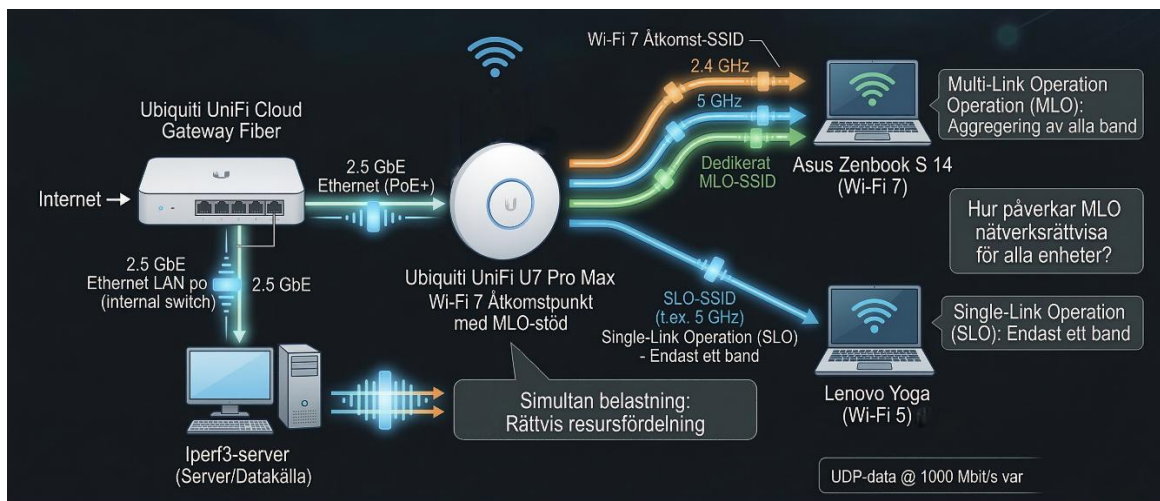




Nätverksrättvisa i praktiken: En studie av hur Multi-Link Operation (MLO) påverkar nätverksprestandan i hemmamiljö

Pontus Kristoffersson

Simon Bard



EXAMENSARBETE

Nätverksteknik med IT-säkerhetsprogrammet, 120 hp

Institutionen för ingenjörsvetenskap, Högskolan Väst

Nätverksrättvisa i praktiken: En studie av hur Multi-Link Operation (MLO) påverkar nätverksprestandan i hemmamiljö

Sammanfattning

Antalet enheter som kräver trådlös anslutning ökar konstant, och mängden anslutna enheter har aldrig varit större. Med fler anslutna enheter ökar kraven på stabilitet och tillförlitlighet. Tekniken Multi-Link Operation (MLO) lanserades i samband med Wi-Fi 7 och utgör en av de mest betydelsefulla förändringarna i hur trådlös kommunikation fungerar.

Syftet med denna studie var att utvärdera hur tekniken MLO-tekniken presterar i en hemmamiljö, med fokus på genomströmning, fördröjningsvariation och nätverksrättvisa.

För att utvärdera detta genomfördes ett experiment där Wi-Fi 7 jämfördes med äldre standarder på tre olika avstånd. Datainsamlingen automatiserades med hjälp av programmeringsspråket Python och programmet iPerf3. Skillnader i resursfördelningen analyserades med formeln Jain's Fairness Index.

Resultaten visar att MLO-tekniken markant ökar genomströmningen och i princip eliminerar fördröjningsvariationen på de kortare avstånden. Tekniken fungerar som en form av nätverksstabilisator, där även SLO-enheterna gynnas när MLO aktiveras. MLO-tekniken bidrog även till en jämn resursfördelning i nätverket på de högre frekvensbanden, med undantag för 2,4 GHz-bandet där tekniken hade svårt att kompensera för störningar. Tekniken tappar mycket av sin effektivitet på längre avstånd, där 6 GHz-bandets räckviddsbegränsningar och frekventa frekvensbyten i stället resulterar i en ökad fördröjningsvariation.

Slutsatsen är att MLO-tekniken är en effektiv teknik som löser många problem i nätverket, såsom brister i prestanda och stabilitet där många enheter konkurrerar om utrymme, förutsatt att avstånden inte är extrema och att tillräcklig signalstyrka finns. Tekniken är dock ingen universell lösning, då fysiska hinder och de högre frekvensbandens räckviddsbegränsningar fortfarande skapar utmaningar på längre avstånd.

Datum:	2026-04-26
Författare:	Pontus Kristoffersson, Simon Bard
Examinator:	Andreas de Blanche
Handledare:	Rashid Ali, Högskolan Väst
Program:	Nätverksteknik med IT-säkerhet, 120 hp
Huvudområde:	Datateknik
Utbildningsnivå:	Grundnivå
Kurskod:	EXN300, 7,5 hp
Nyckelord:	<i>Wi-Fi 7, Multi-Link Operation (MLO), Trådlösa Nätverk, Genomströmning, Fördröjningsvariation, Nätverksrättvisa</i>
Utgivare:	Högskolan Väst, Institutionen för ingenjörsvetenskap 461 86 Trollhättan Tel: 0520-22 30 00 Fax: 0520-22 32 99, www.hv.se

DEGREE PROJECT

Network fairness in practice: A study of how Multi-Link Operation (MLO) affects network performance in a home environment

Summary

An increasing number of devices require wireless connectivity, and the volume of connected devices has never been greater. With more connected devices, the demand for network stability and reliability increases. The Multi-Link Operation (MLO) technology was launched with Wi-Fi 7 and constitutes one of the most significant changes in how wireless communication works.

The purpose of this study was to evaluate how the MLO technology performs in a home environment focusing on throughput, delay variation and network fairness.

To evaluate this an experiment was conducted in which Wi-Fi 7 was compared with older standards at three different distances. Data collection was automated using the Python programming language and the iPerf3 software. Differences in resource allocation were analyzed using Jain's Fairness Index.

The results show that the MLO technology significantly increases throughput and virtually eliminates delay variation at shorter distances. The technology acts as a form of network stabilizer, even benefiting older SLO devices when MLO is activated. MLO technology also contributed to a highly balanced resource allocation in the network on the higher frequency bands, except for the 2.4 GHz band, where the technology struggled to compensate for the interference. The technology lost much of its effectiveness at longer distances, where the range limitations of the 6 GHz band and frequent frequency switching instead led to increased delay variation.

The conclusion is that MLO is a highly effective technology that solves many network problems such as performance and stability where multiple devices compete for resources, provided that the distances are not extreme and sufficient signal strength is present. However, the technology is not a universal solution, as physical objects and range limitations of higher frequency bands still create challenges at longer distances.

Date:	April 26, 2026
Author:	Pontus Kristoffersson, Simon Bard
Examiner:	Andreas de Blanche
Advisor:	Rashid Ali, University West
Programme:	Network Technology and IT-security, 120 HE credits
Main field of study:	Computer Engineering
Education level:	First cycle
Course code:	EXN300, 7.5 HE credits
Keywords:	Wi-Fi 7, Multi-Link Operation (MLO), Wireless Networks, Throughput, Jitter, Network Fairness
Publisher:	University West, Department of Engineering Science SE-461 86 Trollhättan, Sweden Phone: + 46 520 22 30 00, Fax: + 46 520 22 32 99, www.hv.se

Förord

Denna rapport är en B-uppsats inom nätverksteknik vid Högskolan Väst i Trollhättan. Studien fokuserar på hur tekniken MLO praktiskt fungerar i en hemmamiljö.

Arbetsfördelningen har sett ut som följande:

- Pontus Kristoffersson har ansvarat för att sammanställa och analysera mätdata, strukturerat upp insamlingen samt framställandet av alla grafer som inkluderar Jain's Fairness Index. Båda har gemensamt hjälpts åt att skriva rapporten.
- Simon Bard har ansvarat för konfiguration av hårdvaran, insamling av data genom Python-skript och iPerf3-mjukvaran samt framställandet av alla grafer som inkluderar genomströmning och fördröjningsvariation. Båda har gemensamt hjälpts åt att skriva rapporten.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Rashid Ali på Högskolan Väst för stöd och vägledning under arbetets gång.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	ii
Summary.....	iii
Förord.....	iv
Nomenklatur.....	vii
1. Inledning.....	1
1.1 Problemformulering	1
1.2 Studiens relevans	2
1.3 Syfte och Frågeställningar.....	2
2. Bakgrund	3
2.1 Wi-Fi teknikens historia och utveckling	3
2.2 Centrala teknologier för nätverkseffektivitet	4
2.2.1 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access).....	4
2.2.2 TWT (Target Wake Time)	4
2.2.3 MIMO (Multiple Input, Multiple Output).....	5
2.2.4 QAM (Quadrature Amplitude Modulation).....	5
2.3 Multi-Link Operation (MLO)	6
2.3.1 Driftlägen inom Multi-Link Operation (MLO)	6
3. Metod.....	8
3.1 Testmiljö och Nätverkstopologi.....	8
3.2 Hårdvara och klientenheter	9
3.3 Testkonfiguration och parametrar.....	10
3.3.1 Valda mätparametrar.....	10
3.3.2 Hårdvaruinställningar	11
3.3.3 Operativsystem och drivrutiner	11
3.3.4 iPerf3	12
3.4 Genomförande och datainsamling	13
3.4.1 Automatiserad testcykel.....	15
3.4.2 <i>Jain's Fairness Index</i>	15
4. Resultat och Analys.....	16
4.1 Obelastat referensnätverk	16
4.2 Simultan belastning: SLO mot MLO	20
4.3 Simultan belastning: MLO mot MLO	25
4.4 Nätverksrättvisa.....	30
5. Diskussion.....	32
5.1 Diskussion av resultat.....	32
5.1.1 MLO-teknikens påverkan på nätverkets totala kapacitet	33
5.1.2 6 GHz-bandets räckviddsproblematik	33
5.1.3 2,4 GHz-bandets begränsningar och miljöns påverkan.....	34
5.1.4 Fördröjningsvariationen och MLO-teknikens stabilitet	34
5.1.5 Nätverksrättvisan och resursfördelningen.....	35
5.2 Diskussion av metod	36
5.2.1 Val av hårdvara	36
5.2.2 Miljöns påverkan	36
5.2.3 TCP mot UDP.....	37

5.2.4	Konfiguration av kanalbredd.....	37
5.3	Förslag på framtida arbeten och förbättringar.....	38
6.	Slutsatser.....	39
	Referenser	40

Bilagor

A.	Spektrumanalys.....	A1
B.	Nätverksinställningar för åtkomstpunkt	B1
C.	Verifiering av MLO-anlutning för Asus Zenbook	C1
D.	Verifiering av MLO-anlutning för Asus B850	D1
E.	Sammanställning av mätdata	E1
F.	Python-skript för automatiserad datainsamling.....	F1

Nomenklatur

DL-MU-MIMO – Downlink Multi-User Multiple Input Multiple Output

EHT – Extremely High Throughput

EMLMR - Enhanced Multi-Link Multi Radio

EMLSR – Enhanced Multi-Link Single Radio

IDC – In Device Coexistence

LAN – Local Area Network

MIMO – Multiple Input Multiple Output

MLMR – Multi-Link Multi-Radio

MLSR – Multi-Link Single-Radio

MLO – Multi-Link Operation

MU-MIMO – Multi-User Multiple Input Multiple Output

NSTR – Non-Simultaneous Transmit and Receive

NTP – Network Time Protocol

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access

PoE – Power over Ethernet

QAM – Quadrature Amplitude Modulation

SLO – Single-Link Operation

SSID – Service Set Identifier

SU-MIMO – Single-User Multiple Input Multiple Output

STR – Simultaneous Transmit and Receive

TWT – Target Wake Time

TCP – Transmission Control Protocol

UDP – User Datagram Protocol

UL-MU-MIMO – Uplink Multi-User Multiple Input Multiple Output

VR – Virtual Reality

WLAN – Wireless Local Area Network

1. Inledning

Allt eftersom samhället blivit alltmer digitaliserat har trådlös kommunikation gått från att vara en bekvämlighet till en nödvändighet. Användningen av internet har ökat markant de senaste decennierna. Enligt statistik från International Telecommunication Union (ITU) var 16 procent av världens befolkning uppkopplad mot internet år 2005, det innebär ungefär 1 miljard användare. År 2025 är hela 74 procent av världens befolkning uppkopplad mot internet, vilket innebär cirka 6 miljarder människor. [1].

Denna stora tillväxt, tillsammans med nya tjänster såsom 8K-video, Virtual Reality (VR) och molnbaserade tjänster, skapar ett behov av att stödja tung datatrafik till ett stort antal användare. Dessa krav drev utvecklingen framåt mot ”Extremely High Throughput”, mer känt som Wi-Fi 7 [2], [3].

En av de mest centrala aspekterna i Wi-Fi 7 för att uppnå högre genomströmning och stabilitet är tekniken Multi-Link Operation (MLO). Tekniken MLO innebär inte bara en hastighetsökning, utan en banbrytande förändring i hur tillförlitlighet hanteras i trådlösa nätverk. Eftersom de traditionella frekvensbanden börjar bli alltmer överbelastade och trånga, möjliggör MLO en mer effektiv frekvenshantering genom att dynamiskt byta mellan de olika frekvensbanden [4].

1.1 Problemformulering

Multi-Link Operation-tekniken i Wi-Fi 7 medför tekniska utmaningar. Ett kritiskt problem är det som kallas ”In-Device-Coexistence (IDC)-interferens. Detta uppstår i kompakta enheter där antennerna sitter väldigt nära varandra eller har för dålig isolering. Detta gör att radiosignalerna kan störa ut varandra. I dessa enheter kan inte MLO fungera fullt ut [5].

Det finns också en osäkerhet kring hur resursfördelningen sker i ett nätverk med äldre enheter och MLO-enheter. Eftersom MLO har möjligheten att arbeta på flera frekvensband samtidigt, finns det ett behov av att undersöka hur detta påverkar nätverksrättvisan, då äldre enheter inte har möjligheten att utnyttja flera frekvensband samtidigt, på det sätt MLO-enheter har [6]. Denna osäkerhet styrks av Matsuda m.fl. som påpekar att MLO-enheter riskerar att inte lämna tillräckligt med plats för de äldre SLO-enheter [7].

Det är i dag oklart om den nya teknikens effektiva resursutnyttjande sker på bekostnad av äldre enheter i en hemmamiljö, eller om det sker en balansering av resursfördelningen.

1.2 Studiens relevans

Idag har de flesta studier av Wi-Fi 7-tekniken Multi-Link Operation (MLO) skett i virtuella miljöer eller laboratoriemiljöer. Med hjälp av dessa studier har de teoretiska fördelarna kunnat fastställas.

Denna studie är högst relevant då det i dag saknas tillräckligt med studier som belyser hur MLO fungerar i en hemmamiljö, där störningar, fysiska hinder samt avstånd sätter tekniken på prov. Detta styrks av Matsuda m.fl., som säger att effekterna av MLO-enheter betående på nätverksprestanda ännu inte är tillräckligt klarlagda [7].

Genom att utföra praktiska mätningar på olika avstånd i en hemmamiljö med störningar bidrar denna studie med insikt i hur teknikens faktiska prestanda påverkar slutanvändaren.

1.3 Syfte och Frågeställningar

Syftet med denna studie är att genom mätningar utvärdera skillnader i prestanda och stabilitet mellan Wi-Fi 7:s Multi-Link Operation-teknik och äldre Wi-Fi-standarder i en hemmamiljö vid olika avstånd, samt att analysera hur tekniken MLO påverkar nätverksrättvisan i ett hem med flera enheter.

Fråga 1: Vilka skillnader i genomströmning visar Wi-Fi 7 med MLO-tekniken jämfört med enheterna som använder ett frekvensband åt gången på olika avstånd?

Fråga 2: Vad har MLO för påverkan på fördröjningsvariationen jämfört med enheter anslutna över ett frekvensband?

Fråga 3: Hur påverkas nätverksrättvisan i ett hem där MLO-enheter konkurrerar med enheter som använder äldre Wi-Fi-standarder?

2. Bakgrund

Detta kapitel innehåller information om Wi-Fi-teknikens utveckling genom tiderna samt om vilka centrala tekniker som har lett oss fram till dagens standarder. Detta innehåll är nödvändigt för att kunna analysera egenskaperna hos Wi-Fi 7 och MLO-tekniken som undersöks i denna studie.

2.1 Wi-Fi teknikens historia och utveckling

Den trådlösa nätverkstekniken, känd som Wi-Fi, har utvecklats markant sedan den första kommersiella standarden IEEE 802.11b, som lanserades 1999. Den första generationen Wi-Fi erbjöd endast en begränsad hastighet på 11 Mbit/s på 2,4 GHz bandet [8]. Med introduktionen av IEEE 802.11g år 2003 tog Wi-Fi ett nytt stort steg. Genom att implementera OFDM tekniken lyckades hastigheten på 2,4 GHz-bandet komma upp till 54 Mbit/s. Detta innebar högre hastigheter men också ökad stabilitet mot störningar [9]. Under denna tid var 20 MHz den standardiserade kanalbredden [8].

I samband med utvecklingen av IEEE 802.11g gjordes stora framsteg inom antennfronten. Tekniken MIMO introducerades som tillät en enhet att sända eller ta emot flera dataströmmar samtidigt [9].

Allt eftersom började 2,4 GHz-bandet bli överbelastat. År 2009 ledde detta till födel- sen av Wi-Fi 4, tekniskt känd som IEEE 802.11n. Wi-Fi 4 erbjöd dubbla frekvens- band; detta innebar drift på både 2,4- och 5 GHz-bandet med hastigheter upp till 600 Mbit/s [9].

IEEE 802.11ac mer känt som Wi-Fi 5 lanserades år 2013. Wi-Fi 5 använde exklusivt 5 GHz-bandet och hade hastigheter upp till 1300 Mbit/s. En central milstolpe var in- troduktionen av lobformning. Detta innebar att Wi-Fi-signaler kunde riktas mot speci- fika enheter. Till skillnad från tidigare teknik som skickade signaler i alla riktningar. Användningen av bredare kanaler såsom 80 MHz och 160 MHz introducerades även med Wi-Fi 5. Detta möjliggjorde snabbare överföring av mer data samtidigt, vilket ledde till högre genomströmning [10].

Nästa stora milstolpe var år 2019, då IEEE 802.11ax lanserades, ofta kallat Wi-Fi 6. Till skillnad från tidigare generationers Wi-Fi, som främst fokuserade på hastighet, var målet med Wi-Fi 6 att förbättra effektiviteten och kapaciteten i miljöer med hög den- sitet. Med hjälp av tekniker som OFDMA, TWT och UL-MU-MIMO kunde dessa krav uppfyllas [10].

Wi-Fi 6E introducerades 2020, och med det lanserades för första gången bandet 6 GHz-bandet. Det nya 6 GHz-bandet ger mer än dubbelt så mycket bandbredd som 5 GHz-bandet. Det finns heller inga äldre enheter som tävlar om bandbredd på detta nya spektrum, då det saknar bakåtkompatibilitet. Dessa fördelar gör Wi-Fi 6E perfekt

för att stödja krävande applikationer såsom högupplöst video, online spelande, virtuell verklighet (VR) och överföring av väldigt stora datafiler [11].

Den senaste standarden IEEE 802.11be, mer känd som Wi-Fi 7, lanserades den 22 juli 2025. Den kallas bland annat EHT (Extremely High Throughput) [3].

Wi-Fi 7 kommer med signifikanta framsteg inom trådlös teknologi. Kanalbredd med stöd för 320 MHz, hastigheter på upp till 30 Gbit/s och stöd för 4096 QAM [12].

Ett av de mest betydande framstegen i Wi-Fi 7 är tekniken MLO. Denna funktion möjliggör för enheter att använda flera frekvensband samtidigt, vilket ökar tillförlitligheten, ger minskad latens och möjliggör högre datahastigheter [12].

2.2 Centrala teknologier för nätverkseffektivitet

För att få en förståelse i hur nätverk hanterar belastning och nätverksrättvisa är det viktigt att förstå teknikerna som lagt grunden för dagens moderna nätverk.

2.2.1 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

OFDMA är en vidareutveckling av den tidigare OFDM-tekniken [8].

I ett OFDM-system kommunicerar åtkomstpunkten endast med en klient i taget. Detta gör att när flera klienter vill sända samtidigt, måste andra klienter vänta på sin tur. Detta skapar flaskhalsar, eftersom varje sändning, oberoende av paketets storlek tar upp hela kanalen [13].

OFDMA-tekniken möjliggör att kanalen delas upp i mindre underbärare, så kallade Resource Units (RU). Detta innebär att en åtkomstpunkt kan kommunicera med flera klienter samtidigt under samma tidsintervall. Detta minskar latensen och ökar effektiviteten i miljöer med många anslutna enheter [8], [13], [14].

2.2.2 TWT (Target Wake Time)

Target Wake Time (TWT) är en energieffektiviseringsmekanism som introducerades i IEEE 802.11ax. TWT schemalägger när en enhet ska sända eller ta emot data. Genom denna schemaläggning minimeras onödig strömförbrukning, vilket är kritiskt för batteridrivna IoT-enheter. TWT bidrar även till ökad rättvisa genom att minska mängden slumpmässiga kollisioner. Med TWT kan nätverket hantera fler enheter utan att genomströmningen sjunker på grund av krockar [15].

2.2.3 MIMO (Multiple Input, Multiple Output)

MIMO är en antennteknologi för trådlösa system där flera antenner används hos sändare och mottagare. Antennerna kombineras i varje ände av länken för att förbättra överföringshastigheten. Detta minimerar även fel eftersom data har flera vägar att färdas samtidigt [16].

Det finns två olika typer av MIMO-tekniker, Single-User MIMO (SU-MIMO) och Multiple-User MIMO (MU-MIMO).

I SU-MIMO-system interagerar dataströmmarna enbart med en klient åt gången. Om flera klienter använder nätet samtidigt kommer dataströmmen att strypas, vilket gör att latens eller fördröjningar skapas [16].

MU-MIMO-system å andra sidan kan hantera dataströmmar till flera klienter samtidigt. Detta skapar helt andra förutsättningar för kommunikation med flera användare och förbättrar latens och genomströmningen [16].

I de moderna standarderna har MIMO tekniken även delats upp för att hantera trafik mer effektivt i båda riktningarna. Nedlänkskommunikation sker genom DL-MU-MIMO för att åtkomstpunkten ska kunna skicka data till flera klienter samtidigt. För upplänkskommunikation används UL-MU-MIMO för att tillåta flera klienter sända data tillbaka till accesspunkten samtidigt [14].

2.2.4 QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

QAM är en teknik som omvandlar digitala paket till en analog signal för trådlös överföring. Genom att variera radiovågorna i amplitud och fas ökar man den spektrala effektiviteten; detta gör att mer data kan skickas i varje sändning [17]. Varje kombination av amplitud och fas bildar en punkt i ett diagram, där varje punkt representerar en sekvens av bitar. Ju fler punkter som ryms i detta diagram, desto mer data kan överföras per signal [18].

Wi-Fi 7 introducerar 4096-QAM, vilket innebär att varje punkt i diagrammet motsvarar 12 bitar, till skillnad från Wi-Fi 6 som använde 1024-QAM och 10 bitar. Detta ger en teoretisk ökning av datahastigheten på 20 % [12], [17]

2.3 Multi-Link Operation (MLO)

I den nya Wi-Fi-standarden IEEE 802.11be, Wi-Fi 7, har funktionen Multi-Link Operation (MLO) introducerats. Den öppnar för möjligheten att använda flera band och kanaler samtidigt. Genom att använda de tillgängliga frekvensbanden 2,4-, 5- och 6 GHz samtidigt, möjliggör MLO en effektivare användning av spektrumet än tidigare generationer, som enbart kan använda ett band åt gången [6].

De främsta fördelarna med MLO är hur tekniken kan kombinera frekvensbanden genom länksammanlagring (aggregering), dynamisk bandstyrning och redundans [13].

MLO-arkitekturen fungerar på så sätt att nätverkets MAC-lager delas upp i en övre del som kallas UMAC. Det fungerar som en gemensam resurs som hanterar tilldelning av sekvensnummer och temporärt lagrar inkommande data, för att sedan pussla ihop paketen i rätt ordning. Lagret delas även upp i flera oberoende nedre delar som kallas LMAC. Dessa LMAC-delar är i sin tur knutna till de olika frekvensbanden. Genom denna arkitektur styr UMAC hur data skickas över nätverket [6], [19], [20].

MLO tillämpas på olika sätt beroende på behovet. Genom aggregering av länkar kan man maximera genomströmningen eller genom redundans för att säkerställa att data kommer fram om en av länkarna störs [6], [20]

Det finns flera olika MLO-tekniker som grupperas i två kategorier, Multi-Link Multi-Radio (MLMR) och Multi-Link Single-Radio (MLSR) [19].

I MLMR använder klienten flera band samtidigt för att kommunicera, sända och ta emot data mot åtkomstpunkten. MLSR kan endast använda ett band åt gången, men kan fördela kommunikation och data i de olika banden [19].

2.3.1 Driftlägen inom Multi-Link Operation (MLO)

Inom kategorin Multi-Link Multi Radio (MLMR) finns det tre underkategorier: Simultaneous Transmit and Receive (STR), Non-Simultaneous Transmit and Receive (NSTR) och Enhanced Multi-Link Multi-Radio (EMLMR) [19].

STR är det mest effektiva läget i MLO, där länkar fungerar oberoende av varandra. För att detta ska fungera krävs det en tillräcklig isolering mellan länkar så att signalen på en länk inte stör den andra. Med denna funktion kan en enhet sända och ta emot data samtidigt på olika länkar. Detta fungerar eftersom länkar delar samma sekvensnummer för sändningar, och på så sätt kan datapaket snabbt fördelas över de länkar som är lediga [5], [21].

I system där isoleringen mellan länkar är otillräcklig skapas intern störning. Denna störning gör att sändningen på ena länken stör mottagningen på den andra när data skickas samtidigt. För att kommunikationen fortfarande ska fungera finns läget NSTR. Detta innebär att vid dataöverföring tillåts inte länkar att sända och ta emot data samtidigt på olika länkar. Vid nedlänkskommunikation synkroniseras sluttiderna

så att enhetens svarssignal inte krockar med inkommande data på en annan länk. Vid upplänklänkskommunikation synkroniseras både start- och sluttid; när en länk är redo att sända måste den vänta tills den andra länken också är redo att sända. På detta sätt skapas aldrig någon intern störning [5], [21].

EMLMR bygger vidare på STR, men i detta läge kan enheten använda alla sina antenner för att dynamiskt om konfigurera stödet för spatial multiplexering på varje enskild länk [19]. STR är det enda läget i MLMR som ingår i första releasen av Wi-Fi 7 (R1), då både NSTR och EMLMR är komplexa att implementera [19].

Den andra tekniken inom MLO är Multi-Link Single-Radio (MLSR); där kan endast en länk sända och ta emot data samtidigt. En vidareutveckling av MLSR är Enhanced Multi-Link Single-Radio (EMLSR). Med denna teknik kan enheten lyssna på flera olika länkar genom att dela upp sina antenner för vardera länk, för att sedan slå ihop antennernas kapacitet till en och samma länk när väl data ska skickas eller tas emot [19].

3. Metod

För att besvara studiens frågeställningar har flera olika praktiska mätningar på olika avstånd utgjort grunden för datainsamlingen.

Studiens metod har delats upp i olika kategorier för att man enkelt ska kunna följa arbetets tillvägagångssätt: testmiljö och nätverkstopologi, hårdvara och klientenheter, testkonfiguration och parametrar samt genomförande och datainsamling. Varje del går in på detaljer kring hur studien genomfördes för att den enkelt ska kunna replikeras.

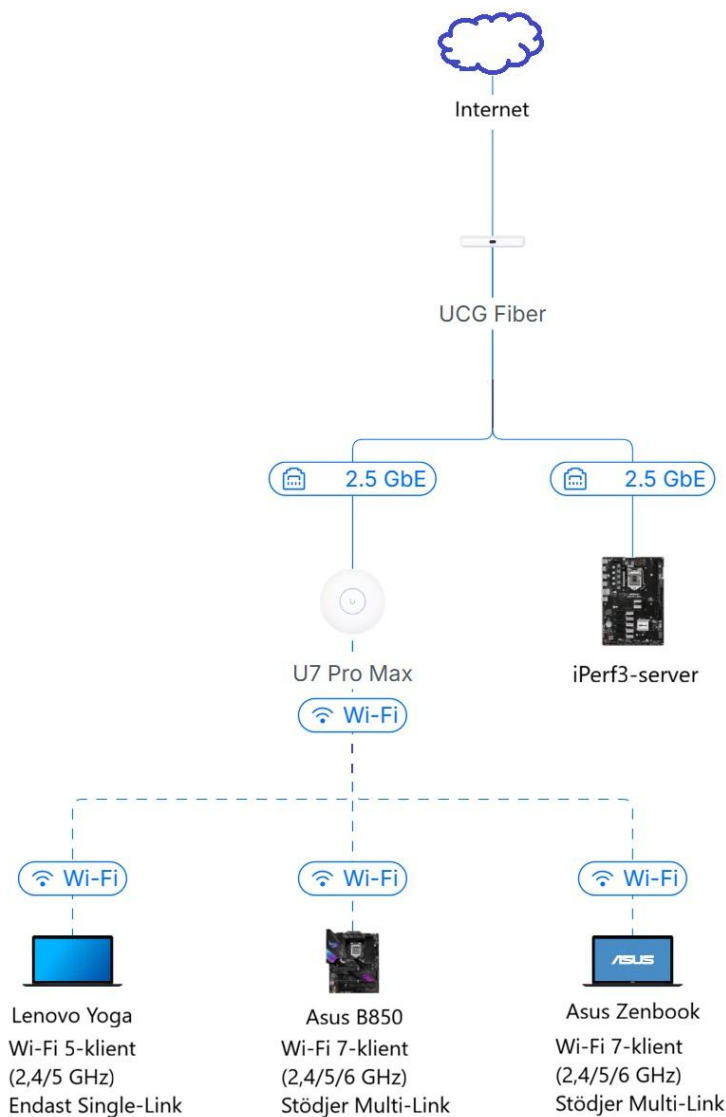
3.1 Testmiljö och Nätverkstopologi

Nätverket, som består av en gateway och en åtkomstpunkt från Ubiquiti, sköter både den trådbundna och trådlösa kommunikationen. Servern utgörs av en stationär dator som lyssnar på inkommande trafik via programvaran iPerf3. Klienterna kopplas upp trådlöst mot åtkomstpunkten, där olika frekvensband har tilldelats unika SSID:n - ett för vardera band (2,4-, 5- och 6 GHz) för att möjliggöra mätningar av Single-Link Operation (SLO), samt ett dedikerat SSID för Multi-Link Operation (MLO). SSID-separationen är nödvändig för att kunna belasta och jämföra nätverkslänkarna mot varandra.

Ubiquiti UniFi Cloud Gateway Fiber [22] fungerar som gateway till internet och ansluter till åtkomstpunkten Ubiquiti UniFi U7 Pro Max via Power over Ethernet (PoE+) med en länkhastighet på 2,5 Gigabit per sekund. Även iPerf3-servern ansluts direkt till gatewayen via Ethernet med samma länkhastighet. Se Figur 1.

Ubiquiti UniFi U7 Pro Max Access Point [23] är en Wi-Fi 7-åtkomstpunkt med stöd för MLO över samtliga tre frekvensband (2,4-, 5- och 6 GHz) och ansluter samtliga trådlösa klienter.

För att säkerställa validiteten i testmiljön utfördes en spektrumanalys via åtkomstpunktens inbyggda mätverktyg. Syftet med detta var att kartlägga eventuella kanalstörningar på de olika frekvensbanden. Se Bilaga A, Figur A1, A2 och A3.



Figur 1: Logisk nätverkstopologi för testmiljön

3.2 Hårdvara och klientenheter

Experimentets huvudsyfte var att studera tekniken MLO i hemmamiljö. För att utvärdera tekniken krävdes en åtkomstpunkt med fullt stöd för Wi-Fi 7 över samtliga tre frekvensband (2,4-, 5- och 6 GHz), då MLO möjliggör simultan dataöverföring över dessa band [2], [5].

Som klienter valdes tre enheter med olika fysiska förutsättningar: en bärbar Lenovo Yoga med äldre Wi-Fi 5-teknik, en bärbar Asus Zenbook med Wi-Fi 7 (MLO) och en stationär Asus B850 med Wi-Fi 7 (MLO).

Lenovo Yoga representerade en ”Legacy”-enhet. Valet att inkludera en ”Legacy”-enhet i experimentet gjordes för att utvärdera hur rättvist ett modernt hemmanätverk

hanterar bakåtkompatibilitet och rättvis resursfördelning. Syftet var att undersöka om de moderna Wi-Fi 7-klienterna tar all kapacitet under användning av MLO, eller om tekniken hjälper den äldre enheten att få en mer rättvis del av resurserna.

Asus Zenbook och Asus B850 representerar de moderna enheterna, vilket gör det möjligt att studera hur resurserna fördelas mellan två klienter som båda har stöd för MLO.

Nedan listas den hårdvara som användes under studien (för detaljerade inställningar, se avsnitt 2.3.2):

Ubiquiti UniFi Cloud Gateway Fiber [22]

Ubiquiti UniFi U7 Pro Max Access Point [23]

iPerf3-server (server): stationär dator med Asrock B650E Taichi-moderkort, integrerat nätverkskort: Killer E3100G 2,5 GbE [24].

Lenovo Yoga (klient): laptop, modell 710-14IKB. Wi-Fi 5-nätverkskort: Qualcomm Atheros QCA61x4A [25].

Asus B850 (klient): stationär dator med Asus TUF B850-Plus Wi-Fi-moderkort, integrerat Wi-Fi 7-nätverkskort: MediaTek Wi-Fi 7 MT7925 [26].

Asus Zenbook (klient): laptop, modell: Asus Zenbook S 14 UX5406SA. Wi-Fi 7-nätverkskort: Intel Wi-Fi 7 BE201 [27].

3.3 Testkonfiguration och parametrar

För att säkerställa att studien är replikerbar sammanfattas här operativsystem, drivrutiner, mätverktyg och testkonfiguration. Valen har gjorts med hänsyn till de krav som ställs av MLO och behovet av automatiserad datainsamling.

3.3.1 Valda mätparametrar

Genomströmning valdes för att utvärdera prestandaskillnader mellan MLO-enheter och äldre enheter på olika avstånd. Valet att använda genomströmning som mätvärde är centralt då Wi-Fi 7:s officiella huvudmål är att leverera Extremely High Throughput (EHT) [3], [20].

Fördröjningsvariation (jitter) valdes för att bedöma stabiliteten i nätverket. MLO-tekniken har introducerats för att specifikt minska latens och jitter [28], vilket gör den till den mest relevanta parametern för att svara på hur stabiliteten påverkas.

Nätverksrättvisa valdes för att analysera hur resurserna i ett hem fördelas när MLO-tekniken konkurrerar med enheter som använder äldre standarder. Detta är kritiskt för att se om MLO gynnar eller missgynnar äldre enheter i en miljö med hög trängsel.

3.3.2 Hårdvaruinställningar

Valet av inställningar för respektive frekvensband i åtkomstpunkten:

2,4 GHz: 20 MHz kanalbredd, 2x2 MIMO.

5 GHz: 80 MHz kanalbredd, 4x4 MIMO.

6 GHz: 160 MHz kanalbredd, 2x2 MIMO.

MLO: Aggregering av 2,4-, 5- och 6 GHz-banden.

Ethernet: Länkhastighet mellan iPerf3-server och åtkomstpunkt konfigurerad till 2,5 Gbit/s.

Se Bilaga B för detaljerad information om inställningar i åtkomstpunkt.

I Bilaga C och D bekräftas användningen av MLO på Wi-Fi 7-enheterna.

Samtliga bärbara enheter var anslutna till extern strömkälla under hela testförloppet.

3.3.3 Operativsystem och drivrutiner

Alla enheter uppdaterades till den senaste tillgängliga versionen av operativsystem och nätverkskortdrivrutiner innan experimentet genomfördes. Versionerna anges enligt tabell 1.

Tabell 1: Översikt över operativsystem och drivrutiner.

Enhet	Operativsystem	Version	Drivrutin
iPerf3-server	Windows 11 Pro	25H2	LAN: 1125.5.112.2022
Asus B850	Windows 11 Home	25H2	WLAN: 5.7.0.4669
Asus Zenbook	Windows 11 Home	25H2	WLAN: 23.160.0.4
Lenovo Yoga	Windows 10 Home	22H2	WLAN: 12.0.0.722
Unifi UCG Fiber	UniFi OS	5.0.12	-
U7 Pro Max	UniFi OS	10.1.85	-

3.3.4 iPerf3

iPerf3 är ett verktyg för att mäta nätverksprestanda, med parametrar som genomströmning, fördröjningsvariation och paketförlust [29].

Versionen som användes under experimentet var 3.20.

Valet att använda iPerf3 som primärt mätverktyg motiverades av att verktyget ger både en hög belastning av nätverket och intressanta mätvärden för experimentet, såsom genomströmning och fördröjningsvariation. Den syntetiska trafiken som genereras i iPerf3 belastar nätverkslänkarna mer än vanlig användning, vilket gör det lättare att identifiera skillnader i resursfördelning [29].

iPerf3-servern konfigurerades för att simultant lyssna på två olika portar (5201 och 5202). Klienterna kunde då parallellt hämta data från servern för observation av resursfördelning, detta gjordes för att simulera nätverksrättvisan under belastning. Klienternas begärda bandbredd begränsades till 1000 Mbit/s, då experimentet skulle reflektera en realistisk hemmamiljö. Valet att begränsa hastigheten till 1000 Mbit/s motiverades med att privatabonnemang i dagsläget sällan sträcker sig över denna hastighet hos svenska operatörer [30].

Mätningarna genomfördes som en enskild UDP-ström som klienterna tog emot under 10 sekunder, där iPerf3 rapporterade genomströmning och fördröjningsvariation med en sekunds intervall. Samma mätning utfördes 10 gånger efter varandra där sedan ett medelvärde räknades ut.

Valet att använda en enskild UDP-ström snarare än parallella strömmar gjordes för att säkerställa högsta möjliga precision i mätningen av fördröjningsvariationen. Enligt Lu m.fl. [31] kan parallella UDP-strömmar introducera systemrelaterad overhead i form av kontextbyten i operativsystemet. Detta riskerade att skapa mätfel där lokala fördröjningar i systemet hade kunnat tolkas som nätverks-jitter.

Genom att använda UDP kunde iPerf3 rapportera fördröjningsvariation och paketförlust, parametrar som inte är tillgängliga med TCP i iPerf3 [32]. UDP skapar även en högre belastning på den trådlösa länken då protokollet saknar flödeskontroll, vilket TCP har inbyggt. TCP skulle då sänka överföringshastigheten vid tecken på mättnad eller paketförlust, medan UDP bibehåller den definierade bandbredden [33], [34].

Inställningar för iPerf3 på enheterna sammanfattas nedan [32]:

iPerf3-server:

```
iperf3 -s -p 5201/5202
```

Klienterna:

```
iperf3 -c <iPerf3-server-IP> -p 5201 -u -b 1000M -t 10 -R
```

3.4 Genomförande och datainsamling

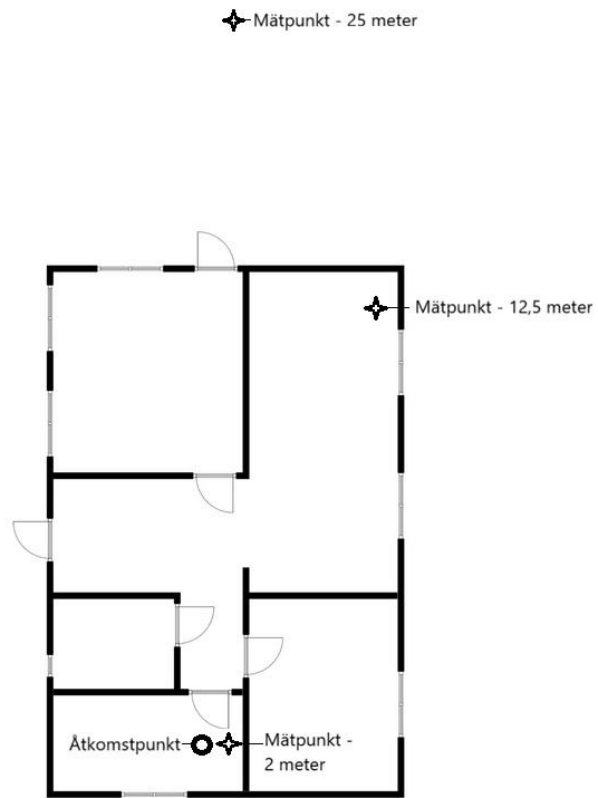
Experimentet startades med att två klienter placerades vid en förutbestämd mätpunkt. Tre olika mätpunkter valdes ut för att utvärdera prestanda, fördröjningsvariation och nätverksrättvisa under varierande signalförhållanden.

Den första punkten var vid 2 meter med fri sikt inomhus, vilket representerar optimala förhållanden då åtkomstpunkten är takmonterad ovanför mätpunkten. Den andra punkten var vid 12,5 meter inomhus, med en trävägg som skymmer sikten. Den sista punkten var vid 25 meter utomhus, med en glasdörr som hindrar fri sikt. Placeringen av mätpunkterna illustreras i planritningen på Figur 2.

I experimentet ställs Lenovo Yoga, som endast stödjer SLO, mot Asus B850 under flera olika testscenarier. Testerna jämför dels SLO mot SLO, där klienterna konkurrerar om antingen 2,4- eller 5 GHz-bandet, och SLO mot MLO. Under de sistnämnda testerna tvingades Lenovo Yogas enskilda band (2,4- eller 5 GHz) att konkurrera direkt mot Asus B850, som utnyttjar samtliga tillgängliga band genom MLO.

När de moderna klienterna sedan ställs mot varandra utvärderas det snabba 6 GHz-bandet i SLO mot SLO-mätningar, för att sedan jämföra SLO (6 GHz) mot MLO. Slutligen jämförs MLO mot MLO.

Testerna initierades genom ett Python-skript som startade mätverktyget iPerf3. Skriptet genererade medelvärden för respektive mätenhet, som därefter dokumenterades i ett kalkylblad för vidare analys (se Bilaga E). Denna procedur upprepades systematiskt på samtliga mätpunkter och enhetskombinationer.



Figur 2: Planritning med mätpunkter.

3.4.1 Automatiserad testcykel

Ett Python-skript startade mätningarna samtidigt för att simultant belasta nätverkslänkarna. Valet att använda Python motiverades av dess förmåga att automatisera och synkronisera mätningar på flera enheter parallellt. Skriptet kan även enkelt läsa av rådata från iPerf3, genom sina bibliotek, vilket underlättade arbetet med att sammanställa och presentera resultaten [35].

Innan skriptet initierades synkroniserades samtliga klienters systemklockor manuellt på respektive enhet via Windows inbyggda tidsserver (NTP) [36].

Skriptet matchade enheternas systemklockor med en förutbestämd starttid, vilket gjorde att mätningarna initierades samtidigt och belastade den trådlösa länken simultant. Denna simultiga belastning gav en korrekt analys av nätverksrättvisan [7].

Mätningarna genomfördes tio gånger per mätpunkt och ett medelvärde beräknades för respektive enhet för att minska de experimentella felmarginalerna i resultaten.

Skriptet togs fram med assistans av generativ AI (Google Gemini) [37] och har därefter verifierats och anpassats manuellt för studiens specifika testmiljö (se Bilaga F).

3.4.2 Jain's Fairness Index

Formeln som använts för att räkna ut nätverksrättvisa är Jain's Fairness Index och den definieras som följande:

$$f(x_1, \dots, x_n) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

x_i representerar genomströmningen för varje enhet och n är det totala antalet enheter.

Jain's Fairness Index är ett mått inom nätverksteknik som används för att avgöra hur rättvist en resurs fördelas mellan enheter. Indexet ger alltid ett värde mellan $1/n$ och 1, där n representerar antalet enheter. Vid jämförelse av två enheter är $n = 2$, vilket gör att skalan går från 0,5 till 1. När värdet är 1 betyder det att alla enheter får exakt lika stor del resurserna. Då är resursfördelningen så rättvis den kan bli. Vid ett värde 0,5 är resursfördelningen så orättvis den kan bli [38].

Vid mätning av fler enheter följer formeln samma princip. Om mätningar görs på fyra enheter, är $n = 4$. Då går skalan från 0,25 till 1, där 0,25 är som mest orättvist och 1 är mest rättvist.

4. Resultat och Analys

I detta kapitel presenteras den mätdata som samlades in via programmen iPerf3 och Python. Resultaten har strukturerats upp i fyra underkapitel baserat på de olika testscenarierna: Obelastat referensnätverk, samtidig belastning med SLO och MLO, samtidig belastning med MLO och MLO, samt nätverkets rättvisa. Varje kapitel jämför resultaten på 2 meter, 12,5 meter och 25 meter.

4.1 Obelastat referensnätverk

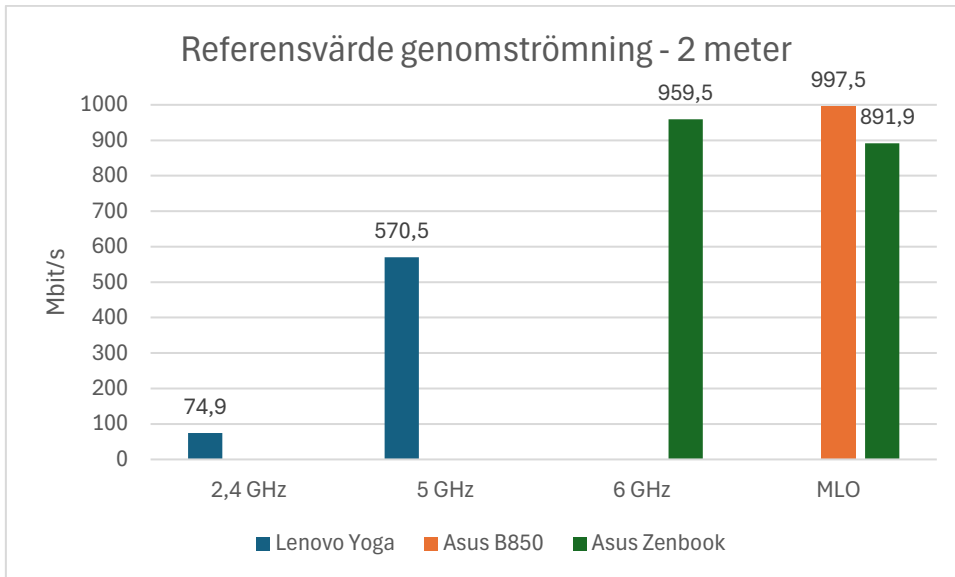
I Figur 3, 4 och 5 redovisas baslinjen för nätverkets genomströmning vid obelastat tillstånd på avstånden 2 meter, 12,5 meter och 25 meter.

Som framgår i Figur 3 så är genomströmningen för 6 GHz-bandet och MLO-bandet nästintill likvärdiga och de banden är de som presterar bäst. Detta påvisar 6 GHz-bandets viktiga roll för Wi-Fi 7 och dess breda kanaler [3], [8].

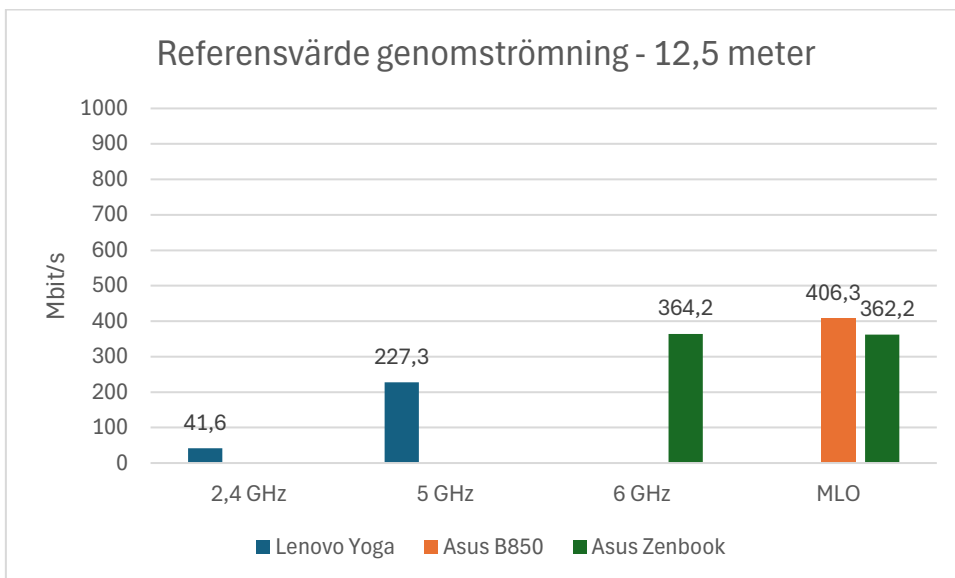
I Figur 4 där avståndet ökas till 12,5 meter och ett hinder i form av en trävägg står mellan enheterna och accesspunkten syns ett stort tapp i genomströmning. 2,4 GHz-bandet visade en prestandaförlust på 44,5 % medan 6 GHz-bandet tappade 62,1 % i prestanda. Detta resultat är förväntat då frekvensband med högre frekvenser har svårare att ta sig igenom objekt och fungera på långa avstånd [9], [11].

Figur 5 visar att vid 25 meters avstånd, med ett hinder i form av en glasdörr, observerades ett oväntat resultat där 5 GHz-bandet är det som visade högst genomströmning. 2,4 GHz-bandet visade lägst genomströmning trots att det bandet teoretiskt skall fungera bäst genom objekt och på långa avstånd [12]. Detta tros ha att göra med 2,4 GHz-bandets alla störningar och trängsel [14], [16].

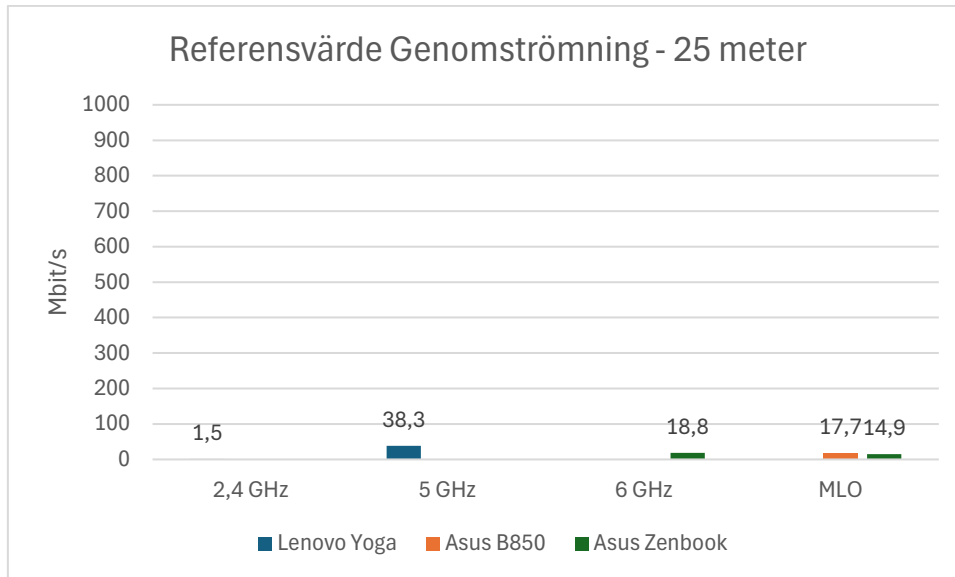
Det intressantaste med Figur 5 är att MLO-bandet visar en sämre genomströmning än vad både 5- och 6 GHz-bandet visar. Detta är en indikation på att aggregering av frekvensband försämras vid längre avstånd och dämpningar [20].



Figur 3: Referensvärden för genomströmning på 2 meters avstånd vid obelastat nätverk.



Figur 4: Referensvärden för genomströmning på 12,5 meters avstånd vid obelastat nätverk.

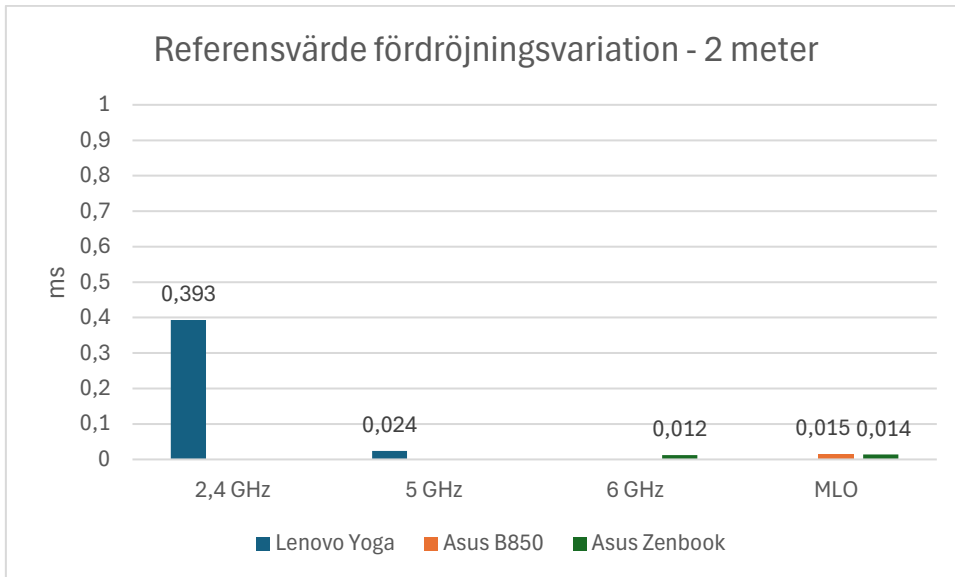


Figur 5: Referensvärden för genomströmning på 25 meters avstånd vid obelastat nätverk.

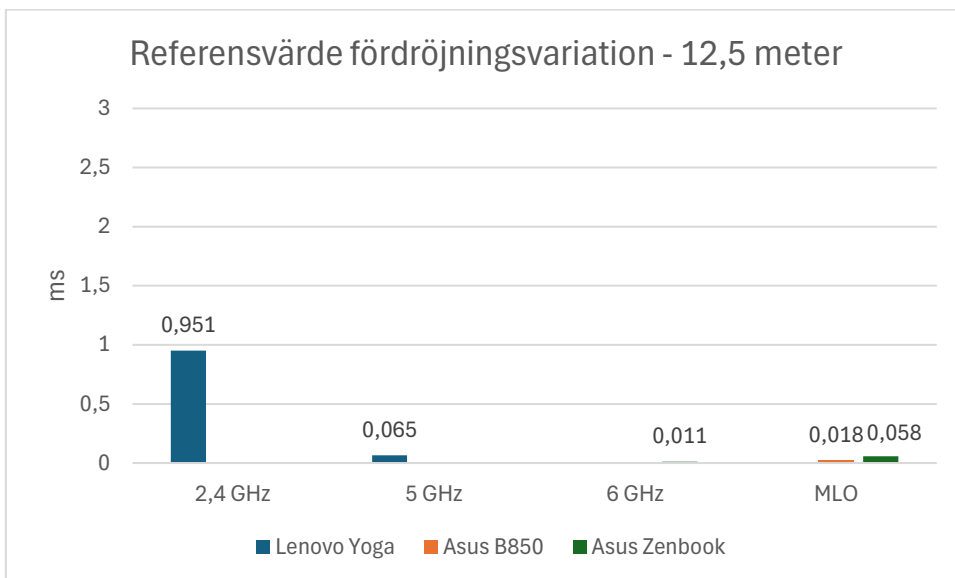
I Figur 6, 7 och 8 redovisas fördröjningsvariationen vid obelastat tillstånd på avstånden 2 meter, 12,5 meter och 25 meter.

För 5 GHz, 6 GHz och MLO-banden observeras en väldigt bra stabilitet över samtliga avstånd där fördröjningsvariationen aldrig överstiger 1,4 ms, även vid 25 meter. Detta indikerar att samtliga av dessa tre frekvensband förblir i stort sett opåverkade av avstånd eller dämpning så länge anslutningen upprätthålls.

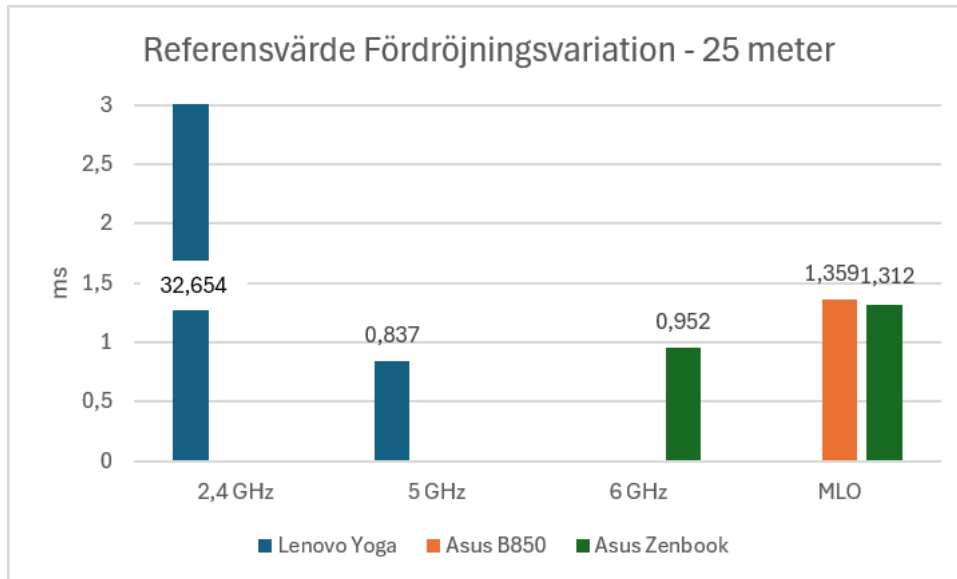
I kontrast så visar 2,4 GHz-bandet väldigt stora variationer i fördröjning, där bandet på 2 meter har en fördröjning på 0,393 ms medan på 25 meter en fördröjning på 32,6 ms. Detta motsvarar en ökning på över 8 000 %.



Figur 6: Referensvärden för fördröjningsvariation på 2 meters avstånd vid obelastat nätverk.



Figur 7: Referensvärden för fördröjningsvariation på 12,5 meters avstånd vid obelastat nätverk.



Figur 8: Referensvärden för fördröjningsvariation på 25 meters avstånd vid obelastat nätverk.

4.2 Simultan belastning: SLO mot MLO

För att utvärdera nätverkets förmåga att hantera simultan belastning från enheter med olika förutsättningar ställs en äldre ”Legacy”-enhet med Wi-Fi 5 (Lenovo Yoga) mot en modern desktop med Wi-Fi 7, MLO (Asus B850). Undersökningen genomfördes i syfte att se hur genomströmningen påverkas av SLO mot SLO samt SLO mot MLO i olika signalförhållanden.

Figur 9, 10 och 11 visar genomströmning vid simultan belastning på 2 meter, 12,5 meter respektive 25 meters avstånd från åtkomstpunkten.

Resultaten i Figur 9 visar hur båda enheterna får en markant ökning i prestanda när MLO aktiveras på den modernare enheten Asus B850. På 2,4 GHz-bandet ökar Lenovo Yoga sin genomströmning med 74,9 % och på 5 GHz-bandet ökar den med 179,1% när MLO aktiverats på den andra enheten. Asus B850-enheten får ännu större ökning på genomströmningen när MLO aktiverats med en förbättring på ca 20 gånger högre gentemot 2,4 GHz-bandet och 124,8 % gentemot 5 GHz-bandet.

Dessa resultat förklaras av MLO-teknikens dynamiska resursallokering [20]. Vid detta korta avstånd och optimala förhållande styr MLO-enheten merparten av sin trafik till det bredare 6 GHz-bandet. Detta beteende skapar en avlastning på de andra banden vilket gör att även SLO-enheten ser en markant ökning i genomströmning [20].

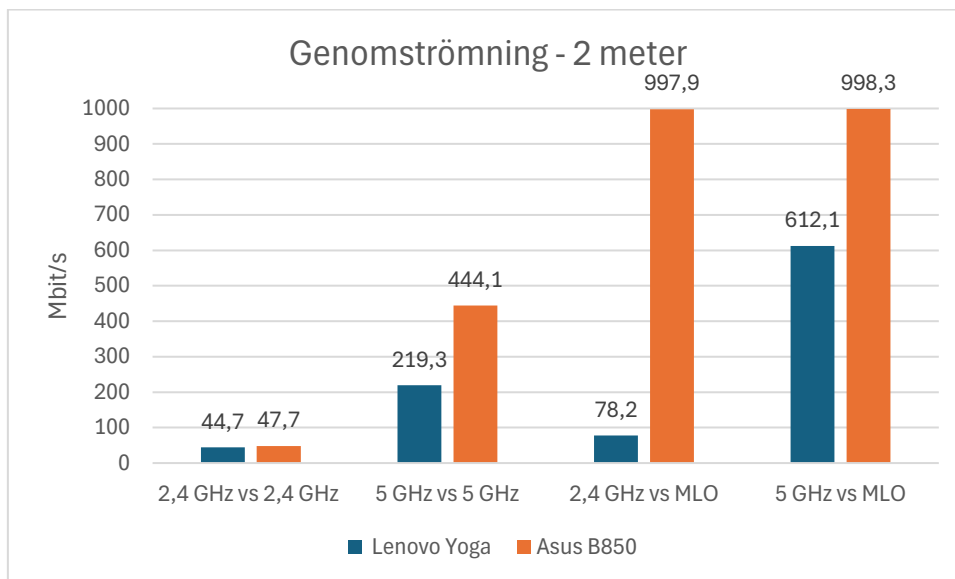
I Figur 10 vid ett ökat avstånd till 12,5 meter ändras förutsättningarna. 2,4 GHz-bandet förblir nästintill opåverkat av MLO-aktiveringen. 5 GHz-bandet däremot fördubblar sin genomströmning från ca 124 Mbit/s till 262 Mbit/s. Det mest anmärkningsvärda är att MLO-enheten visar en tendens att faktiskt sjunka i genomströmning

i detta scenario. Detta tros ha att göra med avståndet på 12,5 meter dämpar 6 GHz-bandet förmåga till en tillförlitlig anslutning [8], [11].

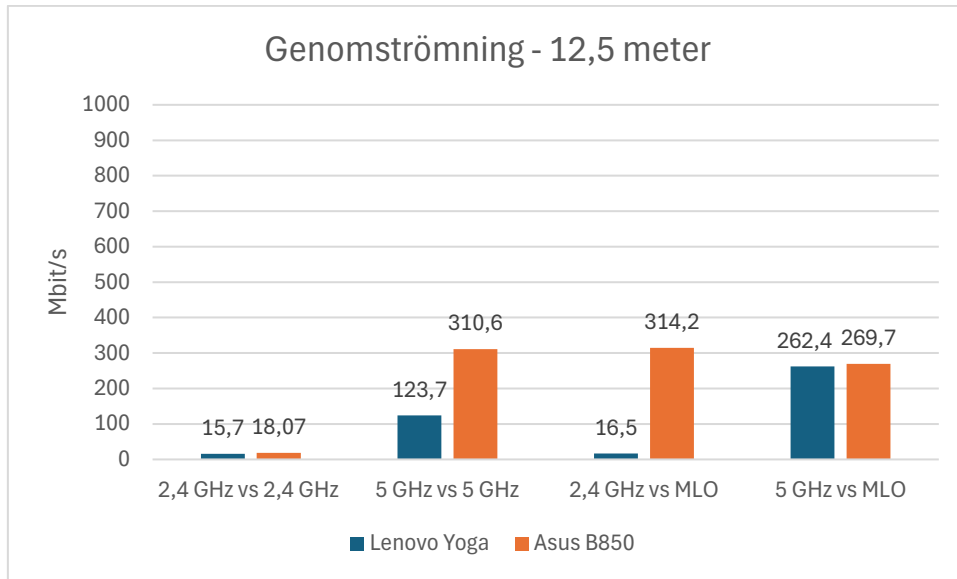
Vid närmre analys av Figur 11 på 25 meters avstånd så är förvånande 5 GHz-bandet det med bäst genomströmning, när det i teorin borde vara 2,4 GHz-bandet. Detta förklaras av den höga belastningen och de störningar som är typiska för 2,4 GHz-bandet i en hemmamiljö [10], [21], vilket även styrks av spektrummätningen som utfördes på åtkomstpunkten. Se Bilaga A, Figur A1. Detta resulterar i att det mer dämpade 5 GHz-bandet i praktiken blir det mer pålitliga alternativet i en hemmamiljö [9], [12].

Även på detta avstånd ses ett mönster att enheten på 5 GHz-bandet ökar sin genomströmning medan genomströmningen för MLO-enheten faktiskt sjunker.

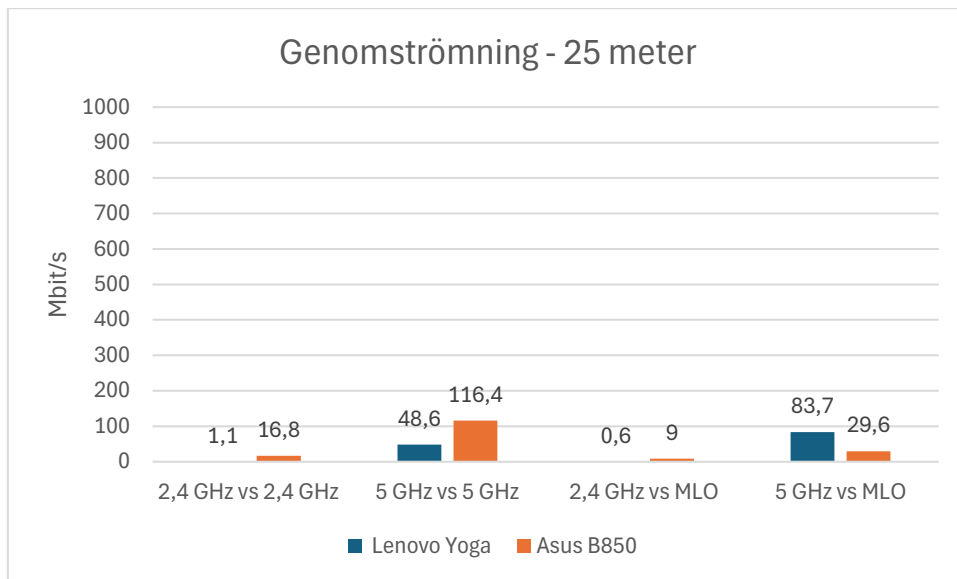
Sammantaget i alla dessa tre grafer på tre olika avstånd finns en gemensam nämnare, 5 GHz-bandet verkar alltid gynnas av aktiveringen av MLO. Detta ger en indikation på att 5 GHz-bandet och MLO-bandet har ett rättvist förhållande till varandra, ibland till och med mer rättvist åt enheten på 5 GHz-bandet. Vilket motsäger resultaten i studien av Matsuda m.fl. [7], som istället fann att MLO-enheter tenderar att dominera nätverket och minska sändningsutrymmet för äldre SLO-enheter.



Figur 9: Uppmätt genomströmning vid simultan belastning på 2 meters avstånd. Grafen jämför frekvensbanden 2,4 GHz, 5 GHz och MLO.



Figur 10: Uppmätt genomströmning vid simultan belastning på 12,5 meters avstånd. Grafen jämför frekvensbanden 2,4 GHz, 5 GHz och MLO.



Figur 11: Uppmätt genomströmning vid simultan belastning på 25 meters avstånd. Grafen jämför frekvensbanden 2,4 GHz, 5 GHz och MLO.

Utöver genomströmningen har även fördröjningsvariationen uppmätts i nätverket vid simultan belastning för att analysera nätverkets stabilitet. I Figur 12, 13 och 14 redovisas resultaten för avstånden 2 meter, 12,5 meter och 25 meter.

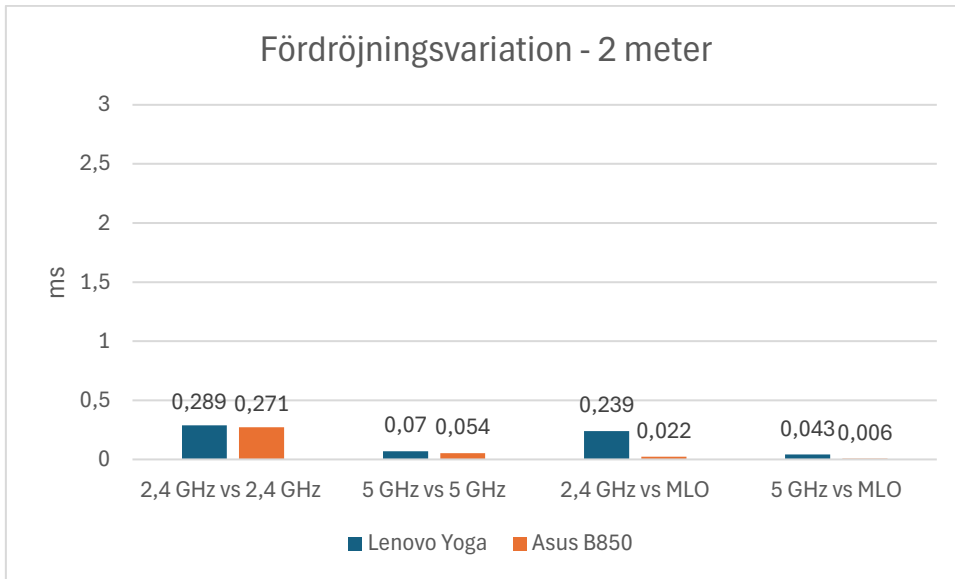
Vid avståndet 2 meter går det att se i Figur 12 att vid SLO-körning ligger båda enheterna på likvärdiga värden för 2,4- och 5 GHz-banden gentemot varandra. När MLO däremot aktiveras på Asus-B850 sjunker fördröjningsvariationen till så låga 0,022 ms och 0,006 ms för den enheten. Fördröjningsvariationen är nästintill obefintlig vilket påvisar MLO-teknikens förmåga att nyttja flera frekvensband samtidigt för att minimera latensen [3], [5].

Vid avståndet 12,5 meter i Figur 13 blir skillnaderna enorma, då den äldre SLO-enheten Lenovo Yoga drabbas av en kraftig fördröjningsvariation på 23,96 ms när båda enheterna belastar 2,4 GHz-bandet samtidigt. Den markanta skillnaden i latens mellan enheterna kan härledas till skillnader i hårdvaruarkitektur, då Asus B850 har modernare nätverkskort och antensystem än Lenovo Yoga. [25], [26].

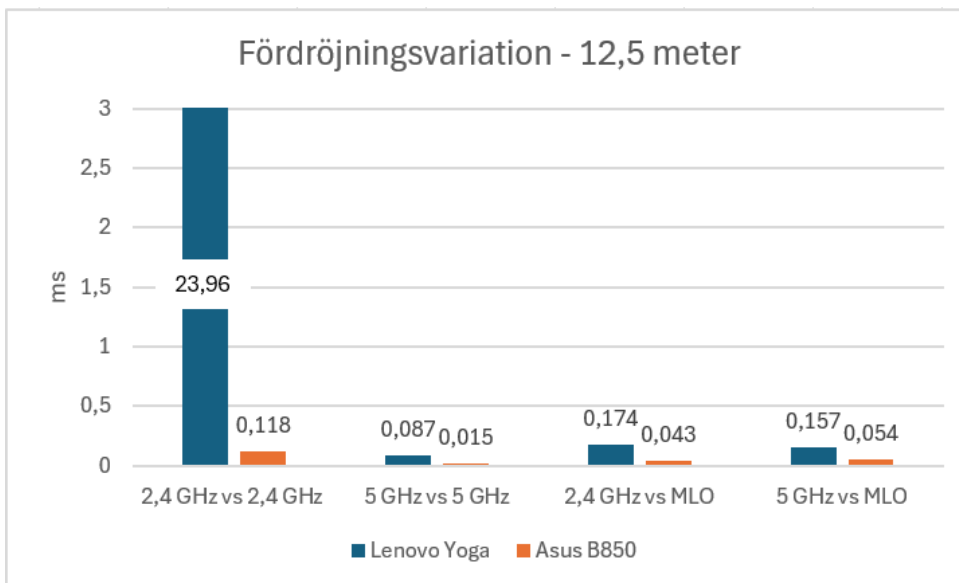
Vidare framgår det att Asus B850 vid körning i MLO-läge har klart lägst fördröjningsvariation på 0,043 och 0,054 ms. Detta styrker att MLO har överlägsen stabilitet genom att dynamiskt aggregera flera frekvensband, då detta minimerar chansen för latensspikar [20], [21]. Extra intressant är att när MLO aktiverats sjunker Lenovo Yogas fördröjningsvariation till 0,174 ms. Detta innebär att fördröjningsvariationen är drygt 139 ggr lägre när Asus B850 aktiverat MLO. Detta är ett extremt tydligt resultat på att MLO effektivt eliminerar latens och bidrar till nätverksrättvisa för alla anslutna enheter [20].

I Figur 14 på 25 meters avstånd ser man även här att Lenovo Yoga har väldigt hög fördröjningsvariationer, men med en stor skillnad från mätningen i Figur 13. Resultatet visar att MLO-enhetens överlägsna frekvenshantering stryker SLO-enhetens förmåga till kanaltid och höjer fördröjningsvariationen med 41 % till 41 ms. Detta styrker teorin om att MLO-enheter kan dominera nätverket vid räckviddens gräns genom att prioritera paketöverföring på den mest stabila länken, vilket tränger undan SLO-enheter [20].

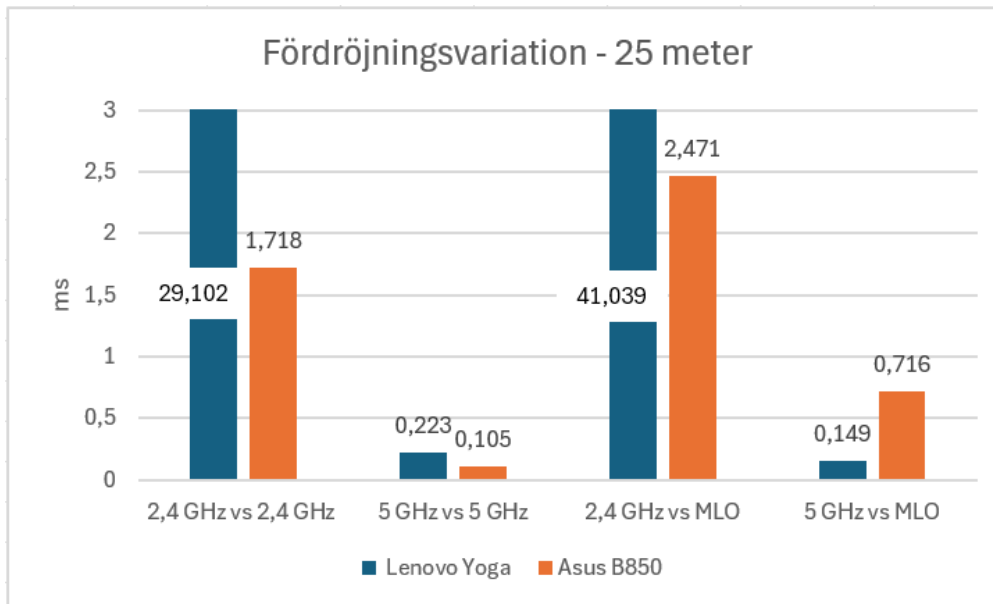
5 GHz-bandet verkar däremot fortfarande ta hjälp av MLO-tekniken även vid 25 meters avstånd, då fördröjningsvariationen sjönk för 5 GHz-bandet, dock på bekostnad av MLO-enheten där latensen faktiskt ökade i stället.



Figur 12: Uppmätt fördröjningsvariation vid simultan belastning på 2 meters avstånd.



Figur 13: Uppmätt fördröjningsvariation vid simultan belastning på 12,5 meters avstånd.



Figur 14: Uppmätt fördröjningsvariation vid simultan belastning på 25 meters avstånd.

4.3 Simultan belastning: MLO mot MLO

I detta avsnitt utvärderas nätverkets prestanda när två Wi-Fi 7-enheter som båda har MLO aktiverat ställs mot varandra. I Figur 15, 16 och 17 redovisas värden för genomströmningen vid samtidig belastning på avstånden 2 meter, 12,5 meter och 25 meter.

Det som framgår i Figur 15 är att enheten Asus B850 ligger på högst genomströmning i alla tre mätningar på 2 meters avstånd. Anledningen till detta antas bero på enhetens kraftfullare nätverkskort och antennkonfiguration [26], [27].

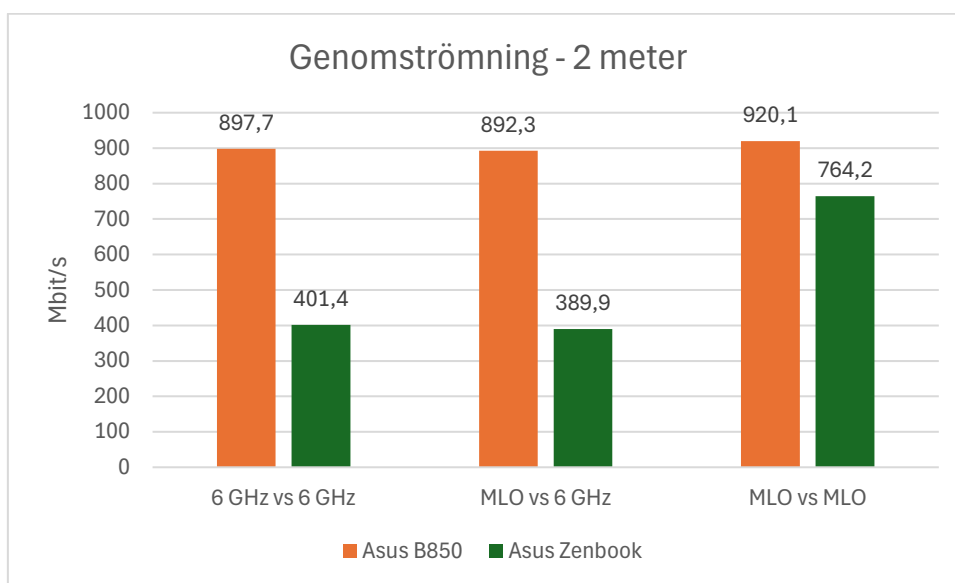
Det intressanta i Figur 15 är däremot att när MLO aktiveras på båda enheterna, så går även genomströmningen upp på båda enheterna. Asus Zenbook ökar sin genomströmning med hela 96 %. Detta påvisar att när båda enheterna slåss om 6 GHz-bandet får den enheten med bäst nätverkskort mest, men när båda enheterna aktiverar MLO sker en rättvis fördelning av nätverkets resurser [20].

I Figur 16 förstärks denna observation ännu tydligare. När båda enheterna ligger på 6 GHz-bandet på 12,5 meter och slåss om resurser får Asus B850 3,5 gånger mer bandbredd. När MLO aktiveras på båda enheterna ökar i stället genomströmningen för Asus Zenbook med 83 % och gapet sjunker till att Asus B850 endast får 1,77 gånger mer bandbredd.

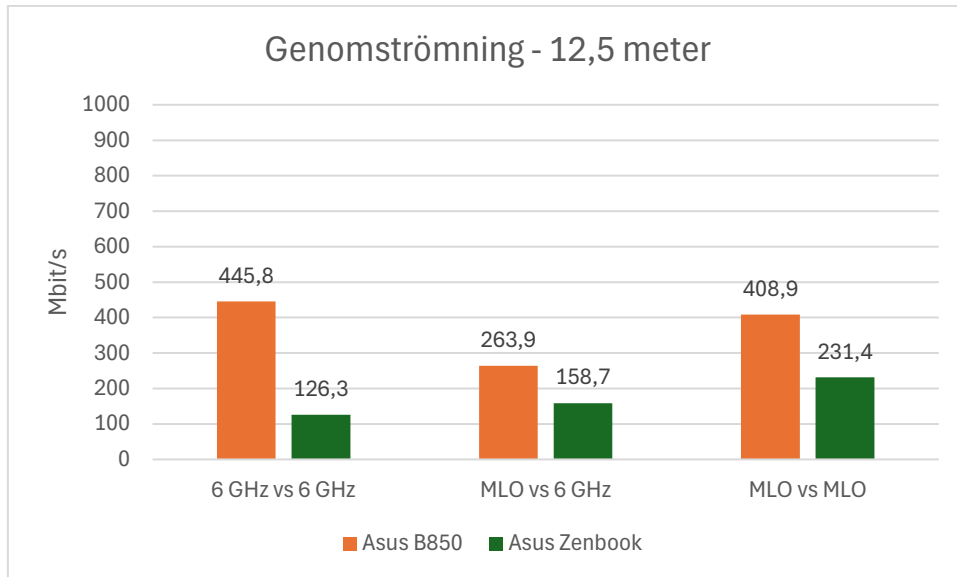
När avståndet ökar till 25 meter så ändras däremot förutsättningarna. I Figur 17 uppvisas inte längre den utjämnande effekt som sågs på avstånden 2 meter och 12,5 me-

ter. I stället så är det Asus B850 med bättre hårdvaruegenskaper som är den avgörande faktorn [26], [16]. Asus B850 bibehåller en jämn genomströmning i samtliga band på 25 meters avstånd medan Asus Zenbook nästintill förlorar signalen.

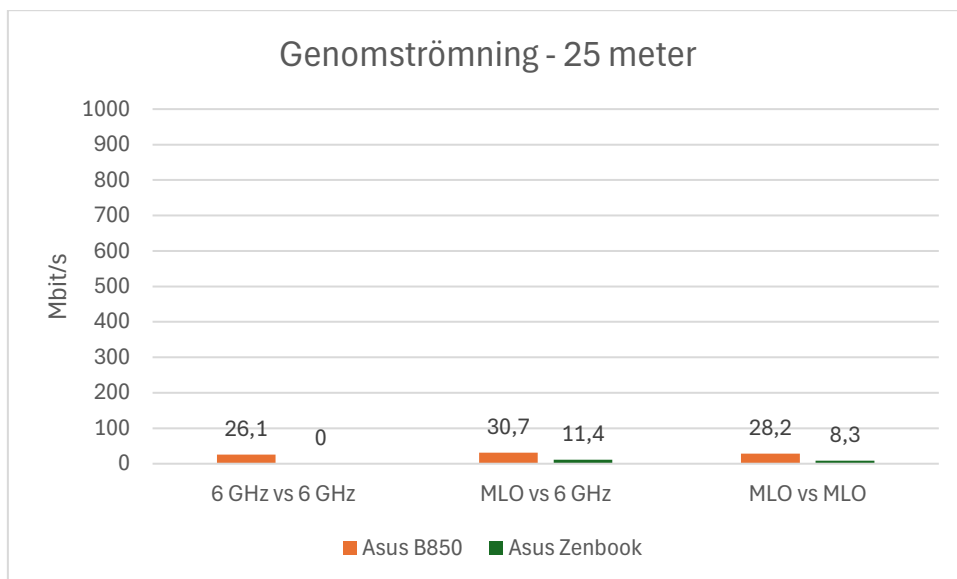
En intressant observation är dock att Asus Zenbook ökar sin genomströmning från 0 till 11,4 Mbit/s när MLO aktiveras på Asus B850, trots att den dominerar nätverket. Detta betyder troligtvis att Asus B850 delvis byter till 5 GHz-bandet och avlastar 6 GHz-bandet åt enheten Asus Zenbook. Detta visar att även om i en mindre skala, så existerar en form av resursfördelning även på extrema avstånd [20].



Figur 15: Uppmätt genomströmning vid samtidig belastning på 2 meters avstånd. Grafen jämför frekvensbanden 6 GHz och MLO.



Figur 16: Uppmätt genomströmning vid samtidig belastning på 12,5 meters avstånd. Grafen jämför frekvensbanden 6 GHz och MLO.



Figur 17: Uppmätt genomströmning vid samtidig belastning på 25 meters avstånd. Grafen jämför frekvensbanden 6 GHz och MLO.

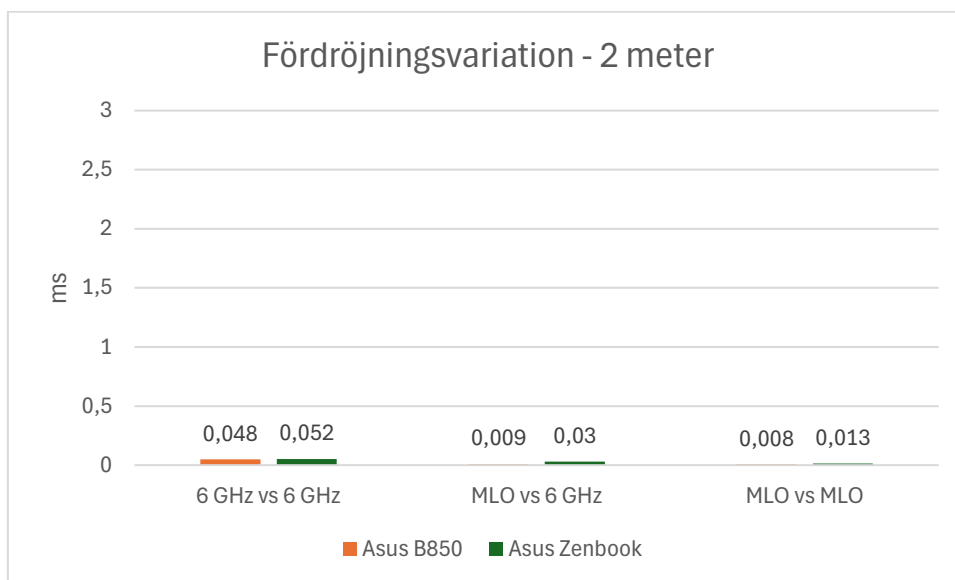
För att förstå hur stabiliteten påverkas av två Wi-Fi 7-enheter med MLO aktiverat som båda konkurrerar om utrymme har mätvärden för fördröjningsvariationen analyserats. Detta för att se om MLO-tekniken kan behålla sin låga latens även vid samtidig belastning. I Figur 18, 19 och 20 redovisas resultatet av fördröjningsvariationen vid simultan belastning på avstånden 2 meter, 12,5 meter och 25 meter.

Vid 2 meters avstånd går det tydligt att se i Figur 18 att latensen är anmärkningsvärt bra hos enheterna med MLO aktiverat. Trots att båda enheterna belastar nätverket samtidigt sjunker fördröjningsvariationen till låga 0,008 och 0,013 ms vid MLO-körning gentemot 0,048 och 0,052 ms vid samtidig körning på 6 GHz-bandet. Detta visar att MLO-tekniken effektivt koordinerar trafiken mellan två moderna enheter utan att det skapas någon större konkurrens [3], [5].

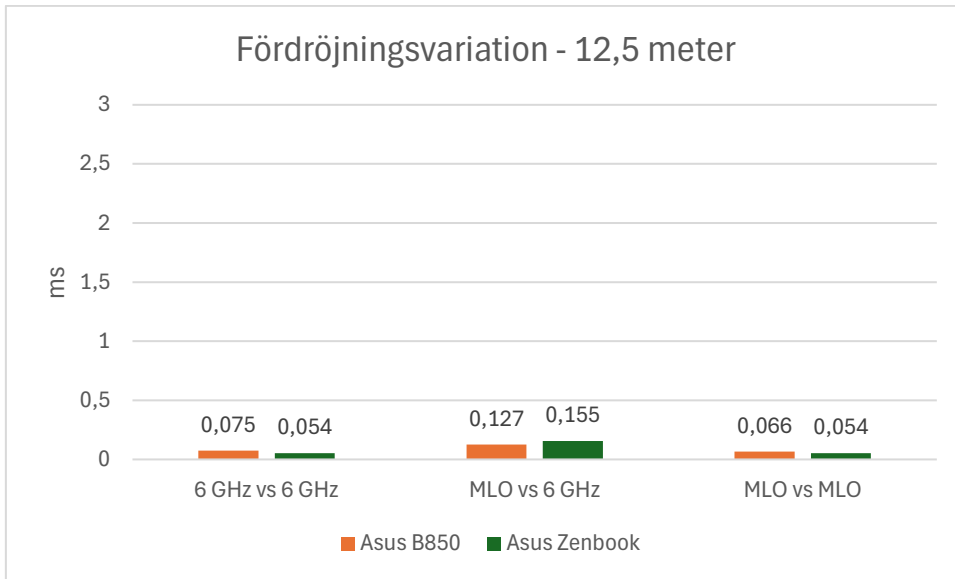
I Figur 19 på 12,5 meters avstånd borde teoretiskt sett värdena för MLO-körningen mot 6 GHz-bandet ge lägre värden än när båda enheterna ligger på 6 GHz-bandet. Anledningen till detta kan bero på pakethanteringen i åtkomstpunkten, eftersom den måste hantera dynamiskt vilken länk den ska skicka ut paket på vid MLO-drift så skapas en overhead vilket i sin tur kan orsaka latens [20].

Vid vidare analys av Figur 20 på 25 meters avstånd dominerar Asus B850-enheten helt ut Asus Zenbook när båda konkurrerar om plats på 6 GHz-bandet. När Asus B850-enheten däremot aktiverar MLO får Asus Zenbook signal igen dock med en fördröjningsvariation på 2,68ms. Intressant dock är att när båda enheterna aktiverar MLO så ändras balansen. Fördröjningsvariationen för Asus B850 stiger till 2,223 ms och Asus Zenbook sjunker till 1,299 ms. Detta tyder på att MLO-tekniken tillämpar någon form av rättvisa där den kraftfullare enheten Asus B850 inte längre tillåts vara dominant, utan delar resurser mer likvärdigt med enheten Asus Zenbook [20], [39].

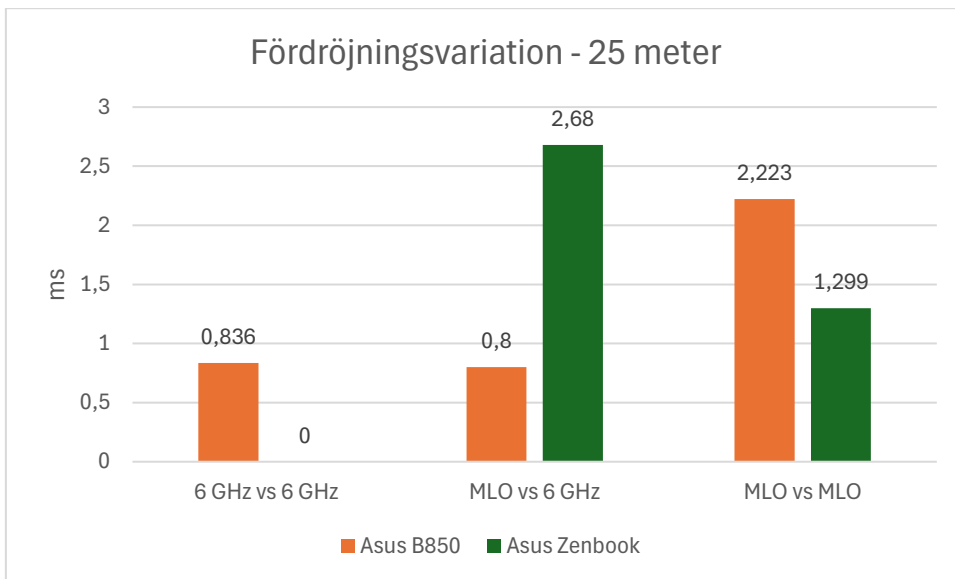
De mest anmärkningsvärda resultaten sker när båda enheterna har MLO aktiverat samtidigt. MLO-tekniken fungerar nästintill som en nätverksstabilisator i de fallen, och visar på en bra förmåga att fördela resurserna [20], [21].



Figur 18: Fördröjningsvariation för två MLO enheter vid samtidigt belastning på 2 meters avstånd.



Figur 19: Fördröjningsvariation för två MLO enheter vid samtidigt belastning på 12,5 meters avstånd.



Figur 20: Fördröjningsvariation för två MLO enheter vid samtidigt belastning på 25 meters avstånd.

4.4 Nätverksrättvisa

Avslutningsvis presenteras och analyseras värden för nätverksrättvisa. Detta avsnitt undersöker om tekniken MLO kan hantera den resursinstabilitet som uppstår när enheter med olika förutsättningar slåss om samma utrymme i nätverket. I Figur 21, 22 och 23 redovisas värdena för Jain's Fairness index på avstånden 2 meter, 12,5 meter och 25 meter.

Den gemensamma nämnaren genom alla tre figurer är att nätverket är som minst rättvist när 2,4 GHz-bandet ställs mot MLO-tekniken. Detta beror på att 2,4 GHz-bandet har en begränsad bandbredd och mycket interferens medan MLO-enheten fritt kan använda både 5- och 6 GHz-banden simultant [10], [20].

5 GHz-bandet visar även den mest konsekventa nätverksrättvisan genom alla tre avstånd, detta är ett tecken på teknikens mognad och förutsägbarhet [11], [12].

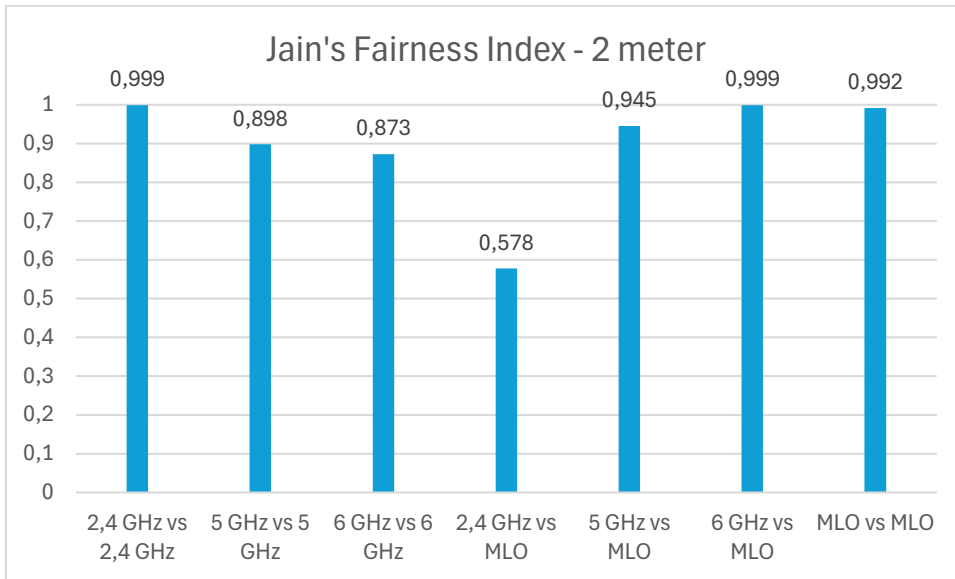
Vidare går det att se att på 2 meters avstånd och på 12,5 meters avstånd i Figur 21 och 22 är nätverket som mest rättvist när 2,4 GHz-bandet konkurrerar med en enhet på samma band, ingen av enheterna verkar ha en teknisk fördel här vilket gör att resurserna fördelas mer effektivt utan att en enhet svälter den andra [10].

När MLO aktiveras visas en liknande rättvisa på 2 och 12,5 meters avstånd. Genom att MLO-enheterna sprider sin trafik på de olika banden minskar trycket på varje enskild kanal, vilket gör att även här fördelas resurserna effektivt [20]. Med undantag när MLO aktiveras samtidigt som en enhet är på det mättade 2,4 GHz-bandet, då visas en total dominans hos MLO-enheten.

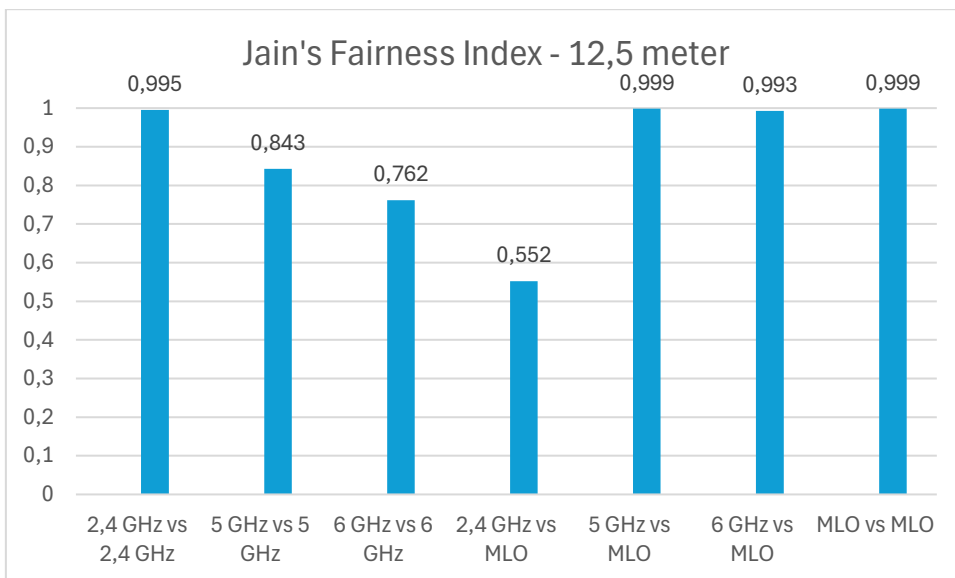
På 25 meters avstånd i Figur 23 går det att se att mönstret ändras. Rättvisan sjunker i nästan alla scenarier. Det mest framträdande är i stapeln 6 GHz mot 6 GHz där rättvisan sjunker till det teoretiskt lägsta värdet möjligt vid jämförelse av två enheter, detta betyder att den ena enheten totalt stryper den andra enhetens chans till utrymme. En observation är att när MLO aktiveras på den ena enheten och den andra sen ligger kvar på 6 GHz-bandet, så ökas rättvisan från 0,5 till 0,825. Detta styrker att MLO-enheten flyttar en del av sin trafik till de andra banden vilket gör att enheten som tidigare var helt strypt nu får möjlighet till utrymme igen [20].

Vid gemensam analys av graferna framgår det att MLO-tekniken generellt bidrar till en mer balanserad resursfördelning, med undantag från när MLO-tekniken ställs mot 2,4 GHz-bandet. 5 GHz-bandet uppvisar den mest konsekventa rättvisan och 6 GHz-bandet uppvisar den största instabiliteten på långa avstånd. Denna instabilitet som uppvisas på 6 GHz-bandet härleds till teknikens begränsade möjligheter att ta sig igenom hinder och signalförsvagningen över längre avstånd [8], [11].

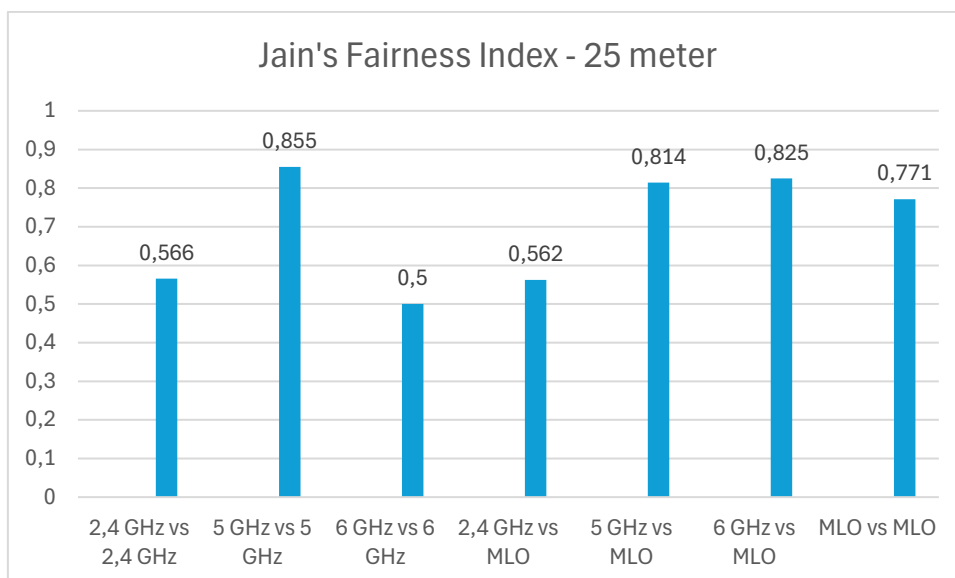
Sammantaget visar resultaten att MLO-tekniken fungerar som bäst på kortare avstånd, och där fler högfrekventa band finns tillgängliga.



Figur 21: Nätverksrättvisa vid samtidig belastning på 2 meters avstånd uppmätt med Jain's Fairness Index.



Figur 22: Nätverksrättvisa vid samtidig belastning på 12,5 meters avstånd uppmätt med Jain's Fairness Index.



Figur 23: Nätverksrättvisa vid samtidig belastning på 25 meters avstånd uppmätt med Jain's Fairness Index.

5. Diskussion

I detta kapitel diskuteras och tolkas resultaten som redovisats i studien. Fokus ligger på diskussion av resultat, men även val av metod, för att identifiera faktorer som kan ha påverkat mätvärdena. Till sist följer förslag på vidare forskning inom området och vad som skulle kunnat ha förbättrats.

5.1 Diskussion av resultat

I detta avsnitt diskuteras resultaten av studien som samlats in genom de olika prestandetesterna. Diskussionen av resultaten är uppdelade i fem delar där vi utvärderar MLO-teknikens kapacitet, de olika frekvensbandens fysiska begränsningar, nätverkets fördröjningsvariation och avslutningsvis hur tekniken påverkar nätverksrättvisan.

5.1.1 MLO-teknikens påverkan på nätverkets totala kapacitet

Ett av de mest framträdande resultaten i studien är att vid MLO-aktivering så ökar inte genomströmningen enbart för den enskilda enheten, utan även förbättrar prestandan för övriga enheter i nätverket. Detta blev särskilt tydligt i Figur 8 där den äldre enheten Lenovo Yoga ökade sin genomströmning med nästan tre gånger så mycket när Asus B850 aktiverade MLO.

Detta är ett av studiens mest centrala fynd då det visar att Wi-Fi 7 inte bara är en uppgradering för enskilda klienter, utan en teknik som kan höja effektiviteten i hela det trådlösa systemet. Detta innebär i praktiken att en konsument som investerar i ett modernt Wi-Fi 7-system, indirekt förbättrar kapaciteten hos de äldre enheterna som inte ens stödjer den nya tekniken.

Denna prestandahöjning förklaras av att MLO-enheter, genom att sprida trafiken över flera länkar, minskar den tid de ockuperar en enskild kanal. Detta får stöd i forskning av Fontanesi m.fl. som visar att en MLO-enhet faktiskt är en mer gynnsam konkurrent än vad en annan SLO-enhet är, eftersom MLO-enheten lämnar mer tillgängligt utrymme på det enskilda bandet [40].

5.1.2 6 GHz-bandets räckviddsproblematik

I våra mätningar observerade vi ett tydligt samband mellan ökat avstånd och sänkt prestanda, extra tydligt var dessa observationer för 6 GHz-bandet. I Figur 14 till 16 går det att se att genomströmningen för Asus Zenbook på 6 GHz-bandet går från 410 Mbit/s på 2 meters avstånd med fri sikt ner till 126 Mbit/s vid 12,5 meters avstånd där en trävägg även dämpar signalen. Vid 25 meters avstånd förlorar enheten signalen helt och genomströmningen sjunker till 0 Mbit/s.

Vi härleder denna prestandaförlust till 6 GHz-bandets kortare våglängd, vilket gör att signalen dämpas kraftigt vid längre avstånd och av fysiska hinder såsom träväggar och fönster [41]. Att enheten Asus B850 klarade av att bibehålla anslutningen på samma avstånd härleder vi till att räckviddens gräns är extremt beroende av klientens hårdvara och antenner [16], [26].

Det mest anmärkningsvärda som går att se i Figur 16 är däremot när MLO aktiveras på Asus B850, väcks Asus Zenbook till liv igen, och går från 0 Mbit/s till 11,4 Mbit/s. Vår tolkning är att en del av datatrafiken flyttas från 6 GHz-bandet till de andra banden vilket gör att Asus Zenbook precis får utrymme nog att sända trafik igen, trots 6 GHz-bandets uppvisade räckviddsproblem vid fysiska hinder och långa avstånd. Dessa observationer går i linje med simuleringar utförda av Ergenc och Dressler, som visar att MLO-enheter kan bibehålla signal vid länk fel, där SLO-enheter tappar anslutningen helt [6].

Sammantaget tyder dessa resultat på att 6 GHz-bandet med sin höga kapacitet inte kan betraktas som en heltäckande lösning i ett hem med flera rum och fysiska hinder.

Snarare indikerar resultatet att MLO-tekniken är en kritisk förutsättning för att 6 GHz-bandet skall vara praktiskt användbart i en hemmamiljö.

5.1.3 2,4 GHz-bandets begränsningar och miljöns påverkan

Ett av våra mest förvånande resultat i studien uppstod vid simultan belastning på 25 meters avstånd, se Figur 11. Där visade 5 GHz-bandet till vår förvåning den bästa genomströmningen, när det i teorin borde vara 2,4 GHz-bandet som visar bäst stabilitet på det avståndet tack vare dess längre våglängd och förmåga att bättre tränga igenom objekt [41].

Denna skillnad som uppstår mellan teori och praktik förklaras av den höga belastning och störningar som existerar på 2,4 GHz-bandet i en typisk hemmamiljö. Här bidrar exempelvis Bluetooth-enheter och IoT-utrustning till en förhöjd brusnivå och interferens [4], [10], [42]. Att extern interferens var en avgörande faktor i mätningen bekräftas av den spektrumanalysen som utfördes på åtkomstpunkten, där även ett externt SSID från en närliggande enhet upptog ett överlappande kanalutrymme och därmed skapade störningar (se Bilaga A, Figur A1). Vår tolkning är att även om 2,4 GHz-bandet når fram fysiskt, så är mängden brus och överlappande trafik så hög att merparten av datatrafiken kvävs. Detta bekräftas också av våra latensmätningar som diskuteras i nästa kapitel 5.1.4.

5.1.4 Fördröjningsvariationen och MLO-teknikens stabilitet

När vi utvärderar nätverkets stabilitet hade enheterna med MLO aktiverat överlägset lägst fördröjningsvariation. Vid 2 meters avstånd uppmätte vi fördröjningsvariationer på så låga värden som 0,006 och 0,0022 ms, se Figur 12. Vi uppfattar att dessa låga värden beror på MLO-teknikens förmåga att fördela datatrafiken på olika frekvensband, och sända trafik på den länk som först blir tillgänglig. Detta gör att eventuell köbildning eller latensspikar i nätverket nästan helt elimineras [4], [20].

Vid utvärdering av Figur 13 såg vi också något väldigt intressant. På 12,5 meters avstånd när båda enheterna belastade 2,4 GHz-bandet sköt fördröjningsvariationen i höjden för den äldre SLO-enheten på grund av trängsel i nätverket. När Asus B850 däremot aktiverade MLO så minskade fördröjningsvariationen för SLO-enheten med hela 139 gånger ner till 0,174 ms från 23,96 ms. Vår tolkning av detta är att MLO-tekniken minskar kollisionerna mellan datatrafiken i nätverket genom att dynamiskt skicka trafiken på olika frekvensband [4], [20], [39]. Detta bidrar inte bara till en extremt bra stabilitet i nätverket, utan MLO-tekniken fungerar även som en nätverksstabilisator då den jämnar ut datatrafiken för samtliga enheter.

Vi har även sett en tendens på 25 meters avstånden att fördröjningsvariationen faktiskt ökar när MLO aktiveras. Detta har gett oss en indikation på att MLO-teknikens förmåga att hålla ner fördröjningsvariationen är starkt beroende av en stabil signalstyrka på alla frekvensband. Vår analys är att på grund av signaldämpningen på detta

avstånd, så tvingas MLO-enheten till så många frekventa byten mellan frekvensbanden att detta introducerar mer fördröjning än att bara ligga på ett och samma band [7]. För att med säkerhet veta om detta är fallet behövs mer djupgående mätningar på längre avstånd utföras.

5.1.5 Nätverksrättvisan och resursfördelningen

Utifrån våra resultat framgår det att nätverksrättvisa inte enbart är en fråga om kapaciteten hos olika tekniker, utan snarare hur de olika frekvensbanden samspelar under olika förutsättningar. Vår sammantagna analys är att MLO-tekniken generellt sett förbättrar resursfördelningen i nätverket, dock så är denna förbättring starkt beroende av vilka band som används och på vilket avstånd.

Ett tydligt mönster är att 2,4 GHz-bandet skapar en obalans när det ställs gentemot MLO-tekniken, vilket kan härledas till bandets begränsade kapacitet och höga nivåer av störningar [4], [42].

Samtidigt framstår 5 GHz-bandet som det mest stabila alternativet. Det levererar en liknande rättvisa oavsett avstånd, vilket tyder på teknikens mognad och mindre känslighet för variationer i miljön [41].

En viktig reflektion är hur snabbt rättvisan kan vända när ett band tappar signalstyrka. I Figur 23 vägrade enheten Asus Zenbook att skicka trafik när den ställdes på 6 GHz-bandet på 25 meters avstånd mot enheten Asus B850 trots upprepade försök. Detta visar att högfrekventa band inte bara påverkas av avstånd, utan de kan helt sluta fungera när de ställs mot enheter med andra förutsättningar.

Våra resultat visar samtidigt att MLO-tekniken delvis kan motverka denna obalans. När MLO aktiverades på den dominerande enheten flyttades trafiken till andra frekvensband och gav den strypta enheten möjlighet att sända igen. Detta tyder på att tekniken fungerar som en stabiliserande faktor när enskilda band fallerar. Denna observation stöds även av forskning utförd av Ali och Bellalta. Deras simuleringar visar att en samverkande resursfördelning med hjälp av MLO-tekniken höjer den lägsta garanterade hastigheten i ett nätverk och ger en högre minimikapacitet jämfört med SLO-drift [39].

Sammantaget visar detta att MLO inte bara är en teknik som höjer kapaciteten, utan också en teknik som kan påverka hur rättvist resurserna fördelas mellan enheter. Hur denna teknik ska användas i praktiken beror inte bara på potentialen i tekniken, utan också vilken typ av klienter som förväntas finnas i nätverket.

5.2 Diskussion av metod

I detta kapitel förs en diskussion av de metodval som lagt grunden för studiens genomförande. Syftet med detta kapitel är att redovisa samt utvärdera de val som gjorts, vilka förbättringar som hade kunnat göras och förslag på framtida arbeten.

5.2.1 Val av hårdvara

En observation under användningen av enheterna var att den stationära enheten Asus B850 presterade bättre än Asus Zenbook. Detta beror på att det effektivaste läget STR i MLO ställer mycket höga krav på fysisk isolering mellan antennerna för att undvika In-Device Interference (IDC) [5], [21]. I bärbara datorer med integrerade antenner är isoleringen ofta begränsad vilket kan ha tvingat enheten att operera i läget NSTR [21]. Detta kan ha skapat en ojämn jämförelse mellan enheterna, då det ej går att utläsa vilket läge enheterna använder sig av i åtkomstpunkten UniFi U7 Pro Max. Se Bilaga B.

Valet av vår ”Legacy”-enhet (Lenovo Yoga) grundades i att enheten stödjer endast Wi-Fi 5, vilket är den Wi-Fi-standard som har störst spridning [43]. Det hade eventuellt varit aktuellt att jämföra ännu äldre Wi-Fi-standarder och inte bara använda Wi-Fi 5 som äldre ”Legacy”-enhet.

Experimentet utfördes med nätverksenheter från Ubiquiti UniFi. Dessa enheter kan ses som mer avancerad utrustning än vad som återfinns i en typisk hemmamiljö idag. En Ubiquiti UniFi U7 Pro Max som anses vara en flaggskeppsmodell [44] och besitter betydligt högre specifikationer [23], jämfört med de standardrouterar som vanligtvis tillhandahålls av internetleverantörer vid tecknande av privata abonnemang [45]. Vårt experiment kräver dock den mer avancerade hårdvaran för att säkerställa att flaskhalsen i mätningarna inte ligger i hårdvaran, då MLO-stödet är helt avgörande för att utföra experimentet.

5.2.2 Miljöns påverkan

Eftersom experimentet utfördes i hemmamiljö och inte avskärmad laboratoriemiljö, ökade påverkan av yttre faktorer. I denna testmiljö fanns flera IoT-enheter och andra enheter i vila, som kan ha påverkat resultaten genom att skapa bakgrundstrafik och signalstörningar. Trots att inga publika SSID initialt detekterades vid mätpunkterna, påvisade en fördjupad spektrumanalys ett dolt SSID. Detta utgör en tänkbar felkälla för 2,4 GHz-bandet, där kanal 1 användes under experimentet (se Bilaga B) medan det dolda SSID:t är aktivt på kanal 2. Denna överlappning kan ha introducerat angränsande kanalsinterferens och begränsat kanalutnyttjande för experimentets trafik (se Bilaga A, Figur A1).

De tre mätpunkterna valdes för att efterlikna olika delar av ett normalstort hem. Mätpunkten på två meters avstånd har fri sikt, vid 12,5 meter finns en trävägg i vägen och vid 25 meter utgör en glasdörr ett hinder.

Dessa miljöer valdes för att se hur avstånd och material med olika dämpningsgrad påverkar signalförhållandena, vilket blev avgörande för 6 GHz-bandets prestanda på det längsta avståndet.

5.2.3 TCP mot UDP

Valet att göra mätningarna i iPerf3 med UDP-protokollet grundades i att kunna mäta länkens genomströmning och fördröjningsvariation utan att TCP:s inbyggda flödeskontroll skulle sänka hastigheten vid störningar. Dessutom ger en UDP-mätning i iPerf3 detaljerad information om fördröjningsvariation, vilket skulle saknas vid en liknande TCP-mätning.

Vi är medvetna om att i en hemmamiljö är TCP-protokollet dominant, i verkligheten så använder tjänster som streaming (exempelvis Netflix) och webbsurfande TCP-protokollet [46].

Detta val påverkar mätningarnas representativitet i förhållande till normal användning, men valet att använda UDP gjordes för att skapa maximal belastning på länken. Detta ger ett tydligare resultat av nätverkets kapacitet och resursfördelning jämfört med om TCP hade använts.

I iPerf3 används flaggan `-b 1000M` för att begära en överföringshastighet på 1000 Mbit/s i UDP-strömmen från iPerf3-servern. Valet motiverades av att reflektera en höghastighets fiberanslutning i hemmamiljö, där hastigheter i dagsläget sällan sträcker sig över denna nivå.

Genom att klienterna simultant begär 1000 Mbit/s vardera skapades tillräcklig belastning för att framtvunga en resursfördelning mellan enheterna, särskilt vid mätpunkterna på längre avstånd. Samtidigt säkerställer den begärda hastigheten att vi mäter den trådlösa länkens kapacitet och inte skapar en flaskhals i den trådbundna Ethernet-länken (2,5 Gbit/s) mellan åtkomstpunkten och iPerf3-servern.

5.2.4 Konfiguration av kanalbredd

På 6 GHz-bandet gjordes valet att använda en kanalbredd på 160 MHz i stället för den maximala bredden på 320 MHz. Även om 320 MHz i teorin erbjuder högre hastigheter, upptäcktes instabilitet under våra inledande testkörningar med denna inställning. Eftersom en kanalbredd på 160 MHz dessutom används under vardaglig drift i den aktuella hemmamiljön, föll valet på att behålla denna konfiguration även under testerna. Detta stärker studiens validitet eftersom resultaten bättre representerar en hemmamiljö.

5.3 Förslag på framtida arbeten och förbättringar

Under våra mätningar inleddes försök att inkludera en tredje enhet för tre simultana mätningar, vilket finns dokumenterat som mätdata i kalkylbladet i Bilaga E. Vid sammanställningen av all mätdata konstaterades dock att arbetet skulle bli alltför omfattande om en tredje enhet inkluderades.

Framtida arbeten skulle kunna fokusera på hur nätverksrättvisan påverkas när antalet samtidiga klienter ökar ytterligare.

En annan relevant aspekt att undersöka är orsaken till den instabilitet som upplevdes vid användning av en 320 MHz-kanalbredd; beror det på hårdvarubegränsningar och drivrutiner eller är det den fysiska miljön som skapar problemen?

Det kan även vara givande att göra mätningar på flera identiska MLO-enheter för att se hur resursfördelningen sker mellan enheterna i det scenariot.

Även valet av miljö är av värde att utforska ytterligare, då både antalet mätpunkter och avstånd går att analysera djupare.

I vår miljö fanns störningar från enheter inom hemmet i form av IoT-enheter och ett dolt närliggande nätverk. Frågan är dock hur experimentet påverkas i en tätare miljö, där flertalet nätverk stör radiospektrumet?

6. Slutsatser

Syftet med denna studie var att utvärdera hur tekniken Multi-Link Operation fungerar i en hemmamiljö gällande prestanda, stabilitet och rättvisa. Genom de praktiska mätningar som gjorts har följande slutsatser kunnat dras:

Studien visar att MLO-tekniken ökar genomströmningen markant på korta avstånd, och inte bara för enheten själv, utan även för äldre enheter i nätverket. När MLO aktiverades på enheten Asus B850 på 2 meters avstånd, ökade genomströmningen för den äldre Lenovo Yoga-enheten från 44,7 Mbit/s till 78,2 Mbit/s på 2,4 GHz-bandet, och från 219,3 Mbit/s till 612,1 Mbit/s på 5 GHz-bandet. För Asus B850 uppmättes en drygt tjugofaldig ökning av genomströmningen vid samma avstånd när 2,4 GHz-bandet jämfördes med MLO. Denna prestandahöjning beror på hur MLO-tekniken dynamiskt kan byta mellan de olika frekvensbanden och avlasta de band som har som mest trängsel.

Gällande fördröjningsvariationen indikerar resultaten att MLO-tekniken i princip eliminerar latensspikar på de kortare avstånden, där värden så låga som 0,006 ms uppmättes vid 2 meters avstånd. Tekniken uppnår detta genom att sprida datatrafiken och nyttja den länk som först är tillgänglig. Tack vare denna effektiva trafikhantering fungerar MLO-tekniken även som en form av nätverksstabilisator, där stabiliteten i nätverket från MLO gynnar samtliga enheter. Ett tydligt exempel är hur den äldre Lenovo Yoga-enhetens fördröjningsvariation sjönk från 23,96 ms till 0,174 ms när MLO aktiverades.

Med avseende på nätverksrättvisan bidrog MLO-tekniken generellt sett till en mycket balanserad resursfördelning. Detta gick tydligt att se på de högre frekvensbanden. Undantaget är dock det mättade 2,4 GHz-bandet, där den höga mättnaden och mängden störningar skapade en obalans som MLO hade svårt att kompensera för.

Avslutningsvis visar mätningarna att MLO-tekniken på längre avstånd inte är en universell lösning, utan en teknik med svagheter och styrkor. Alla frekvensband hade problem vid 25 meter, men extra tydligt blev det för 6 GHz-bandet som inte ens kunde slutföra en testcykel för Asus Zenbook, i jämförelse med Asus B850. Vid 25 meter sjönk Asus B850:s genomströmning när MLO aktiverades, från 116,4 Mbit/s på 5 GHz-bandet till 29,6 Mbit/s med MLO. De frekventa bytena mellan frekvensbanden verkade även introducera en ökad fördröjningsvariation, som under samma mätning ökade från 0,105 ms till 0,716 ms. MLO-teknikens fulla potential är därmed som störst på korta avstånd, där flera högfrekventa band finns tillgängliga och alla uppvisar en stabil signalstyrka.

Referenser

- [1] International Telecommunication Union, *Internet use - Facts and Figures 2025*, 15 oktober 2025. Åtkomstdatum: 01 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/2025/10/15/ff25-internet-use/>
- [2] E. Khorov, I. Levitsky, och I. F. Akyildiz, "Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7", *IEEE Access*, vol. 8, s. 88664–88688, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993448.
- [3] Xiaoqian Liu, Yuhan Dong, Yiqing Li, Yousi Lin, Xun Yang, och Ming Gan, "IEEE 802.11be Wi-Fi 7: Feature Summary and Performance Evaluation". Åtkomstdatum: 17 februari 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://arxiv.org/html/2309.15951v2>
- [4] F. Dugand, "Wi-Fi 7 Multi Link Operation (MLO) Configurations Demystified", Ceva. Åtkomstdatum: 09 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.ceva-ip.com/blog/unleashing-the-power-of-wi-fi-7-multi-link-operation-configurations-demystified/>
- [5] A. Hsu, *Wi-Fi 7 Multi-Link Operation (MLO) White Paper*, 2022. Åtkomstdatum: 09 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.mediatek.com/hubfs/Wi-Fi-7-MLO-White-Paper-WF7MLOWP0622.pdf>
- [6] D. Ergenç och F. Dressler, "An Open Source Implementation of Wi-Fi 7 Multi-Link Operation in OMNeT++", i *2025 20th Wireless On-Demand Network Systems and Services Conference (WONS)*, jan. 2025, s. 1–4. Åtkomstdatum: 11 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10925982>
- [7] K. Matsuda, K. Sanada, H. Hatano, och K. Mori, "Throughput analysis for IEEE 802.11be network taking into account the coexistence of MLO and legacy SLO devices", i *2025 28th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, nov. 2025, s. 1–6. doi: 10.1109/WPMC67460.2025.11351204.
- [8] Cisco Meraki, *Wi-Fi 7 (802.11be) Technical Guide*, 2025. Åtkomstdatum: 16 februari 2026. [Online]. Tillgänglig vid: [https://documentation.meraki.com/Wireless/Design_and_Configure/Architecture_and_Best_Practices/Wi-Fi_7_\(802.11be\)_Technical_Guide](https://documentation.meraki.com/Wireless/Design_and_Configure/Architecture_and_Best_Practices/Wi-Fi_7_(802.11be)_Technical_Guide)
- [9] Siretta Ltd, "the-history-of-wi-fi (3)". november 2023. Åtkomstdatum: 16 februari 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.siretta.com/2023/11/the-history-of-wi-fi.pdf>
- [10] Moses Alabi, "(PDF) The Evolution of Wi-Fi Standards: From Wi-Fi 6 to Wi-Fi 7", ResearchGate. Åtkomstdatum: 16 februari 2026. [Online]. Tillgänglig vid: https://www.researchgate.net/publication/384564672_The_Evolution_of_Wi-Fi_Standards_From_Wi-Fi_6_to_Wi-Fi_7
- [11] Cisco, "What Is Wi-Fi 6 vs. Wi-Fi 6E?", Cisco. Åtkomstdatum: 04 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.cisco.com/site/us/en/learn/topics/networking/what-is-wifi-6-vs-wifi-6e.html>
- [12] Cisco, "What Is Wi-Fi 7? Explained", Cisco. Åtkomstdatum: 23 februari 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.cisco.com/site/us/en/learn/topics/networking/what-is-wi-fi-7.html>
- [13] Cisco, "What is OFDMA?", Cisco. Åtkomstdatum: 16 februari 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.cisco.com/site/us/en/learn/topics/networking/what-is-ofdma.html>

- [14] Y. Daldoul, D.-E. Meddour, och A. Ksentini, "Performance evaluation of OFDMA and MU-MIMO in 802.11ax networks", *Comput. Netw.*, vol. 182, s. 107477, dec. 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107477.
- [15] M. Nurchis och B. Bellalta, "Target Wake Time: Scheduled Access in IEEE 802.11ax WLANs", *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 26, nr 2, s. 142–150, apr. 2019, doi: 10.1109/MWC.2019.1800163.
- [16] TechTarget, "What is MIMO (multiple input, multiple output)? | Definition from TechTarget", Search Mobile Computing. Åtkomstdatum: 18 februari 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/MIMO>
- [17] TP-Link Editorial Group, "Wi-Fi 7 Fundamentals: What is 4K-QAM? | TP-Link". Åtkomstdatum: 23 februari 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.tp-link.com/us/blog/733/>
- [18] Z. Xia, "What Is QAM? How Does QAM Work?", Huawei. Åtkomstdatum: 23 februari 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/QAM.html>
- [19] Anand Gurumurthy, "Wi-Fi 6E Adoption and Getting Ready with Wi-Fi 7", 2024. Åtkomstdatum: 22 februari 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.ciscolive.com/c/dam/r/cisco-live/apjc/docs/2024/pdf/BRKEWN-2024.pdf>
- [20] Alsadg Ahmed Albadwi Abdalhafid, Shamala K. Subramaniam, Zuriati A. Zukarnain, och Fahrul H. Ayob, "(PDF) Multi-Link Operation in IEEE802.11be Extremely High Throughput: A Survey", *ResearchGate*, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3378997.
- [21] Omada Editorial Group, "What is WiFi 7's Multi-Link Operation (MLO)? | TP-Link". Åtkomstdatum: 18 februari 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.tp-link.com/us/blog/1067/>
- [22] UniFi, "UniFi Cloud Gateway Fiber - Tech Specs". Åtkomstdatum: 09 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://techspecs.ui.com/unifi/cloud-gateways/ucg-fiber?subcategory=all-cloud-gateways>
- [23] UniFi, "UniFi U7 Pro Max - Tech Specs". Åtkomstdatum: 09 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://techspecs.ui.com/unifi/wifi/u7-pro-max?s=eu>
- [24] ASRock, "ASRock B650E Taichi". Åtkomstdatum: 10 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.asrock.com/mb/AMD/B650E%20Taichi/index.asp>
- [25] Lenovo, "Hardware Maintenance Manual: Yoga 710-14ISK, Yoga 710-14IKB, Yoga 710-15ISK, Yoga 710-15IKB". Åtkomstdatum: 12 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: https://download.lenovo.com/consumer/mobiles_pub/yoga_710-14isk_14ikb_15isk_15ikb_hmm_201605.pdf
- [26] ASUS, "TUF GAMING B850-PLUS WIFI - Specifikationer | Moderkort | ASUS Sverige". Åtkomstdatum: 10 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.asus.com/se/motherboards-components/motherboards/tuf-gaming/tuf-gaming-b850-plus-wifi/techspec/>
- [27] ASUS, "ASUS Zenbook S 14 (UX5406) - Specifikationer | Laptops För hemmet | ASUS Sverige". Åtkomstdatum: 10 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.asus.com/se/laptops/for-home/zenbook/asus-zenbook-s-14-ux5406/techspec/>
- [28] S. Bhusan, "MLO & Latency in Wi-Fi 7: Experimental Result", Alethea Communications Technologies. Åtkomstdatum: 19 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://aletheatech.com/mlo-latency-in-wi-fi-7-experimental-result/>

- [29] ESnet, ”iPerf - The TCP, UDP and SCTP network bandwidth measurement tool”. Åtkomstdatum: 10 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://iperf.fr/>
- [30] O. Enström, ”Svensk telekommarknad 2024”, *PTS-ER-20259*, 2025, Åtkomstdatum: 10 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: https://statistik.pts.se/media/ng4f0oht/rapport_svensk_telekommarknad_2024_t.pdf
- [31] X. Lu, Q. Wu, N. S. V. Rao, och Z. Wang, ”On Parallel UDP-Based Transport Control over Dedicated Connections”, i *2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010*, dec. 2010, s. 1–5. doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683484.
- [32] ESnet, ”iPerf - iPerf3 and iPerf2 user documentation”. Åtkomstdatum: 10 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://iperf.fr/iperf-doc.php>
- [33] J. Postel, ”User Datagram Protocol”, Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 768, aug. 1980. doi: 10.17487/RFC0768.
- [34] W. Eddy, ”Transmission Control Protocol (TCP)”, Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 9293, aug. 2022. doi: 10.17487/RFC9293.
- [35] ”The Python Standard Library”, Python documentation. Åtkomstdatum: 19 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://docs.python.org/3/library/index.html>
- [36] robinharwood, ”Windows Time Service (W32Time)”. Åtkomstdatum: 16 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://learn.microsoft.com/en-us/windows-server/networking/windows-time-service/windows-time-service-top>
- [37] ”Gemini 3”, Google DeepMind. Åtkomstdatum: 17 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://deepmind.google/models/gemini/>
- [38] N. Rezaeinia, J. C. Góez, och M. Guajardo, ”On efficiency and the Jain’s fairness index in integer assignment problems”, *Comput. Manag. Sci.*, vol. 20, nr 1, s. 42, sep. 2023, doi: 10.1007/s10287-023-00477-9.
- [39] R. Ali och B. Bellalta, ”A Federated Reinforcement Learning Framework for Link Activation in Multi-Link Wi-Fi Networks”, i *2023 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, juli 2023, s. 360–365. doi: 10.1109/BlackSeaCom58138.2023.10299778.
- [40] G. Fontanesi, F. Wilhelmi, och L. G. Giordano, ”Continuous Multi-Link Operation: A Contention-Free Mechanism for the Unlicensed Spectrum”, i *2024 IEEE 25th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, sep. 2024, s. 766–770. doi: 10.1109/SPAWC60668.2024.10694045.
- [41] S. Bytyqi och B. Jashari, ”Experimental Assessment of the Effects of Building Materials on Wi-Fi Signal 2.4 GHz and 5 GHz”, *J. Comput. Commun.*, vol. 12, nr 5, s. 1–10, maj 2024, doi: 10.4236/jcc.2024.125001.
- [42] ”IEEE Recommended Practice for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Wireless Devices Operating in Unlicensed Frequency Bands”, *IEEE Std 802152-2003*, s. 1–150, aug. 2003, doi: 10.1109/IEEESTD.2003.94386.
- [43] Helena Darlöf, ”Skillnaden mellan wifi 5, wifi 6 och wifi 6e » Enkel förklaring”, Bredband.se. Åtkomstdatum: 19 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.bredband.se/vanliga-fragor/skillnaden-mellan-wifi-5-wifi-6-wifi-6e>
- [44] ”UniFi WiFi - Tech Specs”. Åtkomstdatum: 20 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://techspecs.ui.com/unifi/wifi?subcategory=wifi-flagship>
- [45] ”Router från internetleverantören, så funkar det”, Bredbandsval.se. Åtkomstdatum: 20 mars 2026. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.bredbandsval.se/bredband/router-leverantor>

- [46] J. Martin, Y. Fu, N. Wourms, och T. Shaw, "Characterizing Netflix bandwidth consumption", i *2013 IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, jan. 2013, s. 230–235. doi: 10.1109/CCNC.2013.6488451.

Bilagor

Här presenteras kompletterande material som utgör underlag för studiens genomförande.

A. Spektrumanalys

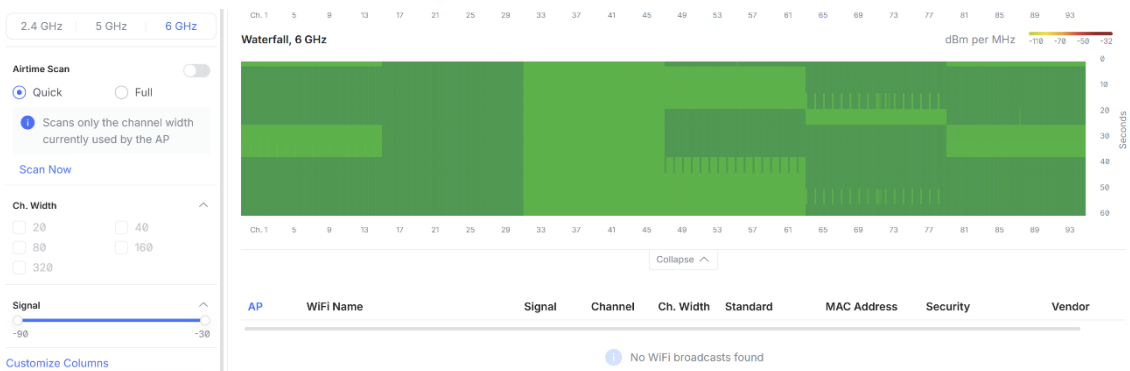
Spektrumanalys av 2,4-, 5- och 6-GHz-banden. Figur A1 visar starka störningar i kanal 1, 2 och 3 för frekvensbandet 2,4 GHz. Figur A2 och A3 visar att 5- och 6-GHz-banden är nästantill störnings befriade.



Figur A1: Spektrumanalys av 2,4 GHz-bandet.



Figur A2: Spektrumanalys av 5 GHz-bandet.



Figur A3: Spektrumanalys av 6 GHz-bandet.

B. Nätverksinställningar för åtkomstpunkt

Denna bilaga visar Wi-Fi-konfigurationen i Ubiquiti UniFi:s användargränssnitt, med detaljerade inställningar för åtkomstpunkten U7 Pro Max. Bilden dokumenterar vilka frekvensband och kanaler som används för respektive SSID och att MLO är aktivt på SSID:t SB-Ultra.

The screenshot displays the UniFi Network Manager interface for a UniFi access point. The left sidebar shows navigation options like Overview, WiFi, Networks, Internet, VPN, CyberSecure, and High Availability. The main content area is titled 'UniFi' and shows a table of SSIDs and their configurations.

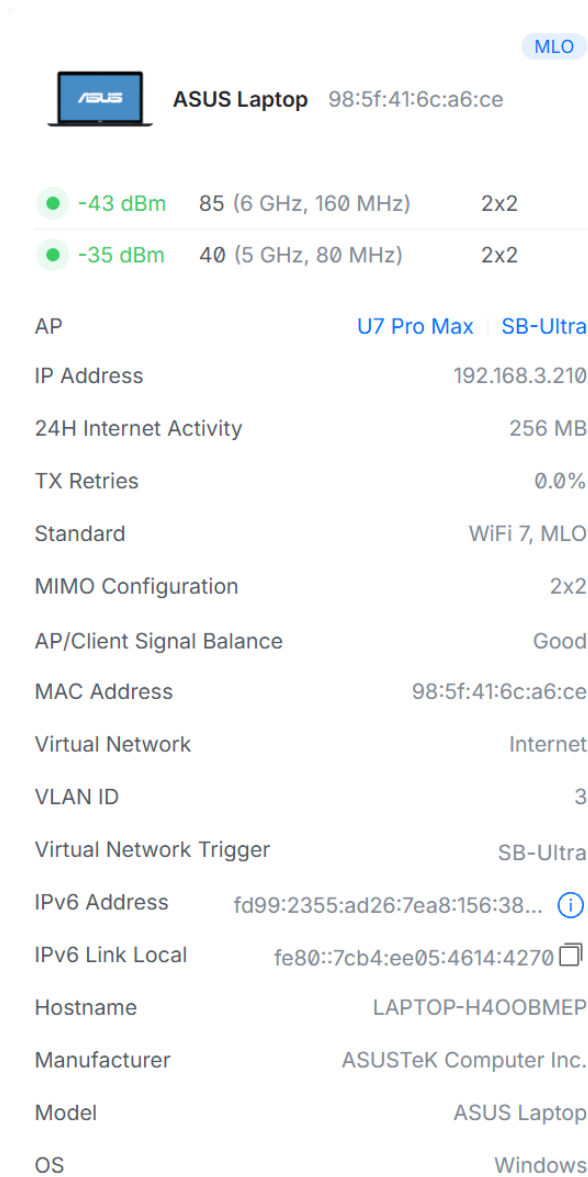
Name	Network	Broadcasting APs	Radio Band	Clients	Security
SB	Internet (3)	All APs	5 GHz	8	WPA2
SB-IoT	Internet (3)	All APs	2.4 GHz	12	WPA2
SB-Ultra	Internet (3)	All APs	2.4 GHz 5 GHz 6 GHz MLO	2	WPA3
6	Internet (3)	All APs	6 GHz	-	WPA3

Below the table, there is a 'Channel Plan' section with a visual representation of frequency bands (2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz) and channel widths (20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 160 MHz, 320 MHz). A legend indicates channel status: In Use (green), Enabled (grey), DFS (orange), Not available (light blue), and Excluded (red). At the bottom, there are settings for 'Default WiFi Speeds' (set to Custom), 'Channel Width (MHz)' (set to 20, 40, 80, 160, 320), and '5 GHz Roaming Assistant' (set to -75 dBm).

Figur B1: Gränssnittsvy i Ubiquiti UniFi som visar konfiguration för SSID, frekvensband, kanaler och MLO-status för U7 Pro Max.

C. Verifiering av MLO-anslutning för Asus Zenbook

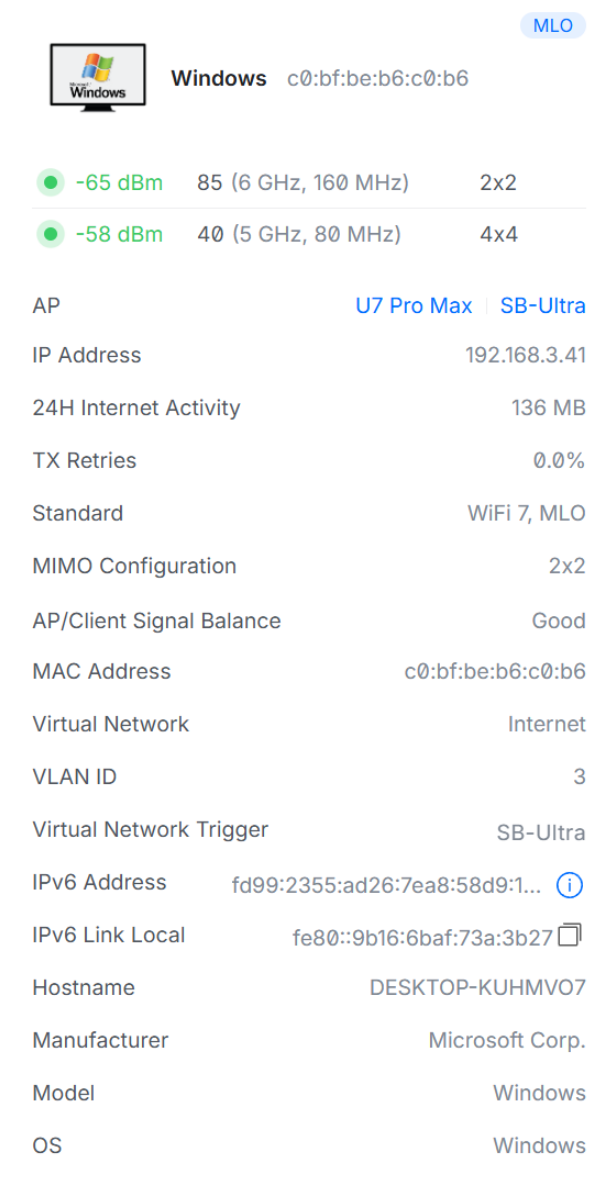
Bilagan visar att det i fältet 'Standard' bekräftas att Wi-Fi 7 MLO är aktivt på enheten Asus Zenbook. Man kan även utläsa att MLO använder sig av 5- och 6 GHz-banderna.



Figur C1: Skärmsklipp från UniFi UI som verifierar klientstatusen för Asus Zenbook.

D. Verifiering av MLO-anslutning för Asus B850

Bilagan visar att det i fältet 'Standard' bekräftas att Wi-Fi 7 MLO är aktivt på enheten Asus B850. Man kan även utläsa att MLO använder sig av 5- och 6 GHz-bandet.



The screenshot displays the UniFi UI for a Windows client. At the top, there is a 'Windows' icon and the MAC address 'c0:bf:be:b6:c0:b6'. A blue 'MLO' label is positioned above the signal strength indicators. Two signal strength indicators are shown: one for 6 GHz (160 MHz) at -65 dBm with a 2x2 configuration, and another for 5 GHz (80 MHz) at -58 dBm with a 4x4 configuration. Below these, the 'Standard' field is set to 'WiFi 7, MLO'. Other fields include AP (U7 Pro Max | SB-Ultra), IP Address (192.168.3.41), 24H Internet Activity (136 MB), TX Retries (0.0%), MIMO Configuration (2x2), AP/Client Signal Balance (Good), MAC Address (c0:bf:be:b6:c0:b6), Virtual Network (Internet), VLAN ID (3), Virtual Network Trigger (SB-Ultra), IPv6 Address (fd99:2355:ad26:7ea8:58d9:1...), IPv6 Link Local (fe80::9b16:6baf:73a:3b27), Hostname (DESKTOP-KUHMVO7), Manufacturer (Microsoft Corp.), Model (Windows), and OS (Windows).

Windows	c0:bf:be:b6:c0:b6	
-65 dBm	85 (6 GHz, 160 MHz)	2x2
-58 dBm	40 (5 GHz, 80 MHz)	4x4
AP	U7 Pro Max SB-Ultra	
IP Address	192.168.3.41	
24H Internet Activity	136 MB	
TX Retries	0.0%	
Standard	WiFi 7, MLO	
MIMO Configuration	2x2	
AP/Client Signal Balance	Good	
MAC Address	c0:bf:be:b6:c0:b6	
Virtual Network	Internet	
VLAN ID	3	
Virtual Network Trigger	SB-Ultra	
IPv6 Address	fd99:2355:ad26:7ea8:58d9:1... i	
IPv6 Link Local	fe80::9b16:6baf:73a:3b27 □	
Hostname	DESKTOP-KUHMVO7	
Manufacturer	Microsoft Corp.	
Model	Windows	
OS	Windows	

Figur D1: Skärmdump från UniFi UI som verifierar klientstatusen för Asus B850.

F. Python-skript för automatiserad datainsamling

Nedanstående skript har tagits fram med assistans av AI (Google Gemini) och därefter verifierats och anpassats manuellt. Specifika anpassningarna har gjorts för sökvägar till iPerf3 och starttider inför varje testcykel för att genomföra mätningarna. Skriptet automatiserar användningen av mätverktyget iPerf3, vilket säkerställer hög precision i datainsamlingen.

```
import subprocess
import json
import os
import time
from datetime import datetime, timedelta

def wait_until_target_time(target_hour, target_minute, target_second):
    now = datetime.now()
    target_time = now.replace(hour=target_hour, minute=target_minute,
second=target_second, microsecond=0)

    if now > target_time:
        print(f"Klockan är {now.strftime('%H:%M:%S')}, vilket är efter
{target_time.strftime('%H:%M:%S')}." )
        print("Väntar till imorgon...")
        target_time += timedelta(days=1)

    wait_seconds = (target_time - now).total_seconds()

    print(f"Nuvarande tid: {now.strftime('%H:%M:%S')}")
    print(f"Starttid satt till: {target_time.strftime('%H:%M:%S')}")
    print(f"Nedräkning: {wait_seconds:.0f} sekunder kvar...\n")

    time.sleep(wait_seconds)

def run_iperf_reliable(server_ip, exe_path, run_number, target_bandwidth,
duration=10):
    # target_bandwidth är en integer (t.ex. 1000)

    command = [
        exe_path,
        "-c", server_ip,
        "-p", "5202",
        "-t", str(duration),
        "-u",
```

```
"-b", f"{target_bandwidth}M", # Sätt bandbredden dynamiskt
"-R",
"--json"
]

try:
    startupinfo = subprocess.STARTUPINFO()
    startupinfo.dwFlags |= subprocess.STARTF_USESHOWWINDOW

    result = subprocess.run(
        command, capture_output=True, text=True, check=True,
startupinfo=startupinfo
    )

    data = json.loads(result.stdout)

    # Hämta mottagar-data
    end_data = data.get('end', {})
    stats = end_data.get('sum', {})
    if 'sum_received' in end_data:
        stats = end_data['sum_received']

    # 1. Hämta värden
    bytes_transferred = stats.get('bytes', 0)
    mbps = stats.get('bits_per_second', 0) / 1_000_000
    jitter = stats.get('jitter_ms', 0)
    loss_percent = stats.get('lost_percent', 0)

    # 2. Beräkningar
    transfer_mb = bytes_transferred / (1024 * 1024)

    # Normaliserad formel: Faktisk / Begärd
    # Resultatet blir mellan 0.0 och 1.0 (där 1.0 är perfekt)
    normalized = mbps / target_bandwidth

    return {
        "run": run_number,
        "transfer": transfer_mb,
        "mbps": mbps,
        "normalized": normalized,
        "jitter": jitter,
```

```
        "loss": loss_percent
    }

except Exception as e:
    print(f"Fel vid körning {run_number}: {e}")
    return None

def main():
    # --- KONFIGURATION ---
    START_HOUR = 15
    START_MINUTE = 11
    START_SECOND = 00

    SERVER_IP = "192.168.3.5"
    PATH_FOLDER = r"C:\Users\iperf3.20_64\iperf3.20"

    TARGET_BANDWIDTH = 1000 # Mbps (Målet vi siktar på)
    ANTAL_MATNINGAR = 10
    TID_PER_MATNING = 10
    # -----

    wait_until_target_time(START_HOUR, START_MINUTE, START_SECOND)

    exe_path = os.path.join(PATH_FOLDER, "iperf3.exe")
    if not os.path.exists(exe_path):
        print(f"FEL: Kunde inte hitta filen {exe_path}")
        return

    print(f"Klockan är {datetime.now().strftime('%H:%M:%S')}. Startar testserie!")
    print(f"Mål: {TARGET_BANDWIDTH} Mbps UDP Reverse")
    print("-" * 115)
    # Norm. T-put anges nu som decimalvärde (0.0 - 1.0)
    print(f"{'Nr':<3} | {'Transfer (MB)':<13} | {'Throughput (Mbps)':<18} | {'Norm.
(0-1)':<15} | {'Jitter (ms)':<12} | {'P-Loss (%)':<10}")
    print("-" * 115)

    results = []

    for i in range(1, ANTAL_MATNINGAR + 1):
        res = run_iperf_reliable(SERVER_IP, exe_path, i, TARGET_BANDWIDTH,
TID_PER_MATNING)
```

```
if res:
    results.append(res)
    # Utskrift
    print(f"{res['run']:<3} | {res['transfer']:<13.2f} | {res['mbps']:<18.2f}
| {res['normalized']:<15.4f} | {res['jitter']:<12.3f} | {res['loss']:<10.2f}")

if i < ANTAL_MATNINGAR:
    time.sleep(1)

if results:
    avg_transfer = sum(r['transfer'] for r in results) / len(results)
    avg_mbps = sum(r['mbps'] for r in results) / len(results)
    avg_norm = sum(r['normalized'] for r in results) / len(results)
    avg_jitter = sum(r['jitter'] for r in results) / len(results)
    avg_loss = sum(r['loss'] for r in results) / len(results)

    print("-" * 115)
    print(f"'AVG':<3} | {avg_transfer:<13.2f} | {avg_mbps:<18.2f} |
{avg_norm:<15.4f} | {avg_jitter:<12.3f} | {avg_loss:<10.2f}")
    print("-" * 115)

if __name__ == "__main__":
    main()
```