,30 Mbps. Artefaktens maximala uppmätta hastighet nådde dock inte högre än 283 kbps vilket enbart är ca 22% av den beräknade maxhastigheten.

## 7 Diskussion och slutsats

Kapitlet ger en sammanfattande beskrivning av studiens resultat. Vidare beskrivs studiens implikationer och begränsningar. Dessutom beskrivs studiens slutsatser och rekommendationer. Kapitlet avslutas med förslag på vidare forskning.

### 7.1 Resultat

Detta arbete har haft som avsikt att svara på två frågeställningar för att uppfylla syftet med studien. De resultat som uppnått presenteras under följande rubriker.

#### 7.1.1 Hur förhåller sig BR/EDR och BLE till varandra med avseende på överföringshastighet, energieffektivitet och störningskänslighet vid dataöverföring i olika signalförhållanden?

Utifrån den empiriska data som samlats in och den analys som utförts så kan mer eller mindre tydliga skillnader ses mellan teknikerna. Gällande överföringshastighet visar denna studies resultat att BR/EDR ger en markant fördel gentemot BLE. Även om önskat antal paket per anslutningsintervall skulle ha uppnåtts hade resultatet med största sannolikhet fortfarande pekat på att den äldre tekniken presterat bättre, om än med betydligt mindre marginaler. Att skillnaden mellan teknikerna har minskat väcker ett intresse för att använda BLE i applikationer där större datamängder skall skickas om övriga fördelar vägs in i valet av teknik.

De värden som uppmätts under denna studie visar på att BR/EDR har en högre energieffektivitet än BLE. Dock syns en tydlig indikation på att BLE har en lägre medeleffekt under mottagning med en faktor på 2,48 och i och med att medeleffekten är densamma under mottagningssekvensen tyder det på att en brytpunkt finns där BLE skulle ge lika hög eller högre effektivitet om dess hastighet skulle öka. Vid jämförelse av teknikerna då BLE:s uppmätta hastighet skalats upp fem gånger, i enlighet med beskrivningen i kapitel 6.1.1, ses istället ett omvänt förhållande där BLE ger mer än dubbelt så bra energieffektivitet än BR/EDR.

Gällande störningskänslighet tyder alla indikationer från studiens empiri och analys på att BLE tillåter betydligt stabilare anslutningar. Detta visar sig genom att dess hastigheter påverkas mindre av de testade brusnivåerna. Även energieffektiviteten påverkas negativt för BR/EDR vid försämrade radioförhållanden medan BLE knappt påverkas alls då SNR-nivån rör sig från 40 dB till 10 dB. Dessutom ger BLE pålitliga överföringar hela vägen ner till SNR-nivåer på 3 dB medan BR/EDR:s tester först kunde genomföras då SNR-nivån var 7,5 dB eller högre. Detta kan bero på hur de olika teknikerna hanterar omsändningar och felkorrigeringar samt hur de modulerar sina datapaket.

#### 7.1.2 Vilka likheter eller skillnader i mätresultat kan påvisas mellan tidigare forskning och studien kring utvärderingar av BLE - BR/EDR med avseende på överföringshastighet, energieffektivitet och störningskänslighet?

Trots att önskade hastigheter ej uppnåtts i denna studie, troligtvis på grund av tidigare nämnt antagande att enbart ett paket skickats per anslutningsintervall, kan ändå vissa indikationer ses för att validera delar av de tidigare utvärderingar som använts som grund för detta arbete. Resultatet i Nikoukar et al.:s studie kan delvis valideras då denna studie visar beräkningar där BR/EDR:s hastighet närmar sig de maximala gränserna samt i och med det faktum att BR/EDR har en 2,5 gånger högre mottagningseffekt än BLE enligt de uppmätta värdena. Däremot kan den beräknade hastigheten för BLE ej valideras då de förväntade resultaten ej uppnåtts. Detsamma gäller för Tosi et al.:s teoretiska beräkningar. Zanella och Razavis et al.:s matematiska modeller för BR/EDR:s störningskänslighet visar på betydligt sämre teoretisk

prestanda än vad som uppmätts i denna studie. Därmed kan inte heller dessa resultat valideras. En anledning till skillnaden mellan de matematiska resultaten och de verkliga kan vara att olika typer av brusgenerering påverkar kommunikationen på olika sätt.

## 7.2 Implikationer

Det resultat som denna studie har bidragit med kan komma att användas som ett underlag för val av teknik när det önskade användningsområdet inte klart och tydligt kan definieras utifrån de vanliga profiler som teknikerna i första hand är anpassade för. Studien indikerar att BLE börjar närma sig BR/EDR:s användningsområden och håller bättre prestanda i energieffektivitet och störningskänslighet men att hastigheten fortfarande brister.

## 7.3 Begränsningar

Då denna studies artefakt enbart innehållit en modell av Bluetooth-modul samt en modell av Android-enhet kan ingen generalisering ske för tekniken i sig utan endast en indikation på hur resultaten bör se ut i liknande uppsättningar. Vidare har studien begränsats av artefaktens oförmåga att skicka mer än ett datapaket per anslutningsintervall vilket ledde till att överföringshastigheten för BLE inte nådde upp till en rimlig nivå. Istället har antaganden gjorts utifrån Bluetooth-specifikationen och hastigheten skalats upp för att motsvara det teoretiska maxantalet paket per anslutningsintervall.

Kunskapen kring de instrument som användes vid experimentet var begränsad vilket kan ha lett till vissa inskränkningar i studiens reliabilitet. Delvis användes enbart en modulering av den störsignal som simulerade radiobrus och dessutom har mätinstrumentens fulla potential troligtvis inte utnyttjats för att ge bästa möjliga empiri.

## 7.4 Slutsatser och rekommendationer

För att sammanställa denna studies resultat gällande de båda Bluetooth-teknikernas prestanda utifrån olika parametrar visar det sig att BR/EDR fortfarande har övertaget, gällande hastighet, precis som specifikationen talar för. Om de övriga parametrar som undersökts i denna studie vägs in och om de är relevanta för en applikation är BLE istället att föredra i de flesta fallen. Energieffektiviteten beror på om en brytpunkt nås där BLE:s effektivitet blir större än BR/EDR:s. Då medeleffekten vid mottagning är betydligt lägre för BLE, krävs att dess hastighet är hög nog för att prestera bättre än BR/EDR effektivitetsmässigt. BLE är även robustare i störningstäta miljöer än BR/EDR och klarar SNR-nivåer ned till 3 dB enligt denna studies resultat.

Summerat innebär detta att BLE enligt de flesta måtten borde vara att föredra i och med Bluetooth version 5 samt att det har framtiden för sig.

## 7.5 Vidare forskning

Det skulle vara intressant att göra motsvarande experimentet men i en sluten radiomiljö, d.v.s. att koppla ihop sändare, mottagare, brusgeneratorer samt spektrumanalysator med kablar i stället för att använda luften som medium. På så sätt skulle alla signalnivåer vara kända och manipulerbara.

Ytterligare vidare forskning skulle vara att mer djupgående hitta brytpunkterna mellan teknikerna för att på så sätt skapa en tabell med de exakta måtten på energieffektivitet samt överföringshastighet. Där skulle även symmetriska tester göras för att se hur teknikerna presterar då sändning och mottagning görs parallellt.

## 8 Referenser

- [1] N. Unuth, "Lifewire," 11 April 2018. [Online]. Available: <https://www.lifewire.com/wifi-explained-3426413>. [Använd 7 April 2019].
- [2] Zigbee Alliance, "Standards: Zigbee Specification," 2014. [Online]. Available: <https://www.zigbee.org/download/standards-zigbee-specification/>. [Använd 14 Feb 2019].
- [3] K. Haataja, K. Hyppönen, S. Pasanen och P. Toivanen, Bluetooth Security Attacks, Berlin: Springer, 2013.
- [4] Bluetooth SIG, "Our History | Bluetooth Technology Website," 2018. [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com/about-us/our-history>. [Använd 7 April 2019].
- [5] Bluetooth SIG, "RFCOMM With TS 07.10 - Serial Port Emulation," Bluetooth SIG, 2012.
- [6] Bluetooth SIG, "Bluetooth Serial Port Profile v1.2," Bluetooth SIG, 2012.
- [7] A. Nikoukar, S. Raza, A. Poole, M. Güneş och B. Dezfouli, "Low-Power Wireless for the Internet of Things:," *Access IEEE*, vol. 6, nr 1, pp. 67893-67926, 2018.
- [8] Bluetooth SIG, "Bluetooth Core Specification v5.1," Bluetooth SIG, 2019.
- [9] Bluetooth SIG, "GATT Overview | Bluetooth Technology Website," 2018. [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com/specifications/gatt/generic-attributes-overview/>. [Använd 28 April 2019].
- [10] R. Razavi, M. Fleury och M. Ghanbari, "Correct Bluetooth EDR FEC performance with SEC-DAEC decoding," *Electronics Letters*, vol. 43, nr 22, pp. 1209-1211, 2007.
- [11] J. Tosi, F. Taffoni, M. Santacatterina, R. Sannino och D. Formica, "Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy: A Systematic Review," *Sensors*, vol. 17, nr 12, p. 2898, 2017.
- [12] A. Zanella, "A Mathematical Framework for the Performance Analysis of Bluetooth with Enhanced Data Rate," *IEEE Transactions on communication*, vol. 57, nr 8, pp. 2463-2473, 2009.
- [13] Cypress Semiconductor Corporation, "Enhanced Low Power BR/EDR/BLE Bluetooth 5.0 SOC," 2018. [Online]. Available: <https://www.cypress.com/file/414181/download>.
- [14] R. Gunnarsson, "Kunskapsansats - kvalitativt eller kvantitativt perspektiv?," 2009. [Online]. Available: <http://www.infovoice.se/fou/bok/10000002.shtml>. [Använd 09 April 2019].
- [15] R. Patel och B. Davidsson, *Forskningsmetodikens Grunder*, Lund: Studentlitteratur, 2011.
- [16] R. J. Wieringa, *Design Science Methodology - for Information Systems and Software Engineering*, Berlin, Hedielsberg: Springer, 2014.
- [17] A. R. Hevner, S. T. March, J. Park och S. Ram, "Design Science in Information Systems Research," *MIS Quarterly*, vol. 28, nr 1, pp. 75-105, 2004.
- [18] Rohde&Schwarz, "R&S®SMBV100A Vector Signal Generator," 2018. [Online]. Available: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/service\\_support\\_30/SMBV100A\\_bro\\_en\\_5214-1114-12\\_0600\\_120dpi.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/service_support_30/SMBV100A_bro_en_5214-1114-12_0600_120dpi.pdf). [Använd 10 April 2019].
- [19] M. Røjne, *Antenn och kabel-tv-teknik*, Motala: TeamSat, 2009.

- [20] D. L. Jones, "The  $\mu$ Current - A professional precision current adapter for Multimeters," 2010. [Online]. Available: <http://alternatezone.com/electronics/ucurrent/uCurrentArticle.pdf>. [Använd 10 April 2019].
- [21] P. Blomkvist och A. Hallin, Metod för teknologer, Lund: Studentlitteratur, 2014.
- [22] K. Vännman, Matematisk statistik, Lund: Studentlitteratur, 2002.
- [23] Bluetooth SIG, "Exploring Bluetooth 5 - How Fast Can It Be? | Bluetooth Technology Website," Bluetooth SIG, 20 feb 2017. [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com/blog/exploring-bluetooth-5-how-fast-can-it-be/>. [Använd 5 maj 2019].
- [24] Bluetooth SIG, "Bluetooth 5: Go Faster. Go Further.," Bluetooth SIG, 2019.

## 9 Bilagor

Bilaga 1      Länk till GitHub-repo med kod och insamlad empiri.



## Bilaga 1

<https://github.com/jontisch/examensarbete-bergelin-och-ericsson>