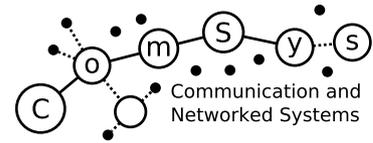




OTTO VON GUERICKE
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG

FACULTY OF
COMPUTER SCIENCE



Communication and
Networked Systems

Communication and Networked Systems

Bachelorarbeit

Experimentelle Evaluation des NABB-Protokolls im MIoT-Lab

Jonas Rebbelmund

Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. Mesut Güneş
Betreuender Assistent: MSc. Kai Kientopf

Zusammenfassung

Zusammenfassung

Für die Verteilung von Broadcast-Nachrichten in drahtlosen Multi-Hop-Netzwerken wird ein Protokoll benötigt um Broadcast-Stürmen vorzubeugen, welche ein Netzwerk durch zu viele Weiterleitungen überlasten. Ein solches Protokoll ist das Neighborhood Analysis Based Broadcasting (NABB) Protokoll welches in der Vergangenheit beschrieben und seine Leistungsmerkmale durch Simulationen gewonnen wurden. Ziel dieser Arbeit ist es die Ergebnisse der Simulationen durch eine experimentelle Evaluation zu validieren. Dafür wurde NABB auf dem IoT-Betriebssystem RIOT implementiert und anschließend im Magdeburger Internet of Things Lab (MIoT-Lab) Experimenten unterzogen. In den Experimenten wurde mit verschiedenen Parametern die Leistungsfähigkeit des NABB-Protokolls mit der des Gossiping-Protokolls verglichen. NABB konnte dabei eine ähnliche Versorgung, bei wesentlich weniger Broadcast-Weiterleitungen, im Vergleich zu Gossiping gewährleisten. Damit konnten die Ergebnisse der Simulation bestätigt werden. Eine Schwäche des Protokolls zeigte sich in der binären Modellierung der Nachbarschaftsverhältnisse im NABB-Protokoll. Dadurch kam es in Netzwerken mit niedrigen Verbindungsqualitäten zwischen den Teilnehmern zu Nachteilen bezüglich der Versorgung im Vergleich mit Gossiping. Lösungsansätze für diesen Umstand wurden entwickelt und ebenfalls experimentell evaluiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Modifikation „Nachbarschaftsschwelle“ die entstandenen Nachteile erfolgreich umgeht.

Abstract

For the distribution of broadcast messages in wireless multi-hop networks, a protocol is needed to prevent broadcast storms that overload a network by too many retransmissions. One such protocol is the Neighborhood Analysis Based Broadcasting (NABB) protocol which has been described in the past and its performance characteristics obtained through simulations. The goal of this work is to validate the results of the simulations by an experimental evaluation. For this purpose, NABB was implemented on the IoT operating system RIOT and then subjected to experiments in Magdeburg's Internet of Things Lab (MIoT Lab). In the experiments, the performance of the NABB protocol was compared with that of the Gossiping protocol using various parameters. NABB was able to provide similar coverage, with significantly fewer broadcast retransmissions, compared to Gossiping. This confirmed the results of the simulation. A weakness of the protocol was shown in the binary modeling of the neighbor relations in the NABB protocol. This resulted in disadvantages in terms of coverage in networks with low link qualities between nodes compared to gossiping. Possible solutions for this circumstance were developed and also evaluated experimentally. It could be shown that the modification "neighborhood threshold" successfully circumvents the disadvantages that have arisen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	x
Quellcodeverzeichnis	xi
Glossar	xii
1 Einleitung	1
1.1 Aufbau der Arbeit	2
2 Grundlagen	3
2.1 NABB	3
2.1.1 Funktionsweise sNABB	3
2.1.2 Funktionsweise dNABB	4
2.2 Gossiping	5
2.3 RIOT	5
2.3.1 GNRC	5
2.4 MIoT-Lab	5
3 Implementierung	6
3.1 Schnittstelle nach Außen	6
3.2 Submodule	6
3.3 Aufbau der Nachbarschaft-Broadcasts und Broadcast-Nachrichten	7
3.4 Aufbau der 2-Hop-Nachbarschaft	8
3.5 Datenstrukturen	9
3.5.1 Message-Datenstruktur	9
3.5.2 Nachbarschafts-Datenstruktur	10
3.5.3 Nachbarschafts-Matrix	10
3.5.4 Verbindungsqualitäts-Matrix	10
4 NABB in realen Netzwerken	11
4.1 Verbindungsqualität	12
4.2 Sendewiederholung	12
4.3 Nachbarschaftsschwelle	13
4.4 Flaschenhalserkennung	14

4.5	Verbindungsqualitätsabhängiges Timeout	14
5	Experiment-Design	17
5.1	Ziel der Experimente	17
5.2	Messgröße	17
5.3	Metriken	18
5.4	Parameter und Faktoren	18
5.4.1	Primäre Faktoren	18
5.4.2	Sekundäre Faktoren	19
5.4.3	Externe Variablen	19
5.5	Experimentablauf	19
5.6	Netzwerk-Topologie	21
5.7	Experiment Design	21
6	Ergebnis	23
6.1	Experimente mit kleinen Topologien	23
6.1.1	2-Knoten-Topologie	23
6.1.2	3-Knoten-Topologie	28
6.1.3	4-Knoten-Topologie	34
6.1.4	5-Knoten-Topologie	39
6.2	Experimente mit allen Knoten	44
6.2.1	8-Knoten-Topologie bei 0dBm	44
6.2.2	8-Knoten-Topologie bei -10 dBm	50
6.3	Vergleich der Experimente mit den Simulationen	54
6.3.1	Unterschiede in den Bedingungen	54
6.3.2	Vergleich der Ergebnisse der Linientopologie	55
6.3.3	Vergleich der Ergebnisse für 8-Knoten- und Netzwerktopologie	55
6.4	Experimente mit modifizierten Protokollen	56
6.4.1	Nachbarschaftsschwelle mit 5 Knoten	56
6.4.2	Nachbarschaftsschwelle mit 8 Knoten	59
6.4.3	Flaschenhalserkennung mit 8 Knoten	62
6.4.4	Verbindungsqualitätsabhängiges Timeout mit 4 Knoten	68
6.4.5	Verbindungsqualitätsabhängiges Timeout mit 8 Knoten	68
6.4.6	Sendewiederholung mit 3 Knoten	72
6.4.7	Sendewiederholung mit 8 Knoten	75
7	Fazit	78
7.1	Ausblick	79
	Literaturverzeichnis	80
	Anhang	80
A.1	Boxplots	81
A.2	Netzwerktopologien mit allen Knoten	82
A.3	Simulationsergebnisse Linientopologie	85
A.4	Simulationsergebnisse Netzwerktopologie	89

A.5	Ergebnisse anderer Experimente	92
A.5.1	8-Knoten-Topologie bei -15 dBm Sendeleistung	92
A.5.2	Nachbarschaftsschwelle mit 5-Knoten	95
A.5.3	Nachbarschaftsschwelle mit 8-Knoten bei 0 und -15 dBm Sendeleistung	96
A.5.4	Verbindungsqualitätsabhängiges Timeout mit 4 Knoten	100

Abbildungsverzeichnis

2.1	Beispielhafte Netzwerktopologie aus fünf Knoten	4
3.1	Aufbau einer Broadcast-Nachricht	7
3.2	Aufbau eines Nachbarschaft-Broadcasts	8
4.1	Übertragungreichweite und Erkennungreichweite	11
4.2	Empfangswahrscheinlichkeit einer Nachricht in Abhängigkeit der Verbindungs- qualität bei verschiedenen Sendungswiederholungen	13
4.3	Beispiel für Auswirkung der Nachbarschaftsschwelle	14
4.4	Verschiebung des Verbindungsqualitätsabhängigen Timeouts	15
5.1	Vorexperiment mit 2 Knoten zur Bestimmung einer geeigneten Dauer der Experimentierphase	20
6.1	2 Knoten Topologie	23
6.2	Experimentergebnis mit Gossiping, 2 Knoten	25
6.3	Experimentergebnis mit sNABB, 2 Knoten	26
6.4	Experimentergebnis mit dNABB, 2 Knoten	27
6.5	3-Knoten-Topologie	28
6.6	Experimentergebnis mit Gossiping, 3 Knoten	31
6.7	Experimentergebnis mit sNABB, 3 Knoten	32
6.8	Experimentergebnis mit dNABB, 3 Knoten	33
6.9	4-Knoten-Topologie	34
6.10	Experimentergebnis mit Gossiping, 4 Knoten	36
6.11	Experimentergebnis mit sNABB, 4 Knoten	37
6.12	Experimentergebnis mit dNABB, 4 Knoten	38
6.13	5-Knoten-Topologie	39
6.14	Experimentergebnis mit Gossiping, 5 Knoten	41
6.15	Experimentergebnis mit sNABB, 5 Knoten	42
6.16	Experimentergebnis mit dNABB, 5 Knoten	43
6.17	Verteilung der Verbindungsqualitäten in Abhängigkeit zur Sendeleistung . .	45
6.18	Experimentergebnis mit Gossiping, 8 Knoten, 0 dBm	47
6.19	Experimentergebnis mit sNABB, 8 Knoten, 0 dBm	48
6.20	Experimentergebnis mit dNABB, 8 Knoten, 0 dBm	49
6.21	Experimentergebnis mit Gossiping, 8 Knoten, -10 dBm	51
6.22	Experimentergebnis mit sNABB, 8 Knoten, -10 dBm	52

6.23	Experimentergebnis mit dNABB, 8 Knoten, -10 dBm	53
6.24	5-Knoten-Topologie mit Nachbarschaftsschwelle	56
6.25	Experimentergebnis mit sNABB, 5 Knoten, -10 dBm und Nachbarschaftsschwelle	58
6.26	Experimentergebnis mit sNABB, 8 Knoten, -10 dBm und Nachbarschaftsschwelle	60
6.27	Experimentergebnis mit dsNABB, 8 Knoten, -10 dBm und Nachbarschaftsschwelle	61
6.28	Experimentergebnis mit sNABB, 8 Knoten, -15 dBm und Flaschenhalserkennung	64
6.29	Experimentergebnis mit dNABB, 8 Knoten, -15 dBm und Flaschenhalserkennung	65
6.30	Experimentergebnis mit sNABB, 4 Knoten, -15 dBm und Flaschenhalserkennung	66
6.31	Experimentergebnis mit dNABB, 8 Knoten, -15 dBm und Flaschenhalserkennung	67
6.32	4-Knoten-Topologie mit Verbindungsqualitätsabhängigen Timeout	68
6.33	Experimentergebnis mit sNABB, 8 Knoten, -15 dBm und Verbindungsqualitätsabhängiges Timeout	70
6.34	Experimentergebnis mit dNABB, 8 Knoten, -15 dBm und VerbindungsQualitätsabhängiges Timeout	71
6.35	3 Knotentopologie mit und ohne Sendewiederholung	72
6.36	Experimentergebnis mit sNABB, 3 Knoten, -5 dBm und Sendewiederholung	73
6.37	Experimentergebnis mit dNABB, 3 Knoten, -5 dBm und Sendewiederholung	74
6.38	Experimentergebnis mit sNABB, 8 Knoten, -15 dBm und Sendewiederholung	76
6.39	Experimentergebnis mit dNABB, 8 Knoten, -15 dBm und Sendewiederholung	77
A.1	Boxplot	81
A.2	Netzwerktopologie bei 0 dBm	82
A.3	Netzwerktopologie bei -10 dBm	83
A.4	Netzwerktopologie bei -15 dBm	84
A.5	Netzwerktopologie bei -20 dBm	85
A.6	Ausschnitt aus der Masterarbeit von Kai Kientopf	86
A.7	Ausschnitt aus der Masterarbeit von Kai Kientopf	87
A.8	Ausschnitt aus der Masterarbeit von Kai Kientopf	88
A.9	Ausschnitt aus der Masterarbeit von Kai Kientopf	89
A.10	Ausschnitt aus der Masterarbeit von Kai Kientopf	90
A.11	Ausschnitt aus der Masterarbeit von Kai Kientopf	91
A.12	Experimentergebnis mit Gossiping, 8 Knoten, -15 dBm	92
A.13	Experimentergebnis mit sNABB, 8 Knoten, -15 dBm	93
A.14	Experimentergebnis mit dNABB, 8 Knoten, -15 dBm	94
A.15	Experimentergebnis mit dNABB, 5 Knoten, -10 dBm und Nachbarschaftsschwelle	95
A.16	Experimentergebnis mit sNABB, 8 Knoten, 0 dBm und Nachbarschaftsschwelle	96
A.17	Experimentergebnis mit dNABB, 8 Knoten, 0 dBm und Nachbarschaftsschwelle	97
A.18	Experimentergebnis mit sNABB, 8 Knoten, -15 dBm und Nachbarschaftsschwelle	98

A.19 Experimentergebnis mit dNABB, 8 Knoten, -15 dBm und Nachbarschaftsschwelle	99
A.20 Experimentergebnis mit sNABB, 4 Knoten, -10 dBm und Verbindungsqualitätsabhängiges Timeouts	100
A.21 Experimentergebnis mit dNABB, 4 Knoten, -10 dBm und Verbindungsqualitätsabhängiges Timeouts	101

Tabellenverzeichnis

6.1	Berechnung der Werte für Versorgung, Güte und Aufwand für Linien-Topologien	28
6.2	Erwartete Werte nach den Berechnungsformeln aus Tabelle 6.1	28
6.3	Verteilung Knotengrade der 8-Knoten Topologien	44
6.4	Unterschiede in der Durchführung von den Experimenten und den Simulationen	54

Quellcodeverzeichnis

3.1	Nachbarschaftsinformation im Nachbarschaftsbroadcast	9
3.2	Message-Datenstruktur	9
3.3	Nachbarschafts-Datenstruktur	10

Glossar

Broadcast Storm Überlastung des Netzwerks aufgrund uneingeschränkter Sendewiederholung eines Broadcasts in einem drahtlosen Netzwerk. 1, 13, 79

Broadcast-Nachricht Eine Nachricht die jeder Knoten im Netzwerk erhalten soll. 1, 3–7, 9, 10, 12, 14, 17–20, 23, 24, 28–30, 34, 35, 39, 40, 50, 54–57, 59, 62, 72, 75, 79

Fluten Beim Fluten wird eine Broadcast-Nachricht von jedem Knoten im Netzwerk wiederholt. 3, 5, 18, 20

Gossiping Bei einer Broadcast-Nachricht mit Gossiping wird die Nachricht von jedem Knoten im Netzwerk mit einer festen Wahrscheinlichkeit wiederholt, siehe Abschnitt 2.2. 3, 5, 17, 18, 20, 21, 23, 24, 28, 29, 34, 35, 39, 44, 45, 50, 55, 56

Knoten Netzwerkteilnehmer in einem Testbed. vii, 1, 3–5, 8, 10–14, 16, 17, 19–21, 23, 24, 28, 29, 34, 35, 39, 40, 44, 45, 50, 55–57, 59, 62, 68, 78

Mesh-Topologie Bei einer Mesh-Topologie haben alle Knoten im Netzwerk einen oder mehrere Nachbarknoten und zwischen zwei Knoten lässt sich immer ein Weg finden, der diese miteinander verbindet. 1

Nachbarschafts-Broadcast Eine Nachricht zum Aufbau der von NABB benötigten 2-Hop-Nachbarschaft. 6–8, 10, 12, 19

Testbed Ein Experimentierfeld, bestehend aus realer Hardware die den umliegenden Einflüssen unterliegt. 5, 19, 21, 54, 62

Verbindungsqualität Verhältnis erfolgreich empfangener zu den gesendeten Nachrichten zwischen zwei Knoten. 2, 6–16, 19–21, 23, 29, 34, 35, 44, 45, 50, 54, 55, 57, 62, 68, 69, 72, 75, 78, 79

KAPITEL 1

Einleitung

Eine Broadcast-Nachricht ist eine Nachricht die jeden Teilnehmer eines (Sub-)Netzwerkes erreichen soll. Wegen des hierarchischen Aufbaus kabelgebundener und klassischer drahtloser Netzwerke ist die Versendung solch einer Broadcast-Nachricht einfach umzusetzen. Diese Netzwerke bestehen üblicherweise aus untereinander über Kabel verbundenen Hubs¹ die häufig eine Baum-Topologie bilden.² Entlang dieser Baum-Topologie kann die Broadcast-Nachricht im Netzwerk verteilt werden.

In drahtlosen Multi-Hop-Netzwerken fehlt diese hierarchische Ordnung. Es gibt keine zentralen Hubs, die dafür sorgen, dass alle Netzwerkteilnehmer (Knoten) eine Broadcast-Nachricht erhalten. Vielmehr bestehen sie aus gleichwertigen Knoten die eine mehr oder weniger zufällige und eventuell dynamische Mesh-Topologie bilden können. Sendet ein Knoten eine Broadcast-Nachricht muss jeder Knoten, der diese Broadcast-Nachricht empfängt entscheiden, ob er sie weiterleitet oder nicht.

Der Ansatz, dass immer jeder Knoten die Broadcast-Nachricht lokal wiederholt hat zwei unmittelbare Nachteile. Erstens sind Multi-Hop-Netzwerke häufig batteriebetrieben, deswegen wird versucht das Senden von Nachrichten wenn möglich zu vermeiden, da es sehr stromintensiv ist. Zweitens führt dieser Weg schnell zu einem Broadcast Storm [1]. Dabei wird das von allen geteilte Übertragungsmedium des Netzwerks durch die schiere Anzahl der Nachrichten schnell ausgelastet und zusätzlich kommt es zu häufigen Kollisionen der Nachrichten während der Übertragung. Kollidieren zwei oder mehr Nachrichten bei einem Empfänger, so kann dieser keine einzige davon „lesen“.

Viele der lokal weitergeleiteten Broadcast-Nachrichten sind jedoch redundant und könnten weggelassen werden. Verschiedene Broadcasting-Protokolle versuchen diese redundanten Weiterleitungen zu vermeiden und so einen Broadcast Storm zu verhindern. Ziel dieser Protokolle ist, dass möglichst alle Teilnehmer des Netzwerks die Broadcast-Nachricht erhalten und diese Nachricht dabei möglichst selten lokal wiederholt wird.

In seiner Masterarbeit „Ressourcensparendes Broadcasting in dezentralen drahtlosen Netzwerken per Nachbarschaftsanalyse“ hat Kai Kientopf ein Broadcasting-Protokoll vorgestellt

¹Hub steht hier stellvertretend für alle Geräte die für die Weiterleitung des Nachrichtenflusses in einem Netzwerk genutzt werden können, wie z.B. Router und Switches

²oder über einen Spanning Tree Algorithmus auf eine Baum-Topologie reduziert werden

und seine Leistung in verschiedenen Simulationen getestet [2]. In dieser Bachelor-Arbeit soll die Leistung dieses Protokolls auf Basis verschiedener Experimente in realer Umgebung evaluiert und mit den Ergebnissen der Simulationen verglichen werden.

1.1 Aufbau der Arbeit

Im folgenden Kapitel werden NABB sowie weitere für diese Arbeit relevante Themen kurz vorgestellt. In Kapitel 3 wird noch einmal genauer auf die verwendete Implementation von NABB eingegangen. Kapitel 4 geht auf Probleme ein, die mit NABB in Netzwerken entstehen können, in denen die Verbindungsqualität zwischen einzelnen Netzwerk-Knoten nicht optimal ist. Weiterhin werden Lösungsstrategien für dieses Problem diskutiert. In Kapitel 5 werden Aufbau und Ablauf der in Kapitel 6 ausgewerteten Experimente beschrieben. Und zum Schluss werden in Kapitel 7 die Erkenntnisse, die beim Durchführen der Arbeit gewonnen wurden, noch einmal zusammengefasst.

KAPITEL 2

Grundlagen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die zur Durchführung der Arbeit benötigten Komponenten und Themenfelder. So wird kurz die Funktionsweise von NABB und Gossiping, eines weiteren Broadcasting-Protokolls welches zum Leistungsvergleich herangezogen wurde, vorgestellt. Weiterhin wird kurz auf das für die Implementierung der Protokolle genutzte Betriebssystem RIOT und dessen Netzwerk-Stack GNRC eingegangen. Zum Schluss wird noch das in den Experimenten genutzte Testbed, das MIoT-Lab, vorgestellt.

2.1 NABB

Neighborhood analysis based broadcasting (NABB) ist ein Protokoll zum Verteilen von Broadcast-Nachrichten in drahtlosen Netzwerken, entworfen von Kientopf et al. [2] [3]. Für NABB benötigt jeder Knoten Kenntnis über seine 2-Hop-Nachbarschaft, die vorher ausgetauscht werden muss. Dann versucht es mithilfe dieser Informationen einen Vorteil beim Verteilen der Broadcast-Nachrichten zu schaffen. Im Vergleich zum Gossiping oder Fluten kann eine veritable Vermeidung von Nachrichten-Wiederholungen erreicht werden. Die Implementierung von NABB wird im Kapitel 3 vorgestellt.

NABB besitzt zwei verschiedene Optionen, die die Weiterleitungswahrscheinlichkeit für eine Broadcast-Nachricht zu bestimmen: simple NABB (sNABB) und dynamic NABB (dNABB). Diese sollen im folgenden aus Sicht eines Knotens beschrieben werden.

2.1.1 Funktionsweise sNABB

Jede neu empfangene Broadcast-Nachricht erhält ein Timeout und alle Sender der Nachricht werden bis zum Ablauf eines Timeouts von unserem Knoten gesammelt. Nach Ablauf des Timeouts wird bestimmt, ob die Broadcast-Nachricht weitergeleitet wird. Dafür wird mithilfe des Wissens um die 2-Hop Nachbarschaft geprüft, welche Knoten die Broadcast-Nachricht noch nicht erreicht haben (Ziele). Danach wird für jedes Ziel die Menge der direkten gemeinsamen Nachbarn ermittelt, die die Broadcast-Nachricht schon erhalten, jedoch noch nicht weitergeleitet haben (Konkurrenten). Aus der Anzahl der Konkurrenten und einem vorher festgelegten Servicequalitäts-Wert wird dann eine Weiterleitungswahrscheinlichkeit

für jedes Ziel berechnet. Die Broadcast-Nachricht wird dann mit einer Wahrscheinlichkeit, die der größten für ein Ziel berechneten Wahrscheinlichkeit entspricht, von dem Knoten weitergeleitet.

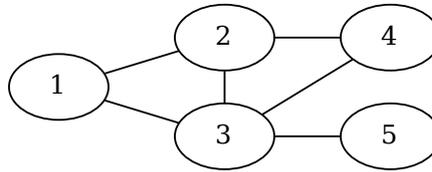


Abbildung 2.1: Beispielhafte Netzwerktopologie aus fünf Knoten. Es besteht eine Verbindung zwischen zwei Knoten, wenn sie durch eine Kante verbunden sind.

2.1.2 Funktionsweise dNABB

Bei sNABB hängt die Weiterleitungswahrscheinlichkeit nur von dem Servicequalitäts-Wert und der Anzahl der Konkurrenten ab. Wie sich diese Konkurrenten vorher verhalten haben wird nicht berücksichtigt. Es kann aber vorkommen, dass bestimmte Konkurrenten Broadcast-Nachrichten weiterleiten, obwohl unser Knoten sie schon weitergeleitet hatte. Für alle gemeinsamen Ziele war unsere Weiterleitung dann redundant.

dNABB zählt diese Fälle für die 1-Hop Nachbarschaft mit und lässt sie in die Berechnung der Weiterleitungswahrscheinlichkeit für ein Ziel mit einfließen. Die Weiterleitungswahrscheinlichkeit für ein Ziel wird dann umso geringer, je öfter ein Konkurrent eine Broadcast-Nachricht nach unserem Knoten noch einmal sendet.

Ein Beispiel für diesen Fall ist in Abbildung 2.1 gegeben. Knoten 1 sendet eine Broadcast-Nachricht, die von Knoten 2 und 3 empfangen wird. Mit sNABB wird Knoten 2 Knoten 4 als Ziel und Knoten 3 als Konkurrent erkennen und die Nachricht daraufhin mit immer derselben Wahrscheinlichkeit für Knoten 4 weiterleiten, auch wenn hinterher Knoten 3 dieselbe Nachricht für Knoten 5 wiederholt. Die Weiterleitung durch Knoten 2 war dann überflüssig, Knoten 4 wäre durch Knoten 3 ebenfalls versorgt worden.

Mit dNABB stellt Knoten 2 fest, dass seine Weiterleitungen für Knoten 4 redundant sind, da Knoten 3 die Broadcast-Nachricht „immer“¹ für Knoten 5 wiederholen wird² und dabei auch Knoten 4 versorgt. Knoten 2 verringert daraufhin für jede festgestellte redundante Weiterleitung durch Knoten 3 seine Weiterleitungswahrscheinlichkeit für Knoten 4.

¹angenommen wird hier ein minimaler Servicequalität-Wert von 0, theoretisch könnte eine Weiterleitung bei höheren minimalen Servicequalität-Werten unterlassen werden

²es gibt aus Sicht von Knoten 3 keinen Konkurrenten für Knoten 5, weswegen die Weiterleitungswahrscheinlichkeit bei einer minimalen Servicequalität von 0 bei 1 liegt

2.2 Gossiping

Gossiping ist wie NABB ein Protokoll zum Verteilen von Broadcast-Nachrichten in drahtlosen Netzwerken. Dabei wird eine globale Wahrscheinlichkeit für die Weiterleitung der Broadcast-Nachrichten festgelegt. Eine Weiterleitungswahrscheinlichkeit von 1 entspricht dabei dem Fluten, bei der jede empfangene Broadcast-Nachricht weitergeleitet wird.

2.3 RIOT

Bacelli et al. [4] beschreiben RIOT als ein open source Betriebssystem für Mikrocontroller. Es unterstützt dabei 8 Bit, 16 Bit und 32 Bit Architekturen. Außerdem existiert ein 'native'-Port, der es ermöglicht, RIOT auf Linux Systemen zu starten. Durch kontinuierliche Weiterentwicklung wird versucht, RIOT seinen selbstgesteckten Zielen näherzubringen. Diese Ziele umfassen unter anderem: möglichst geringen RAM, ROM und Stromverbrauch, sowie die Verwendbarkeit von Code über verschiedene Plattformen hinweg.

2.3.1 GNRC

In ihrer Masterarbeit beschreibt M. Lenders den von ihr mitentwickelten GNRC Network Stack für RIOT [5]. GNRC deckt dabei Transport- und Internetschicht ab, der Fokus liegt auf IPv6. Die Ziele der Implementierung von GNRC überschneiden sich mit den genannten Zielen von RIOT.

2.4 MIoT-Lab

Das Magdeburg Internet of Things Lab ist ein Testbed für Experimente in drahtlosen Netzwerken [6]. Dafür sollen bis zu 200 Knoten innerhalb der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg ausgebracht werden. Die Hardware der in den Experimenten genutzten Knoten besteht unter anderem aus einem STM32 NUCLEO-F767ZI Entwicklerboard und dem Atmel AT86RF215 als Transceiver, welcher in den Experimenten im 2,4 GHz Frequenzband arbeitet. Das Testbed befindet sich momentan im Aufbau und besteht während der Durchführung der Experimente aus 8 verfügbaren Knoten. Eine beispielhafte Topologie des Netzwerkes befindet sich im Anhang A.2 dieser Arbeit.

KAPITEL 3

Implementierung

In diesem Kapitel werden die Kernstücke meiner Implementierung von NABB vorgestellt. Die Implementierung ist in die Internetschicht des TCP/IP Modells eingebettet. Sie läuft dementsprechend auf dem 'IPv6'-Thread von RIOT. Zuerst werden die Schnittstellen zum Nutzen und der grobe Aufbau der Implementation vorgestellt. Danach wird auf das Aussehen der beiden implementierten Nachrichten-Typen, Broadcast-Nachricht und Nachbarschafts-Broadcast, eingegangen und anschließend die Funktionsweise des Aufbaus der 2-Hop-Nachbarschaft erklärt. Zuletzt werden noch die zugrundeliegenden Datenstrukturen vorgestellt.

3.1 Schnittstelle nach Außen

Die Implementierung besitzt zwei nutzerrelevante Schnittstellen. Erstens die Funktion `nabb_brc_msg()` zum Versenden von Broadcast-Nachrichten. Zweitens `nabb_brc_rand_msg()` die eine 32-Bit lange Zufallszahl als Nachrichteninhalt versendet und für die folgenden Experimente genutzt wird. Die Größe dieser Zufallsnachricht kann dabei mit der eines Konfigurationsparameters oder eines Sensorwertes verglichen werden.

3.2 Submodule

Zur Übersichtlichkeit besitzt der Code vier Submodule, die für verschiedene Funktionen des Programms verantwortlich sind.

- 'Nachrichten' ist zuständig für den Aufbau und die Verarbeitung von Broadcast-Nachrichten. Außerdem hält es den Nachrichtenspeicher vor.
- 'Nachbarschaft' verwaltet die Nachbarschaftsliste, die binäre Verbindungsmatrix und ist für den Aufbau und die Verarbeitung der Nachbarschafts-Broadcasts verantwortlich.
- 'Verbindungsqualität' speichert die Verbindungsqualitäten in der Nachbarschaft. Dieses Modul geht über die puren NABB-Anforderungen hinaus und wird für die im nächsten Kapitel vorgestellten optionalen Modifikationen benötigt.

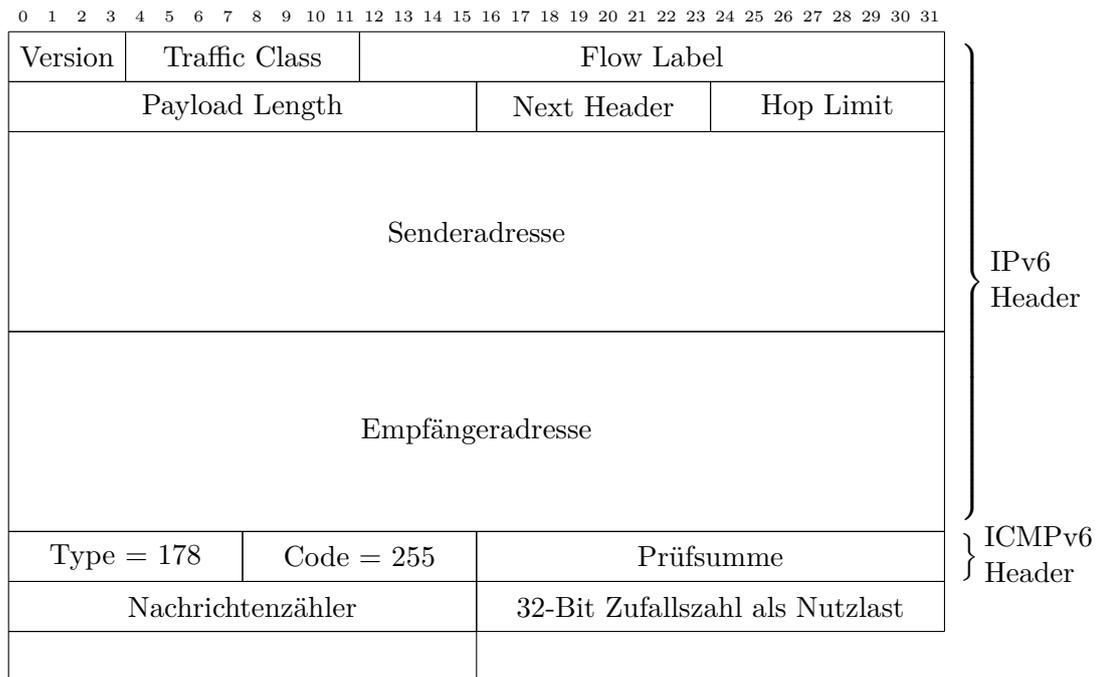


Abbildung 3.1: Aufbau der in den Experimenten verwendeten Broadcast-Nachricht `nabb_brc_rand_msg()`

- In 'Rechner' wurden häufige Bitoperationen zum Bestimmen gemeinsamer Nachbarn, Zielen oder Konkurrenten hinterlegt

3.3 Aufbau der Nachbarschaft-Broadcasts und Broadcast-Nachrichten

Die von NABB versendeten Broadcast-Nachrichten und Nachbarschafts-Broadcasts sind aufgebaut aus einem 40 Byte großem IPv6-Header und darunter ein 4 Byte großer ICMP-Header. Als ICMP-Type für NABB wird die 178 verwendet und der Code gibt die Länge der geteilten 1-Hop-Nachbarschaftsliste an (siehe Abschnitt 3.4). Liegt ein Code von 255 vor, handelt es sich um eine Broadcast-Nachricht.

Als nächstes kommt der NABB-Header. Dieser besteht allein aus einem 16-Bit langen inkrementierenden Nachrichtenzähler zur Bestimmung von Verbindungsqualitäten und übersteigt die puren NABB-Anforderungen (siehe Kapitel 4).

Zuletzt kommt noch die Nutzlast, also der eigentliche Inhalt einer Broadcast-Nachricht oder Nachbarschafts-Information, welche beispielhaft in den Abbildungen 3.1 und 3.2 dargestellt sind. Die Länge der Nachricht ist beliebig. Die Nutzlast der Nachbarschaftsinformation steigt für jeden gelisteten Nachbarn um weitere 18 Byte. Die Länge der Nutzlast ist durch die Maximum Transmission Unit von IPv6 sowie des maximalen Code-Wertes des ICMP-Headers von 254 begrenzt.

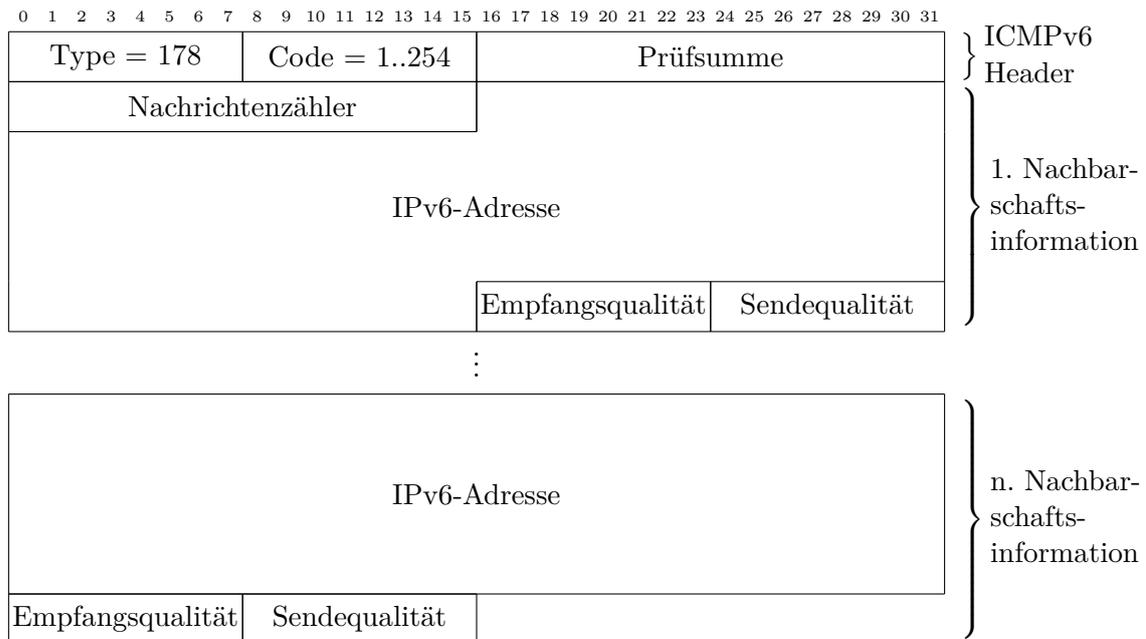


Abbildung 3.2: Aufbau eines Nachbarschaft-Broadcasts (ohne IPv6-Header)

3.4 Aufbau der 2-Hop-Nachbarschaft

Zum Aufbau der 2-Hop-Nachbarschaft wird von jedem Knoten nach dem Aufstarten eine festgelegte Anzahl an Nachbarschafts-Broadcasts gesendet. Die Anzahl der initialen Nachbarschafts-Broadcasts sollte in Abhängigkeit von der erwarteten Verbindungsqualität gewählt werden. In einem Netzwerk ohne Verluste würde ein initialer Nachbarschafts-Broadcast genügen.

Der Nachbarschafts-Broadcast enthält als Nutzlast für jeden bekannten Nachbarn der 1-Hop-Nachbarschaft einen separaten `struct neighbor_brc`. Dieser besteht, wie in Quellcode 3.1 dargestellt, aus der IPv6-Adresse des Nachbarn und der Verbindungsqualität in Send- und Empfangsrichtung. Zusätzlich kann die Adresse des Absenders aus dem IP-Paket ausgelesen werden. Wird dieser Nachbarschafts-Broadcast von einem anderen Knoten empfangen, kann dieser Knoten daraufhin seine 1- und 2-Hop-Nachbarschaftsinformationen aktualisieren oder erweitern. Wird die 1-Hop-Nachbarschaftsinformationen signifikant verändert, weil ein neuer 1-Hop-Nachbar gefunden wurde oder sich die Verbindungsqualität zu einem Nachbarn stark verändert hat, wird von diesem Knoten ein neuer Nachbarschafts-Broadcast versendet. So können sich die 1- und 2-Hop-Nachbarschaftsinformationen im Netzwerk verteilen.

```

1 typedef struct neighbor_brc{
2   ipv6_addr_t addr;      /**< ipv6 addr of neighbor */
3   >uint8_t link_send;    /**< Link Quality from this to neighbor */
4   >uint8_t link_rcv;     /**< Link Quality from neighbor to this */
5 } neighbor_brc_t;

```

Quellcode 3.1: Für jeden 1-Hop-Nachbarn werden folgende Informationen im Nachbarschaftsbroadcast übermittelt. Mit einem „>“ markierte Elemente werden wegen im Kapitel 4 vorgestellter NABB-Modifikationen benötigt.

3.5 Datenstrukturen

Für die Implementation NABB werden drei Datenstrukturen benötigt. Eine Liste zum Vorhalten empfangener Nachrichten, eine Liste mit Informationen über bekannte Nachbarn und eine Matrix, in der die Verbindungen zwischen den bekannten Nachbarn gespeichert werden. Weiterhin gibt es noch eine Matrix, in der zusätzlich die Verbindungsqualitäten der Verbindungen zwischen bekannten Nachbarn gespeichert wird. Diese Matrix wird ausschließlich für die im folgenden Kapitel vorgestellten NABB-Modifikationen benötigt.

3.5.1 Message-Datenstruktur

Jede empfangene Broadcast-Nachricht wird in einem Ringspeicher zwischengespeichert. Die dabei gespeicherten Informationen werden in Quellcode 3.2 dargestellt. Die Empfangszeit einer Broadcast-Nachricht wird für das Verbindungsqualitätsabhängige Timeout benötigt. Da mit eingestellter Sendewiederholung eine Broadcast-Nachricht von einem Sender mehrfach gesendet werden kann, muss für jeden Nachbarn gespeichert werden, ob der k und l Zähler schon für diese Nachricht inkrementiert worden ist.¹

```

1 typedef struct message_list{
2   uint8_t state;          /**< state of the Message */
3   const uint8_t* message; /**< pointer to message */
4   uint16_t len;          /**< length of message in bytes */
5   >unsigned rcv_time;     /**< Time message was received */
6   evtimer_msg_event_t timeout; /**< timeout event of message */
7   uint8_t senders[];     /**< Bitarray of senders of message */
8   >uint8_t k_cnt[]; /**< Bitarray, stores if k was already incremented for this
9   sender and message */
10  >uint8_t l_cnt[]; /**< Bitarray, stores if l was already incremented for this
11  sender and message */
12  >uint8_t forwards_left;
13 } message_list_t;

```

Quellcode 3.2: Message-Datenstruktur. Mit einem „>“ markierte Elemente werden wegen im Kapitel 4 vorgestellter NABB-Modifikationen benötigt.

¹Diese beiden Zähler sind für die Berechnung der Weiterleitungswahrscheinlichkeit für dNABB relevant. Die genaue Funktionsweise wird von Kientopf et al. erklärt [3].

3.5.2 Nachbarschafts-Datenstruktur

Jeder Knoten innerhalb der 2-Hop-Nachbarschaft wird in der Nachbarschafts-Datenstruktur vermerkt. Zur Bestimmung der Verbindungsqualität eines Nachbarn wird die Anzahl der von ihm empfangenen Broadcast-Nachrichten und Nachbarschafts-Broadcasts gespeichert.

```
1 typedef struct neighbor_list{
2   ipv6_addr_t addr;    /**< ipv6 addr of neighbor */
3   uint8_t type;       /**< 1HN or 2HN */
4   uint16_t k_cnt;     /**< dNABB Counter*/
5   uint16_t l_cnt;     /**< dNABB Counter */
6   >uint16_t adv_rcv;  /**< Amount of received NABB-Advertismets from Neighbor */
7   >uint16_t msg_rcv;  /**< Amount of received NABB-Messages from Neighbor */
8 } neighbor_list_t;
```

Quellcode 3.3: Nachbarschafts-Datenstruktur. Mit einem „>“ markierte Elemente werden wegen im Kapitel 4 vorgestellter NABB-Modifikationen benötigt.

3.5.3 Nachbarschafts-Matrix

Ob von einem Knoten zu einem anderen eine Verbindung besteht, wird in einer Nachbarschafts-Matrix binär gespeichert. Es kann also nur festgestellt werden, ob eine Verbindung besteht oder nicht. Eine Verbindung gilt als bestehend, sobald der Knoten mindestens eine Nachricht vom Nachbarknoten empfangen hat. Aufgrund der teilweise un stetigen Verbindungen innerhalb der Knoten des MIoT-Lab wurde die Nachbarschafts-Matrix ergänzt durch die Verbindungsqualitäts-Matrix.

3.5.4 Verbindungsqualitäts-Matrix

Die Verbindungsqualitäts-Matrix ergänzt die Nachbarschafts-Matrix um Verbindungsqualitäten zwischen den Knoten. Dafür wird, anstelle eines Bits, eine Empfangswahrscheinlichkeit für jede Verbindung gespeichert. Die Verbindungsqualitäts-Matrix geht über die eigentlichen Anforderungen von NABB hinaus und wird für die im folgenden Kapitel vorgestellten Modifikationen benötigt.

KAPITEL 4

NABB in realen Netzwerken

In diesem Kapitel soll darauf eingegangen werden, welche Schwierigkeiten für NABB auftreten können, wenn die Nachbarschaften zwischen den Knoten nur in einem binären Verhältnis abgebildet werden, also zwei Knoten entweder benachbart sind oder nicht. In der Praxis können zwei Knoten auch, beispielsweise nur „halb“ verbunden sein, in dem Sinne, dass nur jede zweite Nachricht zwischen ihnen erfolgreich übertragen wird. Der Grad der Verbundenheit soll Verbindungsqualität genannt werden. Diese feingranulare Abstimmung wird von NABB nicht vorgesehen und die Formeln für die Berechnung für gemeinsame Nachbarn, mögliche Ziele und Konkurrenten gehen immer von einer binären Abbildung der Nachbarschaft aus. Dadurch kann es zu unerwünschten Effekten kommen, wie in den später vorgestellten Experimenten deutlich wird. Um diese unerwünschten Effekte abzumildern, werden die Ursache und einige mögliche Modifikationen des Protokolls in diesem Kapitel vorgestellt.

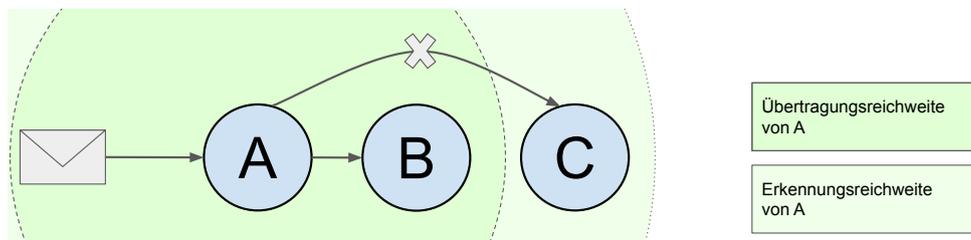


Abbildung 4.1: Übertragungsreichweite und Erkennungsreichweite

Verbindungen von Knoten in realen Netzwerken erreichen selten eine Verbindungsqualität von 100 Prozent. Es kommt vor, dass Nachrichten zwischen zwei Knoten verloren gehen. Ob eine Kommunikation zwischen 2 Knoten funktioniert, hängt von der Verbindungsqualität zwischen ihnen ab. Das klassische NABB unterscheidet nicht zwischen verschiedenen Verbindungsqualitäten. Zwei Knoten sind entweder benachbart, oder eben nicht. Weiterhin ist NABB als nicht zuverlässig in der Übertragung anzusehen, in dem Sinne, dass sich ein Sender nicht über die erfolgreiche Übertragung einer Nachricht beim Empfänger rückversichert.

In „Mobile Communications“ [7] beschreibt Schiller drei Reichweite-Kategorien für Funk-

Signale. Die Übertragungreichweite („transmission range“), innerhalb derer gesendete Nachrichten empfangen werden können. Die Erkennungreichweite („detection range“), innerhalb derer Nachrichten als solche noch erkannt werden können und die Fehlerrate jedoch für Kommunikation zu groß ist. Und die Störungreichweite („interference range“), innerhalb der die Nachricht nur noch zum Hintergrundrauschen zählt und maximal andere Funksignale stört.

Relevant für NABB in realen Netzwerken ist der Unterschied zwischen der Übertragungreichweite und der Erkennungreichweite, wie im folgenden Beispiel erläutert:

Es sei eine Topologie wie auf Abbildung 4.1 gegeben. Knoten A und B erhalten eine Nachricht. A leitet diese für C weiter. B empfängt die weitergeleitete Nachricht von A und streicht C von seiner Zielliste. Jedoch erreicht C die von A gesendete Nachricht eventuell nicht, da sich C nur in der Erkennungreichweite von A befindet. Das Problem: NABB unterteilt die 1-Hop-Nachbarn nicht in solche innerhalb der Übertragungreichweite und der Erkennungreichweite.

4.1 Verbindungsqualität

Um die Nachbarschaft in diese beiden Reichweite-Kategorien einteilen zu können benötigt NABB Informationen über die Verbindungsqualität zu den Nachbarknoten.

Jede durch NABB versendete Mitteilung, egal ob Broadcast-Nachricht oder Nachbarschafts-Broadcasts, erhält für diesen Zweck eine hoch zählende Mitteilungsnummer (siehe Abschnitt 3.3), die mitübertragen wird. Der Empfänger kann anhand der Anzahl an empfangenen Übertragungen von einem Knoten und der übermittelten Mitteilungsnummer die Verbindungsqualität von ihm zu sich berechnen. Die so erhaltenen Verbindungsqualitäten werden dann wiederum durch Nachbarschafts-Broadcasts im Netzwerk propagiert.

Im Folgenden möchte ich die von mir implementierte Strategien vorstellen, die dem Umstand der verlustbehafteten Netzwerke mit Hilfe des Wissens um Verbindungsqualitäten innerhalb der 2-Hop-Nachbarschaft begegnen sollen.

4.2 Sendewiederholung

Eine einfache Lösung, die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, dass eine gesendete Broadcast-Nachricht bei den Empfängern ankommt, ist, diese Sendung zu wiederholen. Ein Beispiel: Bei einer Verbindungsqualität von 0,5 empfängt ein Nachbar bei 2 Sendungen wenigstens eine Sendung mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,75. Die Verbesserung der Empfangswahrscheinlichkeit zur Verbindungsqualität ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Zu erkennen ist, dass sich ab einer Verbindungsqualität von 0,8 ein einfaches Wiederholen der Sendung mit einer Empfangswahrscheinlichkeit von 0,96 eine relativ zuverlässige Datenübertragung realisieren lässt.

Die Menge der benötigten Sendewiederholungen F zum Erreichen einer Empfangswahrscheinlichkeit p_t kann berechnet werden durch: $|F_{A \rightarrow B}| \leq \frac{\ln(1-p_t)}{\ln(1-\frac{c}{A \rightarrow B})}$, wobei $\frac{c}{A \rightarrow B}$ die Verbindungsqualität ist.

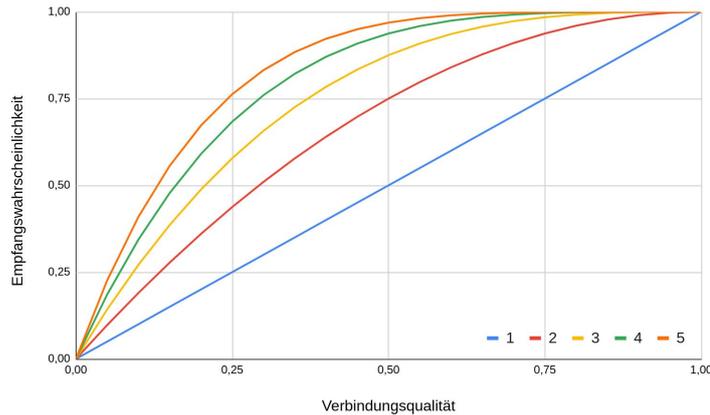


Abbildung 4.2: Empfangswahrscheinlichkeit einer Nachricht in Abhängigkeit der Verbindungsqualität bei verschiedenen Sendungswiederholungen

dungsqualität vom Knoten A zu Knoten B darstellt¹. Bei mehreren Zielen wird dasjenige zur Berechnung der Sendewiederholungen ausgesucht, bei dem die Verbindungsqualität am niedrigsten ist.

Die Anzahl der Sendewiederholungen kann, bei hoch gewählter Empfangswahrscheinlichkeit oder niedriger Verbindungsqualität, sehr groß werden. Bei einer gewünschten Empfangswahrscheinlichkeit von 0,98 und einer Verbindungsqualität von 0,5 werden bereits mehr als 5 Sendungen der Broadcast-Nachricht benötigt. Bei einer Verbindungsqualität von 0,3 schon mehr als 10! Deswegen kann die maximale Anzahl der Sendewiederholungen durch einen Parameter nach oben begrenzt werden.

Nachteile der Sendewiederholung sind erhöhter Energieverbrauch und Auslastung des Übertragungsmediums. Ersteres ist ungünstig in drahtlosen Netzwerken, bei denen Knoten batteriebetrieben sind. Letzteres steht dem Ziel des Protokolls, einen Broadcast Storm zu vermeiden, diametral gegenüber.

4.3 Nachbarschaftsschwelle

Dem weiter oben beschriebene Problem, dass NABB die Verbindungsqualität zwischen Knoten außer Acht lässt, soll mit der Nachbarschaftsschwelle begegnet werden. Hierbei wird ein Schwellwert für die Verbindungsqualität eingeführt, ab dem ein Nachbar als 1-Hop-Nachbar

¹ $c_{A \rightarrow B}$ sei die Verbindungsqualität von Knoten A zu Knoten B,

$|F_{A \rightarrow B}|$ ist die Anzahl der Nachrichten, die Knoten A zu Knoten B sendet.

Ereignis X sei, dass mindestens eine gesendete Nachricht vom Empfänger B empfangen wurde. Die Wahrscheinlichkeit $P(X)$ lässt sich einfacher berechnen über das Gegenereignis $P(\neg X)$.

$$P(\neg X) \leq (\neg c_{A \rightarrow B})^{|F_{A \rightarrow B}|}$$

$$\ln(P(\neg X)) \leq |F_{A \rightarrow B}| \cdot \ln(\neg c_{A \rightarrow B})$$

$$|F_{A \rightarrow B}| \leq \frac{\ln(P(\neg X))}{\ln(\neg c_{A \rightarrow B})}$$

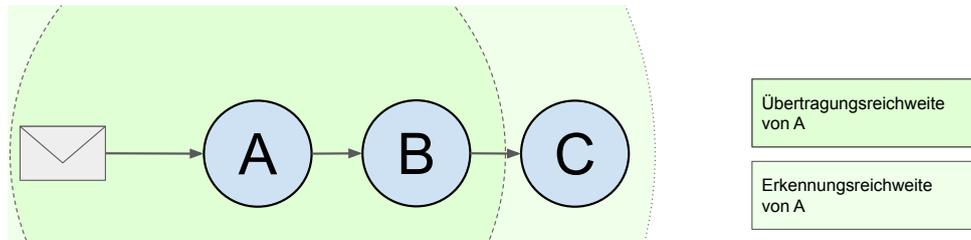


Abbildung 4.3: Durch die Nachbarschaftsschwelle kann B die Broadcast-Nachricht an C weiterleiten, da Knoten A C als nicht mehr in seiner unmittelbaren Nachbarschaft zählt

gewertet, also als innerhalb der Übertragungsbereichsweite gesehen wird.

Der Vorteil gegenüber der klassischen Nachbarschaftseinteilung lässt sich an der Beispieltopologie in Abbildung 4.3 zeigen. Knoten A erhält eine Broadcast-Nachricht und wiederholt die Nachricht, da es B als Ziel erkannt hat. Die Verbindungsqualität zwischen A und C ist nicht ausreichend dafür, das C als 1-Hop-Nachbar von A gewertet wird, obwohl C einen Teil der Broadcast-Nachrichten von A vollständig empfängt. B kann nun also C als Ziel anerkennen und die Broadcast-Nachricht für C weiterleiten. Unabhängig davon, ob C nun die Broadcast-Nachricht bereits von A erhalten hat oder nicht.

4.4 Flaschenhalserkennung

Die Flaschenhalserkennung ist eine Erweiterung der Nachbarschaftsschwelle. Es kann vorkommen, dass in drahtlosen Netzwerken ganze Teilnetze nur über einen Knoten verbunden sind. Zusätzlich können sich diese 'Flaschenhalsknoten' nur in der Erkennungsbereichsweite des Hauptnetzes befinden. Sie sind also mit einer schlechten Verbindungsqualität an das Hauptnetz angeschlossen. Es kann nun passieren, dass NABB (mit Nachbarschaftsschwelle) diesen Knoten nicht mehr als 1-Hop-Nachbar wahrnehmen. Diesem Umstand soll mit der Flaschenhalserkennung begegnet werden. Durch die Flaschenhalserkennung sendet NABB Broadcast-Nachrichten auch für Knoten mit schwacher Verbindungsqualität, wenn diese eine Engstelle im Netzwerk darstellen könnten. Dafür wird geprüft, ob der Sendeknoten der einzige Nachbar eines Knotens innerhalb der 2-Hop-Nachbarschaft ist. Wenn dem so ist und die Verbindungsqualität eine Erkennungsbereichsweite-Schwelle nicht unterschreitet, wird der Sendeknoten diesen Nachbarn als Ziel erkennen.

Haben mehrere Knoten einen Flaschenhalsknoten innerhalb der Erkennungsbereichsweite als Nachbarn und kein Knoten liegt innerhalb der Übertragungsbereichsweite, so leiten alle Nachbarn in Erkennungsbereichsweite die Broadcast-Nachricht für den Flaschenhalsknoten weiter.

4.5 Verbindungsqualitätsabhängiges Timeout

Wenn zwei Knoten dasselbe Ziel haben und einer von beiden eine wesentlich bessere Verbindungsqualität zum Ziel besitzt, dann wäre es von Vorteil, wenn dieser Knoten die Broadcast-Nachricht weiterleitet. Die Option des Verbindungsqualitätsabhängigen Timeout versucht dies zu erreichen, indem das Timeout zum Weiterleiten einer Broadcast-Nachricht in Abhän-

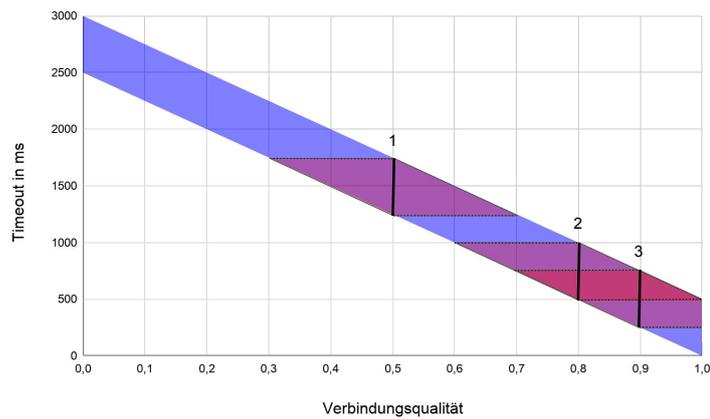


Abbildung 4.4: Verschiebung des Verbindungsqualitätsabhängigen Timeouts mit einem Verschiebungsfaktor = 5 und $\text{timeout}_{\text{span}} = 500\text{ms}$. Die Grafik zeigt den Bereich, in dem ein neu berechnetes Timeout liegen kann in Form eines Kanals in blau. Der Wert des Timeouts ist abhängig von der Verbindungsqualität und sein Minimal- und Maximalwert kann durch eine senkrechte Linie durch den Timeout-Kanal verdeutlicht werden. Die lila Rhomben strecken sich über Verbindungsqualitätsbereiche, bei denen sich der Wertebereich der möglichen neu berechneten Timeouts überschneiden.

Ein Beispiel: 3 Knoten konkurrieren um ein Ziel. Knoten 1 hat eine Verbindungsqualität von 0,5, Knoten 2 eine von 0,8 und Knoten 3 eine von 0,9 zum Ziel. Zu erkennen ist, dass Knoten 1 in jedem Fall nach Knoten 2 und 3 senden würde. Es lässt sich weiterhin feststellen, dass es wahrscheinlicher ist, dass Knoten 3 vor Knoten 2 sendet.

gigkeit zur Verbindungsqualität eines Knotens zu seinem Ziel gesetzt wird. Das bedeutet, wie in Abbildung 4.4 verdeutlicht, je niedriger die Verbindungsqualität, desto später ist das Timeout. Dies geschieht nur, sobald mindestens 2 Konkurrenten beteiligt sind. Das neue Timeout wird dann wie das Alte berechnet und in Abhängigkeit von der Verbindungsqualität nach hinten verschoben:

$$\text{timeout}_{\text{neu}} = \text{random}(0, \text{timeout}_{\text{span}}) + \text{timeout}_{\text{span}} * \text{Verschiebungsfaktor} * \left(1 - \frac{c}{A \rightarrow B}\right)$$

Der Verschiebefaktor gibt dabei den Grad der mittleren Verzögerung an. Je größer der Verschiebefaktor gewählt wird, desto unwahrscheinlicher werden zeitliche Überschneidungen der neu berechneten Timeouts für Konkurrenten mit nah beieinander liegenden Verbindungsqualitäten zum Zielknoten.

Hat ein Knoten mehrere Ziele und mindestens einen Konkurrenten zu einem Ziel, berechnet er sein Timeout anhand des Ziels, zu dem er die niedrigste Verbindungsqualität hat.

KAPITEL 5

Experiment-Design

In diesem Kapitel werden Aufbau und Ablauf der Experimente beschrieben. Es sollen insgesamt 94 verschiedene Parameterkombinationen auf bis zu 6 verschiedenen Netzwerk-Topologien getestet werden. Bei 30 Wiederholungen für jede Parameterkombination und Topologie werden insgesamt 9480 Einzelexperimente durchgeführt.

5.1 Ziel der Experimente

Die durchgeführten Experimente verfolgen zwei Ziele. Erstens soll die Praxistauglichkeit von NABB in einem realen Umfeld überprüft und mit Gossiping verglichen werden. Als zweites sollen die in Kapitel 4 vorgestellten Modifikationen auf ihre Wirkung hin getestet werden.

Dafür sollen von den Knoten des MIoT-Labs Broadcast-Nachrichten versendet und das Empfangen dieser Nachrichten innerhalb des Netzwerks gemessen werden. Die Nutzlast einer Broadcast-Nachricht besteht aus einem zufällig generierten 32-Bit Wert, was beispielsweise einem gemessenen Sensorwert entsprechen könnte.

5.2 Messgröße

Alle während eines Experiments gemessenen Parameter werden Messgrößen genannt. Diese umfassen:

- *empfangene Nachrichten* - von einem Knoten empfangene, einzigartige Broadcast-Nachrichten
- *weitergeleitete Nachrichten* - von einem Knoten weitergeleitete, einzigartige Broadcast-Nachrichten
- *gesendete Nachrichten* - von einem Knoten ursprünglich erstellte und gesendete, einzigartige Broadcast-Nachrichten
- *Gesamtnachrichtenzahl* - von einem Knoten ursprünglich erstellte und gesendete, sowie weitergeleitete Broadcast-Nachrichten, wobei eine einzigartige Nachricht auch

mehrfach gesendet oder weitergeleitet werden kann

- *Maximalempfangszahl* - Anzahl der *empfangene Nachrichten* bei idealisierten Fluten [3]. Berechenbar durch

$$\# \text{ Maximalempfangszahl} = (\# \text{ Knoten} - 1) \cdot \# \text{ gesendete Nachrichten} \quad (5.1)$$

- *Maximalnachrichtenzahl* - obere Grenze der bei einem Experiment zu erwartenden Gesamtnachrichtenzahl. Berechenbar durch

$$\# \text{ Maximalnachrichtenzahl} = \# \text{ Knoten} \cdot \# \text{ gesendete Nachrichten} \quad (5.2)$$

5.3 Metriken

Aus den erhaltenen Messwerten lassen sich verschiedene Metriken zur Evaluierung der Performance ableiten. Die ersten beiden Metriken wurden zur besseren Vergleichbarkeit aus der Masterarbeit zu NABB übernommen [2]. Diese umfassen:

- *Versorgung* - Anzahl der *empfangenen Nachrichten* gegenüber der *Maximalempfangszahl*, also der maximalen Anzahl möglicher erhaltener Broadcast-Nachrichten mit idealisiertem Fluten. Ein Wert von 1 bedeutet, dass alle Knoten im Netzwerk jede Broadcast-Nachricht empfangen haben, ein Wert von 0, dass kein Knoten im Netzwerk eine Broadcast-Nachricht empfangen hat.
- *Güte* - Anzahl der *weitergeleiteten Nachrichten*, gegenüber den *empfangenen Nachrichten*. Je niedriger der Wert, desto weniger Weiterleitungen wurden für jede empfangene Nachricht benötigt.
- *Aufwand* - *Gesamtnachrichtenzahl* gegenüber den *empfangenen Nachrichten*. Diese Metrik ist speziell für die Sendewiederholung interessant, da hier Broadcast-Nachrichten mehrfach gesendet und wiederholt werden können. Je kleiner der Wert, desto weniger Broadcast-Nachrichten mussten für jede erhaltene Broadcast-Nachricht gesendet werden.

5.4 Parameter und Faktoren

Alle veränderlichen Parameter, die das Ergebnis eines Experiments beeinflussen, sollen Faktoren genannt werden. Diese lassen sich nach Jain [8] in 2 Kategorien einteilen. Weiterhin gibt es externe Parameter, die nicht selbst beeinflusst werden können.

5.4.1 Primäre Faktoren

Primäre Faktoren sind alle Faktoren, deren vielversprechendsten Werte durch die folgenden Experimente gefunden werden sollen. Primäre Faktoren sind:

- Die getestete NABB-Variante (oder Gossiping) mit der dazugehörigen Servicequalität
- Eingestellte Sendewiederholung, mit den dazugehörigen Faktoren maximale Anzahl an Wiederholungen und die gewünschte Empfangswahrscheinlichkeit

- Eingestellte Nachbarschaftsschwelle und den dazugehörigen Schwellwert
- Eingestellte Flaschenhalserkennung und den dazugehörigen Schwellwert. (Die Flaschenhalserkennung ergibt nur mit eingestellter Nachbarschaftsschwelle Sinn.)
- Eingestelltes Verbindungsqualitätsabhängiges Timeout inklusive des dazugehörigen Verschiebefaktors

5.4.2 Sekundäre Faktoren

Sekundäre Faktoren beeinflussen die Performance, sie sollen aber nicht geprüft werden. Hierbei handelt es sich vor allem um Parameter der NABB-Implementierung.

- maximales Timeout bevor eine Broadcast-Nachricht weitergeleitet wird
- Menge der Nachbarschafts-Broadcasts nach dem Hochfahren eines Knotens
- Größe des Nachrichten-Ringspeichers
- die minimale Servicequalität von dNABB
- der Workload (beschrieben in Abschnitt 5.5)
- Experimentdauer, bei gleichem Workload steigt die Chance für Nachrichten-Kollisionen bei kürzerer Experimentdauer
- (teilweise) die Verbindungsqualität der Knoten untereinander und die Netzwerktopologie, über die eingestellte Sendestärke der Transceiver.
- das genutzte Frequenzband des Transceiver (2,4 GHz)

5.4.3 Externe Variablen

- (teilweise) die Verbindungsqualität der Knoten untereinander und die Netzwerktopologie, durch die Auslastung des Übertragungsmediums zum Experimentierzeitpunkt oder Veränderungen der physischen Beschaffenheit der Umgebung der Testbeds

5.5 Experimentablauf

Jedes Experiment wird nach einem ähnlichen zeitlichen Schema durchgeführt und 30 mal wiederholt.

- *Orientierungsphase* - Nach dem Hochfahren der Knoten werden innerhalb einer Sekunde 10 Nachbarschafts-Broadcasts versendet. So soll die Einschwingphase der Experimente verkürzt werden, da die Verbindungsqualitäten zwischen den Knoten zu einem gewissen Maße schon bekannt sind. Darauf hin wird eine Sekunde gewartet, dass auch alle Nachbarschafts-Broadcasts empfangen, bearbeitet und gegebenenfalls beantwortet wurden.
- *Experimentphase* - In der folgenden Phase werden (wenn nicht anders beschrieben) von allen Knoten zufallsgenerierte 32-Bit Broadcast-Nachrichten versendet. Die erste Broadcast-Nachricht wird dabei gleich verteilt innerhalb der ersten zwei Sekunden

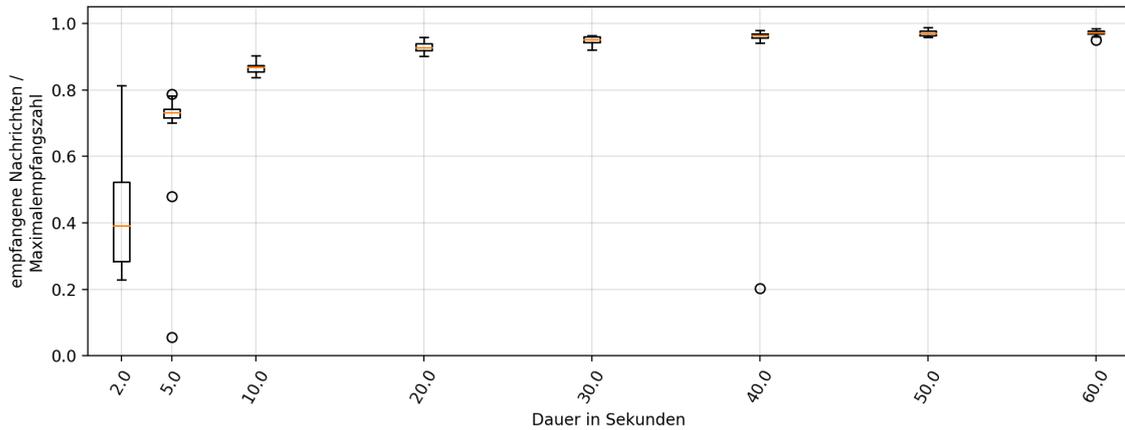


Abbildung 5.1: Vorexperiment mit 2 Knoten zur Bestimmung einer geeigneten Dauer der Experimentierphase. Es wurden jeweils ungefähr 500 Broadcast-Nachrichten in verschiedenen langen Zeitspannen versendet. Die Y-Achse zeigt das Verhältnis von empfangenen Nachrichten zu gesendeten Nachrichten und spiegelt damit die Verbindungsqualität zwischen den zwei Knoten. Zu erkennen ist, je länger die Zeitspanne dauert, desto besser wird die Verbindungsqualität. Zwei Ursachen dafür lassen sich feststellen: Erstens sind bei einer hohen Sendedichte Kollisionen bei der Nachrichtenübertragung wahrscheinlicher und zweitens frieren bei hoher Auslastung gehäuft einzelne Knoten ein.

gesendet. Die folgenden Broadcast-Nachrichten sollen exponentiell verteilt gesendet werden, wobei der Erwartungswert in Abhängigkeit der Anzahl am Experiment beteiligter Knoten gewählt wird und pro Experiment ungefähr 500 Broadcast-Nachrichten abgeschickt werden. Die Gesamtdauer der Experimentphase wird von der Anzahl der Knoten abhängig gemacht.

Gossiping mit einer Servicequalität von 0 entspricht Fluten. Bei 500 gesendeten Broadcast-Nachrichten und 2 Knoten werden also bis zu 1000 Nachrichten, bei 8 Knoten bis zu 4000 Nachrichten gesendet oder weitergeleitet (*Maximalnachrichtenzahl*, siehe Formel 5.2).

In Abbildung 5.1 ist die Verbindungsqualität zwischen zwei Knoten in Abhängigkeit zur Experimentdauer dargestellt, in der 500 Broadcast-Nachrichten geflutet wurden. Zu erkennen ist, dass sich die Verbindungsqualität bei sehr kurzen Zeitspannen stark absenkt. Je länger der Versuch läuft, desto besser ist die Verbindung. Aus dieser Beobachtung heraus und in Verbindung mit der steigenden *Maximalnachrichtenzahl* in Abhängigkeit der Knotenzahl, wird die Dauer der Experimentphase auf 10 Sekunden mal der Knotenzahl festgelegt. (Eine Ausnahme bildet hier die 2-Knoten-Topologie, sie wurde mit einer 10 Sekunden langen Experimentphase durchgeführt.)

- *Ausklingphase* - Nach der Experimentierphase schließt sich eine zwei Sekunden lange Ausklingphase an, bei der keine neuen Broadcast-Nachrichten gesendet werden. Nachrichten die schon im Netzwerk sind können in dieser Zeit jedoch noch weiter propagiert werden.
- *Auswertungsphase* - Zuletzt wird von jedem Knoten das Experiment-Ergebnis abge-

fragt.

5.6 Netzwerk-Topologie

Die verschiedenen Faktoren sollen auf verschiedenen Netzwerk-Topologien getestet werden, die möglichen Topologien unterliegen jedoch den praktischen Gegebenheiten des MIoT-Labs. Eine beispielhafte Momentaufnahme des möglichen Netzwerks mit normaler Sendeleistung der Transceiver ist in Abbildung A.2 gegeben. Die hier vorgestellten Topologien sind die tatsächlich in den Experimenten vorkommenden Topologien. Geplant wurde mit leicht abweichenden Topologien, doch die Verbindungsqualitäten zwischen den Knoten im Testbed erwiesen sich als sehr dynamisch und waren schwer vorherzusagen, wodurch es zu Abweichungen zwischen den geplanten und den tatsächlichen Topologien kam.

Für den Vergleich von sNABB, dNABB und Gossiping sollen diese auf folgenden Topologien getestet werden:

- zwei benachbarte Knoten
- drei Knoten in einer Reihe
- vier Knoten, die ein Viereck bilden, wobei zwei gegenüberliegende Knoten zusätzlich verbunden sind
- fünf Knoten zum Herausstellen spezieller dNABB Eigenschaften
- Alle Knoten mit 0 dBm Sendeleistung
- Alle Knoten mit -10 dBm Sendeleistung

Zur Evaluierung der jeweiligen Modifikationen sollen diese auf dem gesamten Netzwerk getestet werden und die Ergebnisse mit den unmodifizierten Ergebnissen verglichen werden. Des weiteren soll für jede Modifikation noch eine oben beschriebene Topologie getestet werden, bei der ihre Stärken zum Ausdruck kommen sollten:

- Nachbarschaftsschwelle: 5 Knoten
- Flaschenhalserkennung: Für die Flaschenhalserkennung ließ sich im MIoT-Lab keine geeignete gesonderte Topologie erzeugen, weswegen hier nur eine 8-Knoten-Topologie getestet wurde
- Verbindungsqualitätsabhängiges Timeout: 4 Knoten
- Sendewiederholung: 3 Knoten in einer Reihe

5.7 Experiment Design

Die minimale Servicequalität von dNABB liegt in allen Experimenten, wie auch in den Simulationen der dieser Arbeit zugrundeliegenden Arbeit [2] bei 0.

Für den Vergleich der NABB-Varianten mit Gossiping sollen diese jeweils mit einer Servicequalität von 0; 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3 und 0,5 auf den genannten Topologien durchgeführt werden.

Die Experimente mit Modifikationen werden alle mit einer Servicequalität von 0,1 durch-

geführt.

Für die Modifikation Sendewiederholung soll die maximale Anzahl an Wiederholungen auf 4 begrenzt werden und die Empfangswahrscheinlichkeit auf 0; 0,5; 0,7; 0,8; 0,9; 0,95 und 0,99 gesetzt werden.

Der Schwellwert der Nachbarschaftsschwelle soll auf 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 und 1 gesetzt werden.

Der Schwellwert für die Flaschenhalserkennung soll auf 0; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 und 0,8 gesetzt werden. Wobei der dazugehörige Wert der Nachbarschaftsschwelle bei 0,8 liegen soll.

Für das Verbindungsqualitätsabhängige Timeout soll der Verschiebefaktor bei 0, 1, 2, 3, 4, 6 und 8 liegen.

KAPITEL 6

Ergebnis

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der verschiedenen Experimente vorgestellt. Die Verbindungsqualität der Knoten schwankt zwischen und während der Experimente teilweise stark (z.B. das Gossiping Experiment in Abschnitt 6.2.1). Deswegen sind bei einigen Experimenten Beispiel-Topologien abgebildet, die eine ungefähre Vorstellung der Verbindungsqualitäten während des Experiments geben können. Bei den angegebenen Verbindungsqualitäten handelt es sich aber immer um Momentaufnahmen und keine Durchschnittswerte.

Durch die schwer vorhersehbaren Verbindungsqualitäten wurden die Ergebnisse mancher Experimente uninteressant, diese befinden sich im Anhang.

6.1 Experimente mit kleinen Topologien

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Experimente mit weniger als acht beteiligten Knoten evaluiert werden.

6.1.1 2-Knoten-Topologie

In Abbildung 6.1 ist die Topologie beispielhaft abgebildet. Es gibt einen Sendeknoten und einen Empfängerknoten. Im Idealfall wird die Broadcast-Nachricht vom Empfängerknoten empfangen und nichts weiter geschieht. Die Menge gesendeter und empfangener Broadcast-Nachrichten sollte idealerweise also gleich sein.

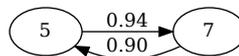


Abbildung 6.1: 2 Knoten Topologie, Momentaufnahme mit an den Kanten annotierten Verbindungsqualitäten

Gossiping

Die Ergebnisse des Gossiping-Experimentes sind in Abbildung 6.2 gegeben.

Die Versorgung liegt bei Gossiping bei ungefähr 0,88. Es ist ein sehr leichter Aufwärtstrend bei zunehmender Servicequalität zu erkennen. So liegt der Median der Versorgung bei einer Servicequalität von 0 bei 0,867 und bei 0,5 bei 0,891. Eine Ursache dafür könnte die verringerte Anzahl an Kollisionen sein, da die *Gesamtnachrichtenzahl* des Experiments bei zunehmender Servicequalität sinkt. (Die Gesamtnachrichtenzahl bei einer Servicequalität von 0,5 beträgt nur ein dreiviertel der Gesamtnachrichtenzahl bei einer Servicequalität von 0,0) Gossiping entscheidet sich öfter gegen das Weiterleiten einer Broadcast-Nachricht, wie im Gütediagramm abzulesen ist. Diese sinkt im gleichen Maße wie die Servicequalität zunimmt. Auch wenn das Netzwerk nur aus zwei Knoten besteht, wiederholt der Empfängerknoten die Broadcast-Nachricht mit Gossiping gegebenenfalls. Der Aufwand liegt bei niedrigen Servicequalitäten knapp über und um 2 und sinkt kontinuierlich bis auf 1,62 bei 0,5 Servicequalität. Das liegt ebenfalls daran, dass der Empfängerknoten die Broadcast-Nachricht weiterleitet, obwohl es keinen anderen Knoten gibt, der dies notwendig machen würde.

sNABB

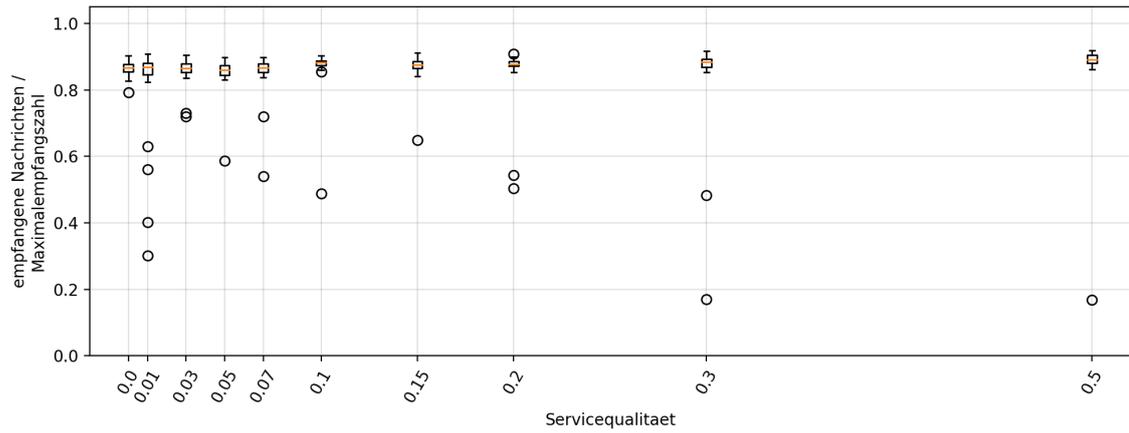
Die Ergebnisse des sNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.3 gegeben.

Die Versorgung liegt durchgehend auf einer Ebene von ungefähr 0,92 und ist damit etwas günstiger als bei Gossiping. Vermutlich kommt es zu weniger Kollisionen, da sNABB erkennt, dass keine weiteren Knoten zu versorgen sind, und der Empfängerknoten die Broadcast-Nachrichten nicht weiterleitet (Güte von 0). Die *Gesamtnachrichtenzahl* ist gegenüber Gossiping um 33 - 50 % geringer. Die Güte liegt konstant bei 0. Das liegt ebenfalls an den vermiedenen Weiterleitungen durch sNABB. Der Aufwand liegt knapp über 1, was wiederum durch Nachrichtenverluste und Kollisionen zu erklären ist.

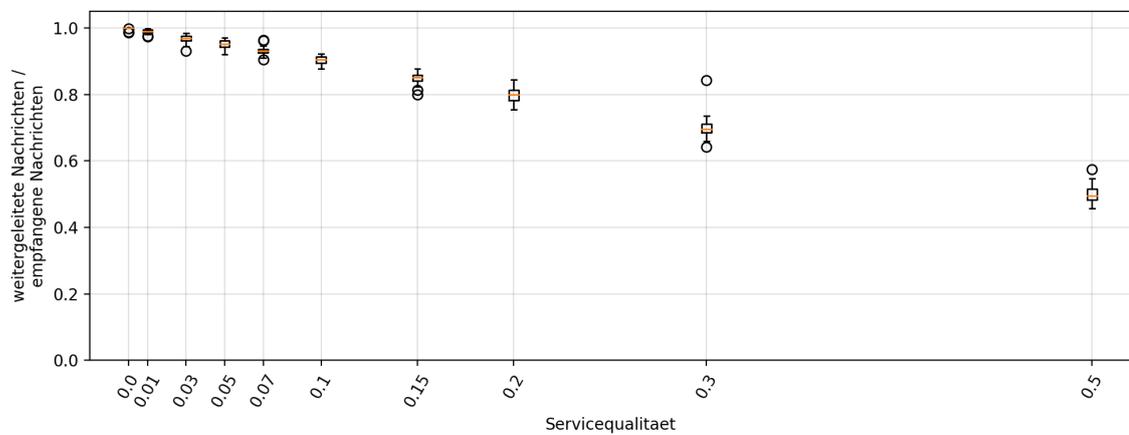
dNABB

Die Ergebnisse des dNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.4 gegeben.

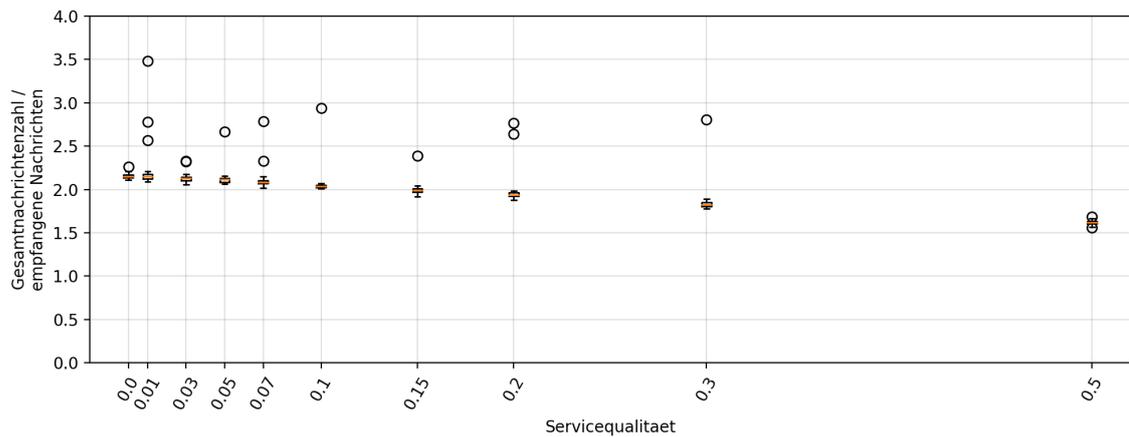
Da es zwischen dNABB und sNABB keine relevanten Unterschiede in einer 2-Knoten-Topologie gibt, sind die Ergebnisse von dNABB mit denen von sNABB identisch.



a) Versorgung

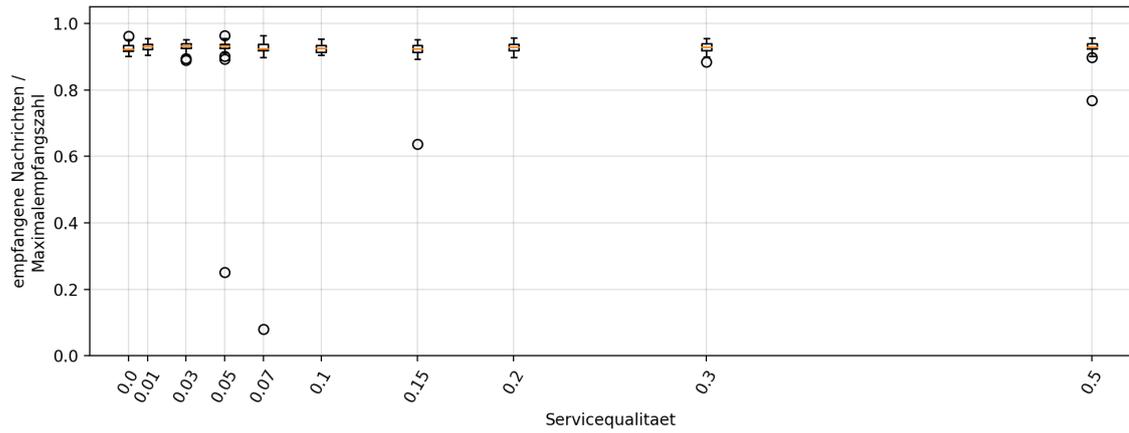


b) Güte

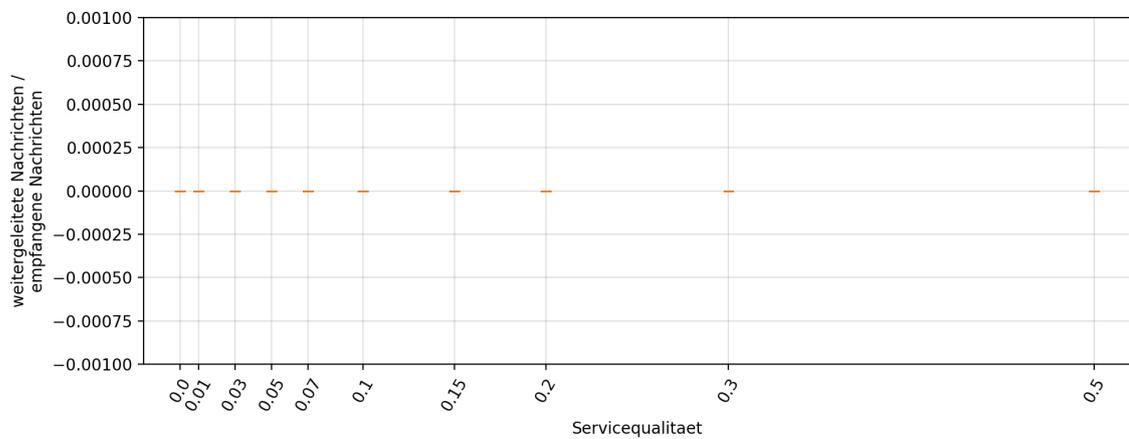


c) Aufwand

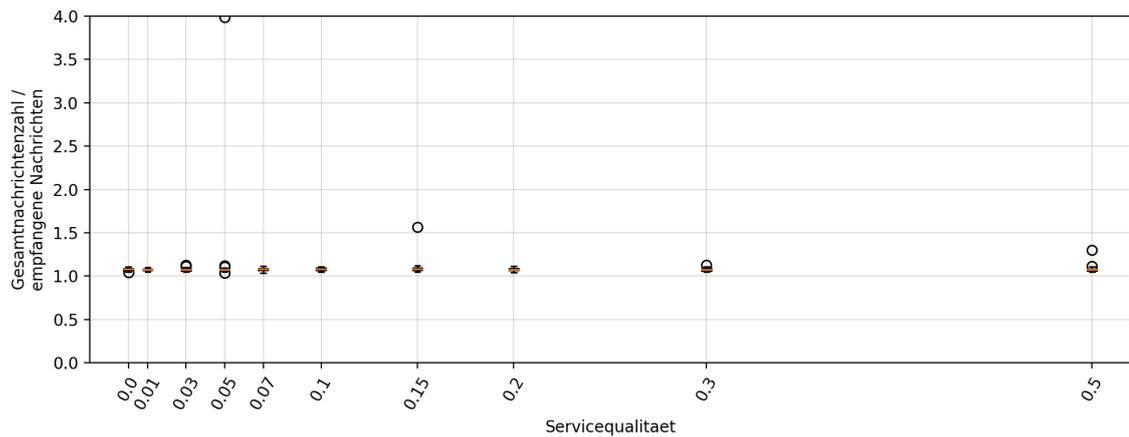
Abbildung 6.2: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = Gossiping, Topologie = 2 Knoten



a) Versorgung

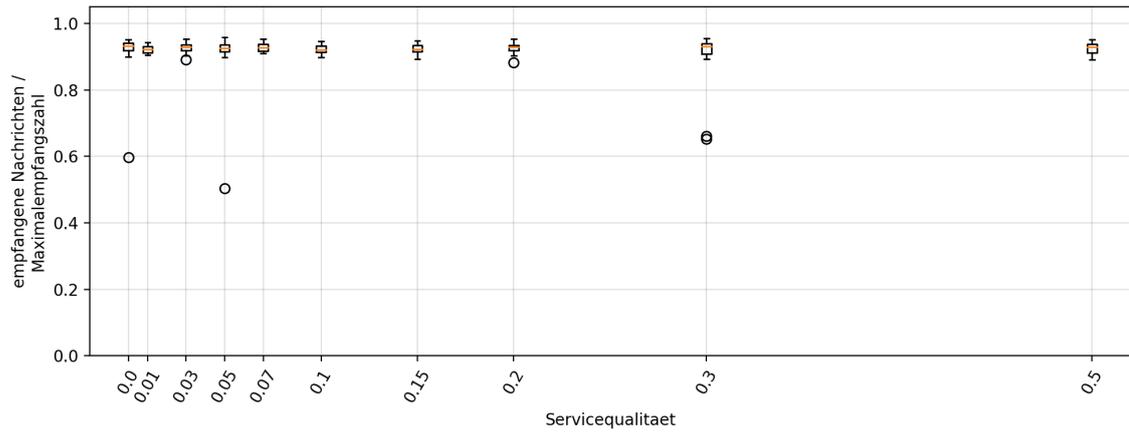


b) Güte

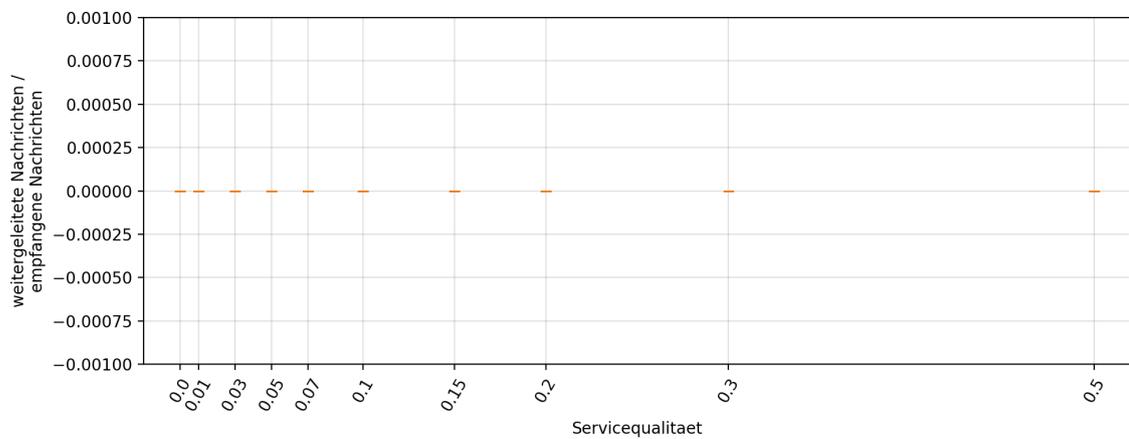


c) Aufwand

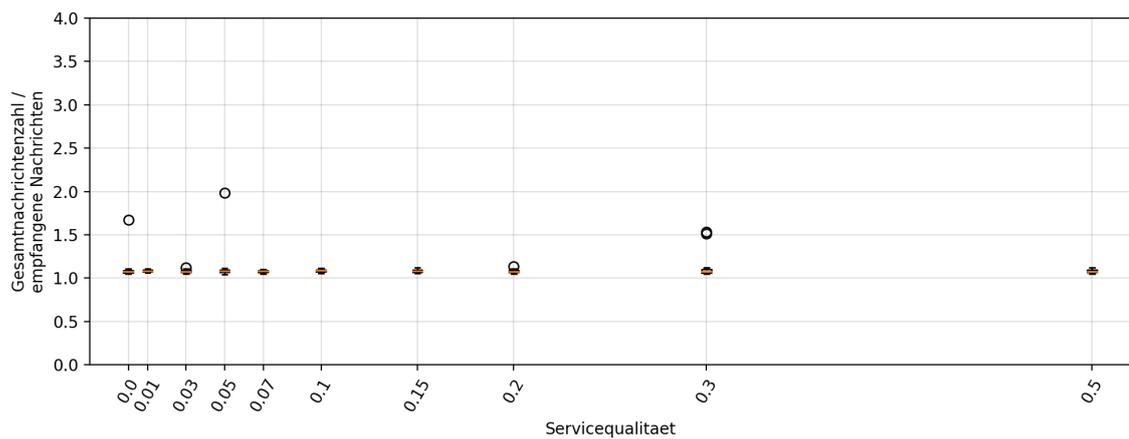
Abbildung 6.3: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 2 Knoten



a) Versorgung



b) Güte



c) Aufwand

Abbildung 6.4: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 2 Knoten

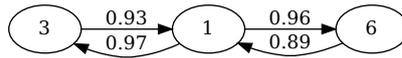


Abbildung 6.5: 3-Knoten-Topologie, Momentaufnahme mit an den Kanten annotierten Verbindungsqualitäten

Tabelle 6.1: Berechnung der Werte für Versorgung, Güte und Aufwand für Linien-Topologien bei idealer Verbindungsqualität, wobei S = Servicequalität und n = Anzahl der Knoten

Protokoll	Versorgung	Güte	Aufwand
Gossiping	$\frac{\sum_{i=0}^{n-2} (1-S)^i}{n-1}$	$1 - S$	$\frac{\sum_{i=0}^{n-1} (1-S)^i}{\sum_{i=0}^{n-2} (1-S)^i}$
sNABB	Wie Gossiping	$\frac{\sum_{i=1}^{n-2} (1-S)^i}{\sum_{i=0}^{n-2} (1-S)^i}$	$\frac{\sum_{i=0}^{n-2} (1-S)^i}{\sum_{i=0}^{n-2} (1-S)^i} = 1$
dNABB	1	$\frac{n-2}{n-1}$	1

Tabelle 6.2: Erwartete Werte für Versorgung, Güte und Aufwand für Gossiping/sNABB/dNABB nach den Berechnungsformeln aus Tabelle 6.1 mit $n = 3$

Servicequalität	Versorgung	Güte	Aufwand
0	1 / 1 / 1	1 / 0,5 / 0,5	1,5 / 1 / 1
0,1	0,95 / 0,95 / 1	0,9 / 0,47 / 0,5	1,43 / 1 / 1
0,5	0,75 / 0,75 / 1	0,5 / 0,33 / 0,5	1,167 / 1 / 1

6.1.2 3-Knoten-Topologie

Die 3-Knoten-Topologie ist in Abbildung 6.5 gegeben. Es senden immer nur die äußeren Knoten und der Mittelknoten dient als Verbindung zwischen den äußeren Knoten. Idealerweise wird hier jede gesendete Broadcast-Nachricht genau einmal weitergeleitet und zweimal empfangen.

Das Verhalten der einzelnen Protokolle im Idealfall, also ohne Paketverluste, lässt sich für diese Topologie gut berechnen. Die Formeln hierfür sind in Tabelle 6.1 gegeben und die Ergebnisse für drei beispielhafte Servicequalitäten in Tabelle 6.2 angegeben.

Gossiping

Die Ergebnisse des Gossiping-Experimentes sind in Abbildung 6.6 gegeben.

Der Median der Versorgung durch Gossiping liegt, in Abhängigkeit der Servicequalität, zwischen 0,836 und 0,665 und erwartungsgemäß unter den ideal erwarteten Werten. Die

Verbindungsqualität leidet an Kollisionen.¹ Einige Ausreißer sind wahrscheinlich durch den Ausfall von Knoten entstanden.

Im Gegensatz zur 2-Knoten-Topologie sinkt die Versorgung bei steigender Servicequalität. Während der Empfängerknoten die Broadcast-Nachricht in der 2-Knoten-Topologie umsonst wiederholt und so für Kollisionen sorgt, ist die Wiederholung hier jedoch nötig, um den äußeren Knoten zu versorgen. (Die dann folgende Wiederholung der Nachricht durch den äußeren Knoten ist wiederum unnötig.)

Die Güte verhält sich wie bei der 2-Knoten-Topologie. Sie wird bei jedem Experiment mit Gossiping so wie hier aussehen, da die Servicequalität bei Gossiping direkt die Weiterleitungswahrscheinlichkeit empfangener Broadcast-Nachrichten angibt.

Der Aufwand liegt leicht über den Idealwerten aus Tabelle 6.2. Diese Erhöhung liegt ebenfalls an den nicht-idealen Verbindungsqualitäten.

sNABB

Die Ergebnisse des sNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.7 gegeben.

Bei der 2-Knoten-Topologie lagen die Versorgungswerte noch auf einer Ebene, da sich immer gegen das Weiterleiten entschieden wurde. Bei der 3-Knoten-Topologie wird der Faktor der Servicequalität deutlich. Denn sie gibt (solange keine Wettstreiter vorhanden sind) die Nicht-Weiterleitungswahrscheinlichkeit an. Der mittlere Knoten leitet also bei einer Servicequalität von 0 jede und bei 0,5 nur jede zweite Broadcast-Nachricht weiter. Dadurch fällt die Versorgung bei steigender Servicequalität stetig ab.

Die Versorgung bei sNABB ist besser als bei Gossiping. Durch insgesamt weniger gesendete Broadcast-Nachrichten konnte eine höhere Verbindungsqualität gehalten werden. Weil sNABB an dem äußeren Empfängerknoten nicht weiterleitet liegen, die Gütewerte deutlich unter denen von Gossiping.

dNABB

Die Ergebnisse des dNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.8 gegeben.

Die Ergebnisse der dynamischen NABB Variante über alle Servicequalitäten gleichen denen der simplen Variante mit einer Servicequalität von 0. Das liegt an der internen dynamischen Berechnung der Servicequalität von dNABB. Da es keinerlei Wettstreiter gibt, verbleibt die interne Servicequalität bei 0.

¹Der relative Einfluss der Kollisionen auf die Verbindungsqualität zwischen zwei Experimenten kann mit folgender Berechnung abgeschätzt werden:

K = Einfluss von Kollisionen

A_s = Relative Abweichung vom Idealwert bei einer bestimmten Servicequalität

$V_{\{real,ideal\},s}$ = Median der Versorgung, im Experiment oder als Idealwert aus Tabelle 6.2

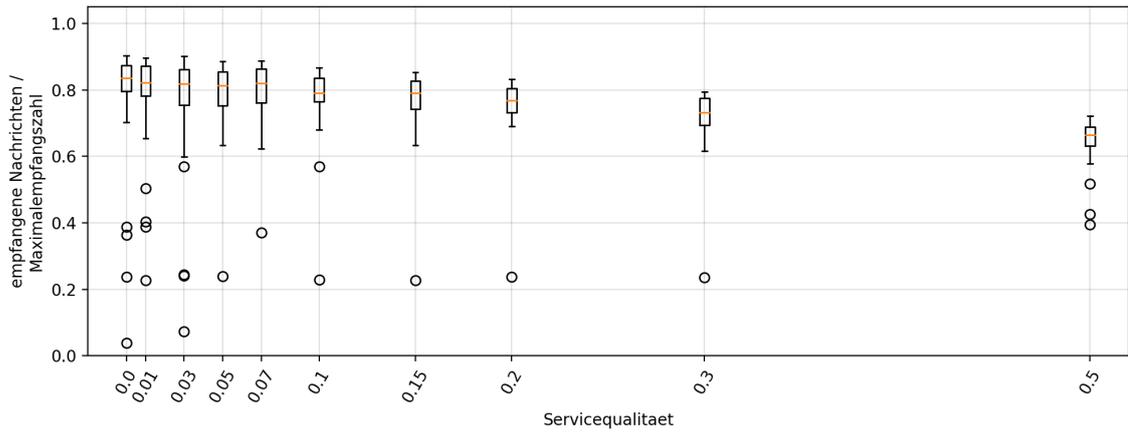
$$A_s = \frac{V_{real,s}}{V_{ideal,s}}$$

$$K = |A_{s_1} - A_{s_2}|$$

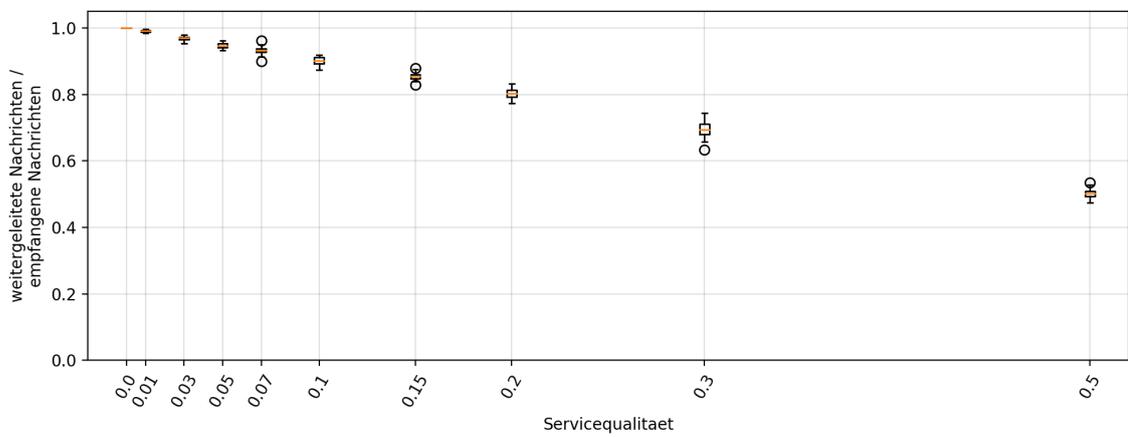
$$K = |A_{0.5} - A_{0.0}| = \left| \frac{0,665}{0,75} - \frac{0,836}{1} \right| = |0,887 - 0,836| = 0,051$$

Nach dieser Berechnung wäre die Verbindungsqualität bei einer Servicequalität von 0,0 um 5,1 % besser, wenn die *Gesamtnachrichtenzahl* bei beiden Experimenten dieselbe wäre.

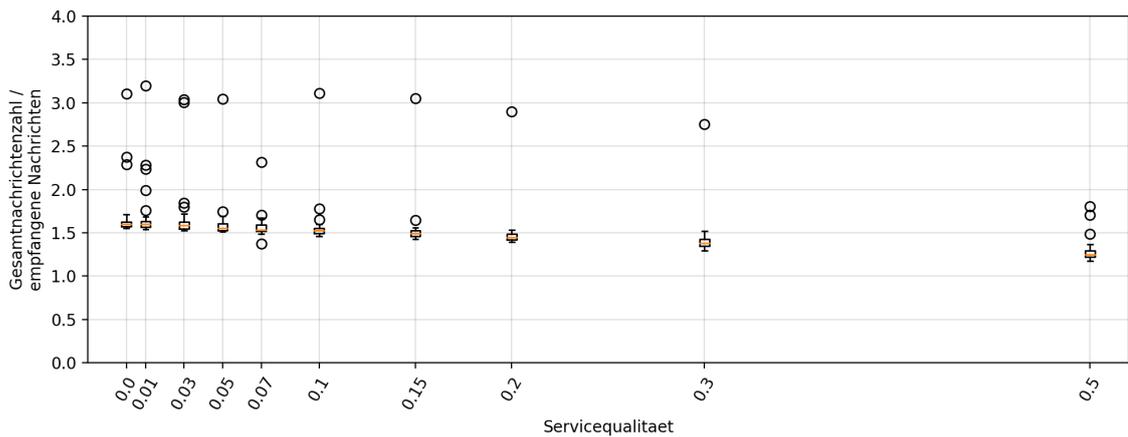
Der Gütewert liegt konstant knapp über 0,5. Es leitet immer ein Knoten weiter und zwei empfangen die Broadcast-Nachricht. Analog liegt der Aufwand knapp über 1.



a) Versorgung

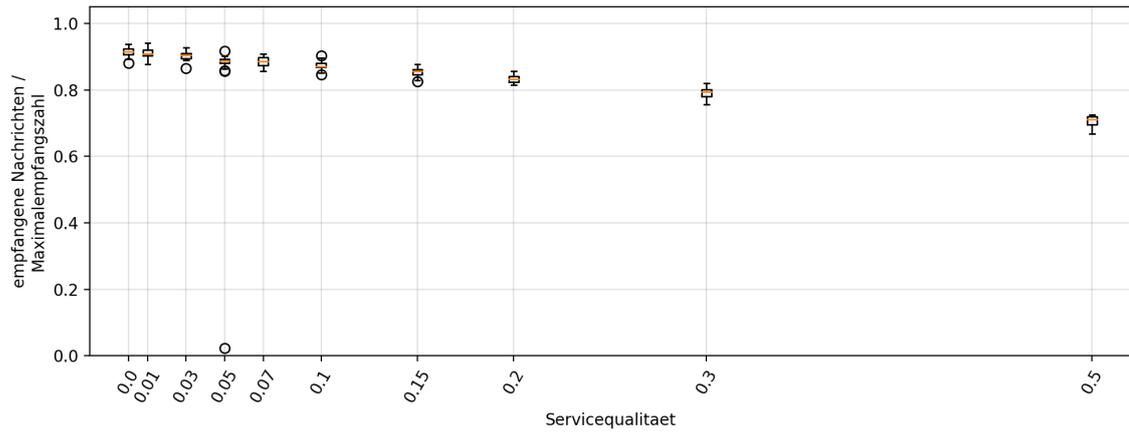


b) Güte

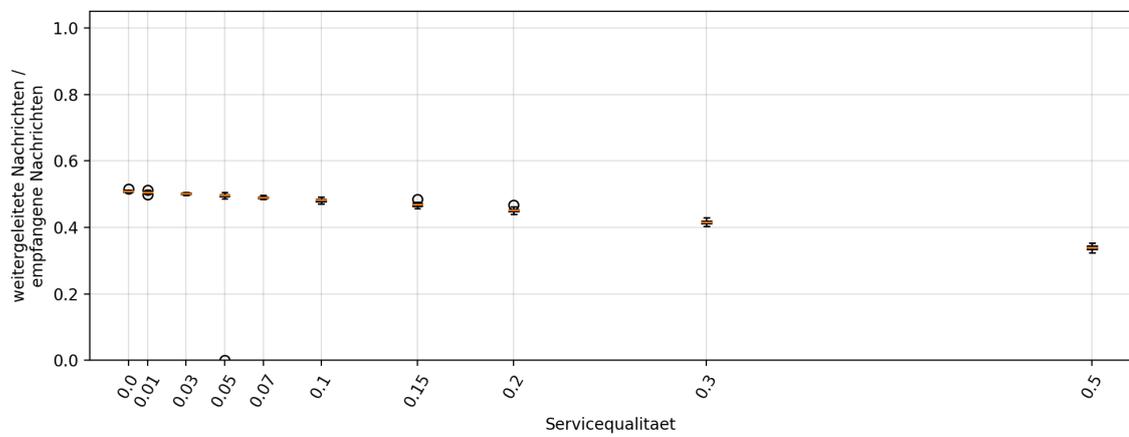


c) Aufwand

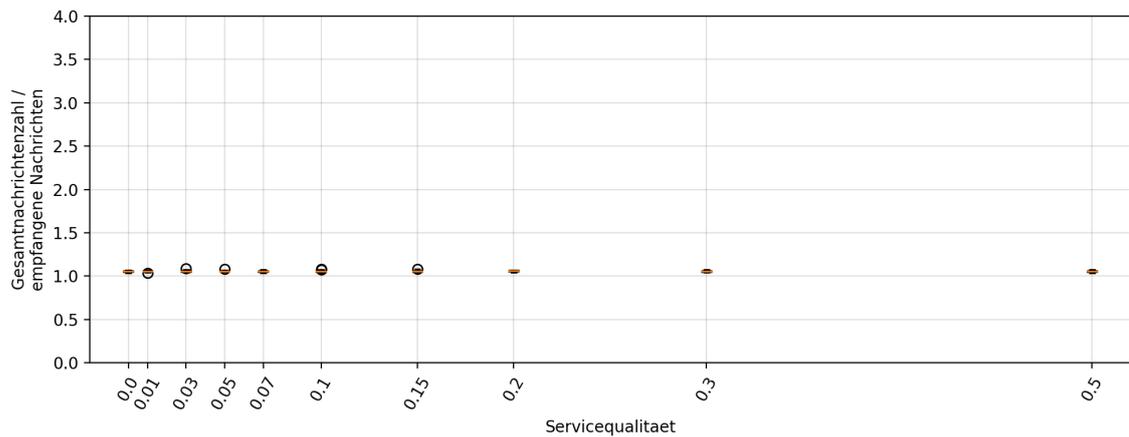
Abbildung 6.6: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = Gossiping, Topologie = 3 Knoten



a) Versorgung

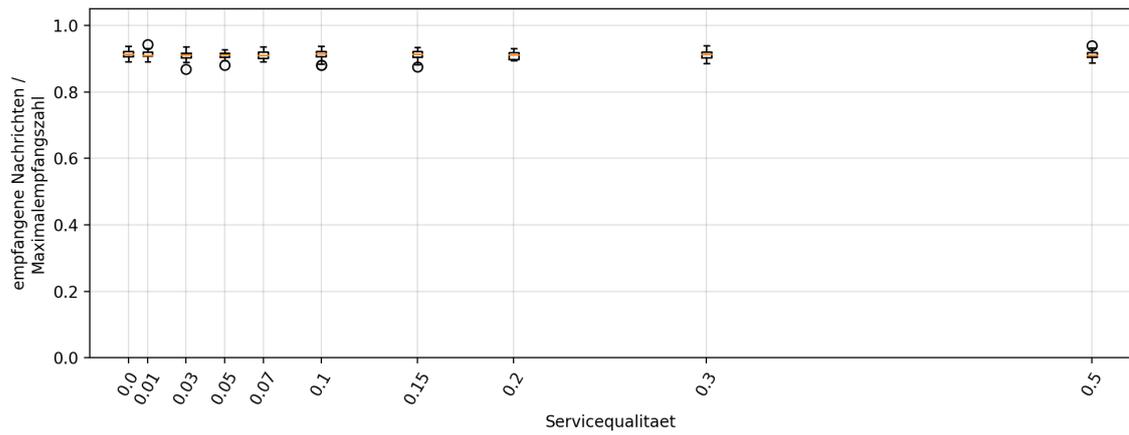


b) Güte

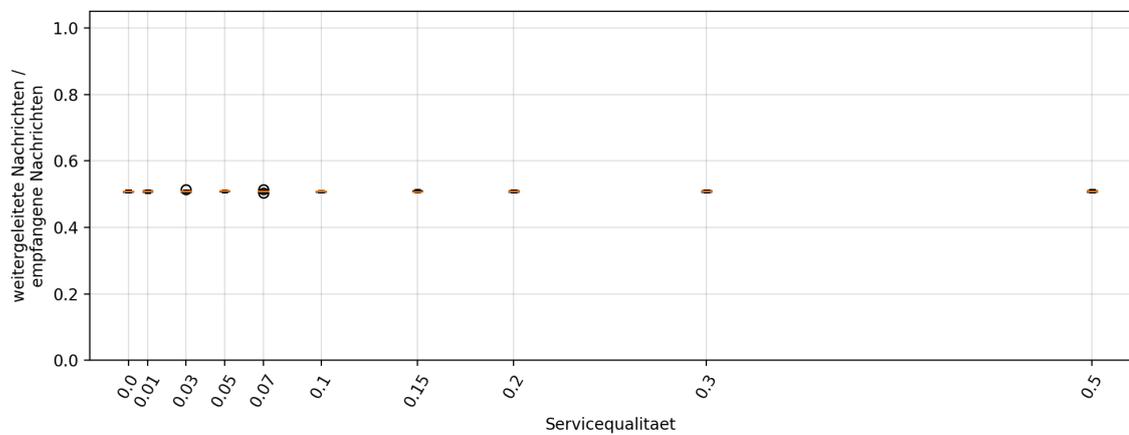


c) Aufwand

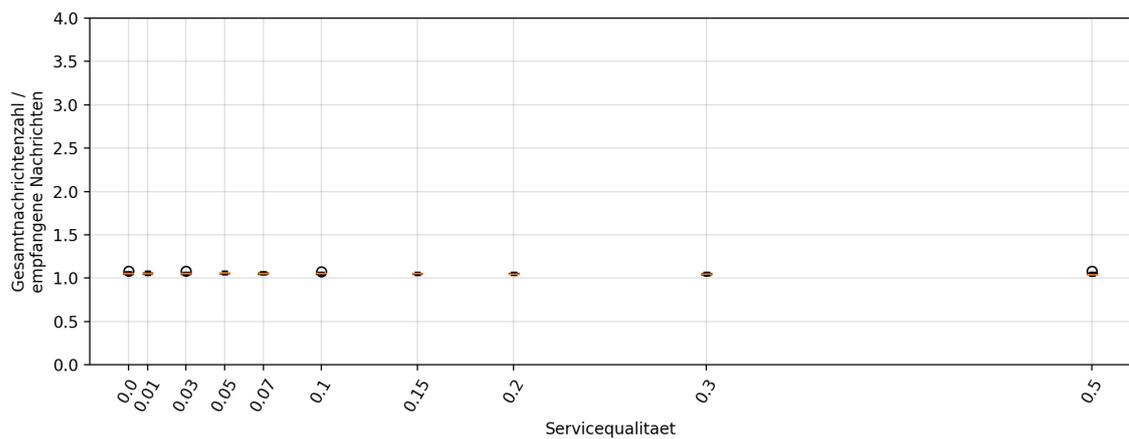
Abbildung 6.7: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 3 Knoten



a) Versorgung



b) Güte



c) Aufwand

Abbildung 6.8: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 3 Knoten

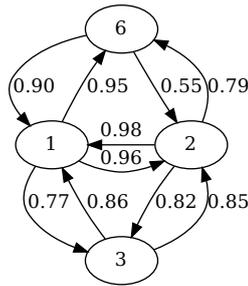


Abbildung 6.9: 4-Knoten-Topologie, Momentaufnahme mit an den Kanten annotierten Verbindungsqualitäten

6.1.3 4-Knoten-Topologie

Die 4-Knoten Topologie (Abbildung 6.9) gleicht der 3-Knoten-Topologie, nur dass es nun zwei statt einem Mittelknoten gibt. Im Idealfall sendet also wieder einer der äußeren Knoten eine Broadcast-Nachricht und ein Mittelknoten leitet sie an den anderen äußeren Knoten weiter. So kann mit einer Wiederholung jeder Knoten versorgt werden. Die Verbindungsqualität zwischen Knoten 1 und 2 liegt im Beispiel im Mittel bei 0,97. Deswegen kann es bei beiden NABB Varianten vorkommen, dass beide Mittelknoten in ca. 3 % der Fälle die Broadcast-Nachricht weiterleiten.

Gossiping

Die Ergebnisse des Gossiping-Experimentes sind in Abbildung 6.10 gegeben.

Die Versorgung mit Gossiping in der 4-Knoten-Topologie ist mit der Versorgung der 3-Knoten-Topologie vergleichbar. Der einzige Unterschied ist, dass die Versorgung bei der 4-Knoten-Topologie bei sinkender Servicequalität weniger stark abfällt. So liegen die Mediane für beide Topologien bei einer Servicequalität von 0,5 bei 0,776 beziehungsweise 0,664. Im ersten Fall wird eine Broadcast-Nachricht von mindestens einem Mittelknoten mit einer Wahrscheinlichkeit von 75 % wiederholt, im Gegensatz von nur 50 % bei nur einem Mittelknoten.

Im Gegensatz zur 3-Knoten-Topologie ist der Aufwand niedriger. Das ist zu erwarten, da im Idealfall für jede neue Broadcast-Nachricht 3 Empfänger 4 Sendungen gegenüberstehen, der Erwartungswert also bei 1,333 liegt. Bei der 3-Knoten-Topologie liegt dieser bei 1,5 (3 Sender, 2 Empfänger).

sNABB

Die Ergebnisse des sNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.11 gegeben.

Die Höhen der Boxen sind ungewöhnlich groß, die Versorgung etwas niedriger als erwartet. Die Versorgung sollte bei einer Servicequalität von 0 der von dNABB entsprechen. Eventuell kam es während des Experiments zu einer Störung des Netzwerkes, wodurch die Verbindungsqualität insgesamt abnahm.

Die Versorgung ist mit der 3-Knoten-Topologie vergleichbar. Die Weiterleitungswahrscheinlichkeit der beiden Mittelknoten zusammengenommen ist dieselbe, wie die des Mittelknotens der 3-Knoten-Topologie.

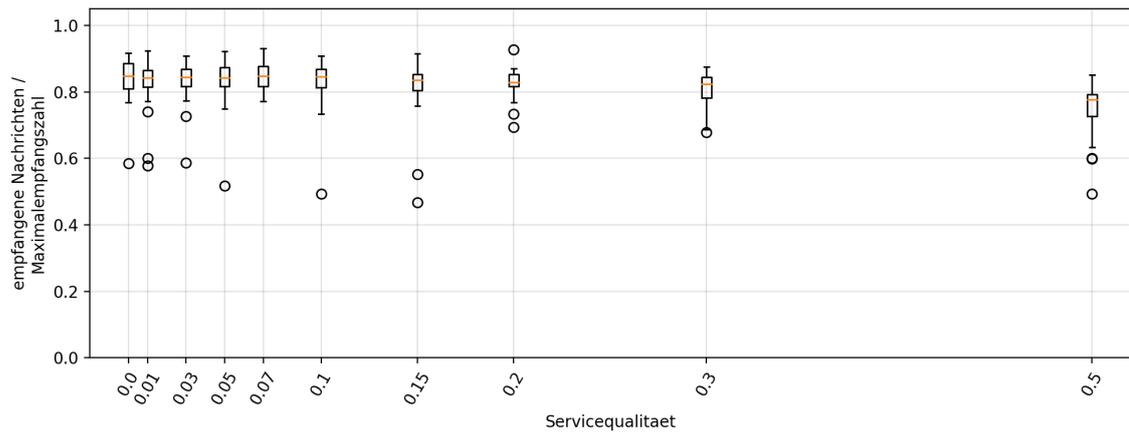
Im Gegensatz zu Gossiping ist die Versorgung bei einer Servicequalität von 0 etwas besser, die Ergebnisse kreuzen aber die von Gossiping und bei einer Servicequalität von 0.5 ist sNABB etwas schwächer. Das liegt an der erhöhten Weiterleitungswahrscheinlichkeit für mindestens einen Knoten bei Gossiping von 0,75 im Gegensatz zu 0,5 bei sNABB. Je nach der Ursache für eine schwache Verbindungsqualität (Kollisionen oder Signalreichweite), kann es auch von Vorteil sein, wenn beide Mittelknoten eine Broadcast-Nachricht wiederholen.

Die Güte ist noch geringer als bei der 3-Knoten-Topologie, da eine Weiterleitung reicht, um alle 3 Knoten mit einer Broadcast-Nachricht zu versorgen (statt 2 Weiterleitungen in der 3-Knoten-Topologie). Weiterhin ist liegt die Güte deutlich unter der von Gossiping, da sNABB redundante Weiterleitungen einspart.

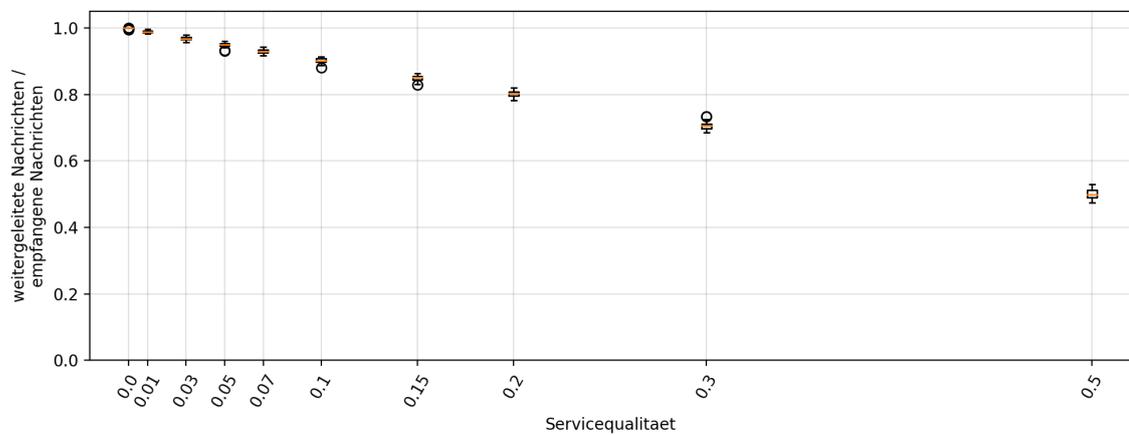
dNABB

Die Ergebnisse des dNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.12 gegeben.

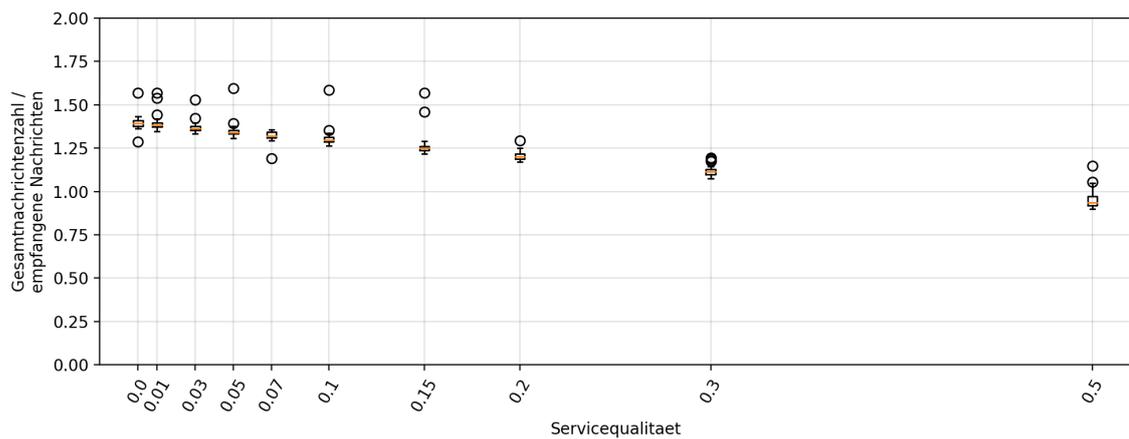
Die Ergebnisse für Versorgung, Güte und Aufwand liegen wieder, unabhängig von der Servicequalität, auf einer Ebene. Die Boxhöhe ist hier wesentlich kleiner als bei Gossiping und vor allem sNABB: die Bedingungen im Netzwerk schienen während des Experiments konstanter zu sein. Der Median liegt deutlich höher, als bei den anderen Protokollen. Die Güte liegt im Median bei 0,346 etwas höher als die zu erwartenden 0,333. Die Differenz sind die verlorenen Broadcast-Nachrichten zwischen Mittel- und Außenknoten.



a) Versorgung

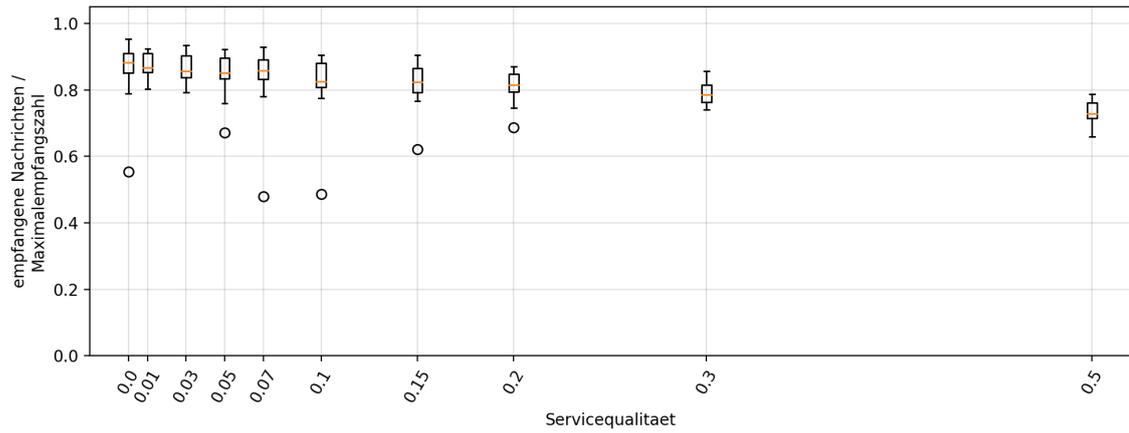


b) Güte

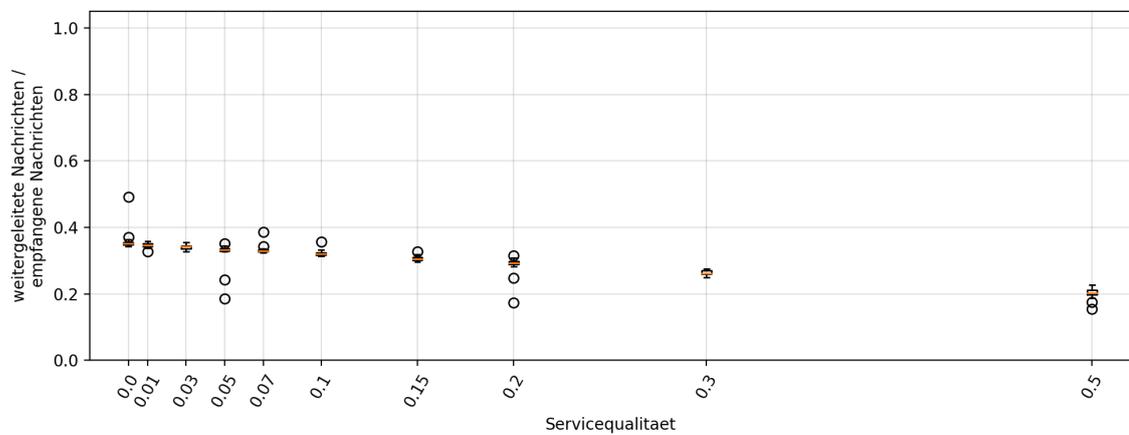


c) Aufwand

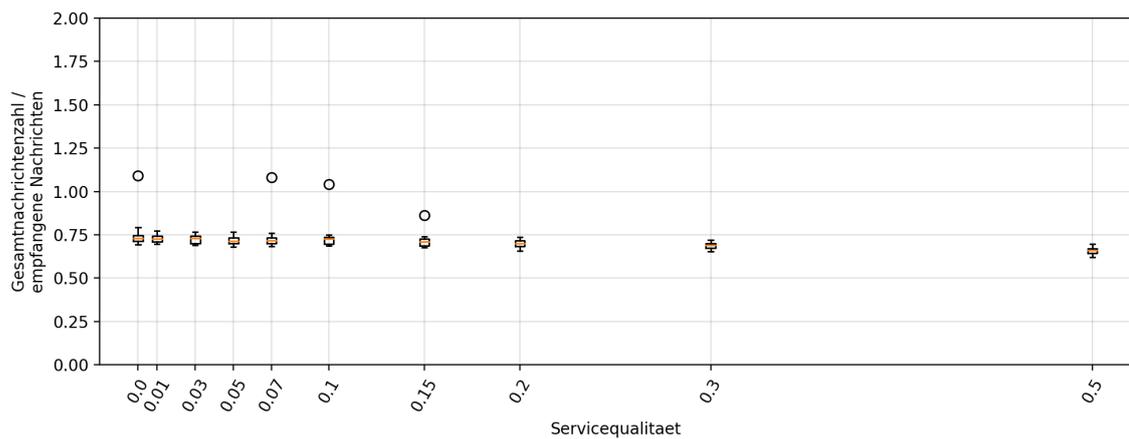
Abbildung 6.10: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = Gossiping, Topologie = 4 Knoten



a) Versorgung

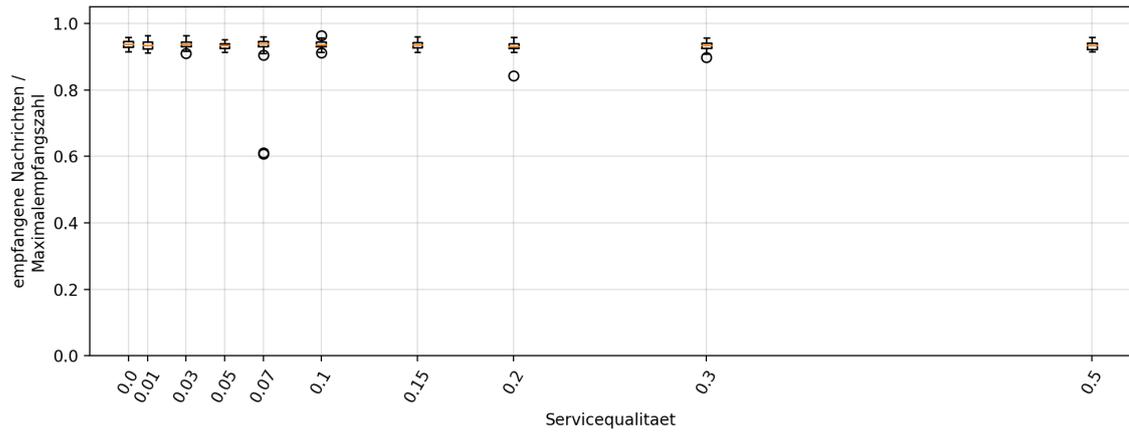


b) Güte

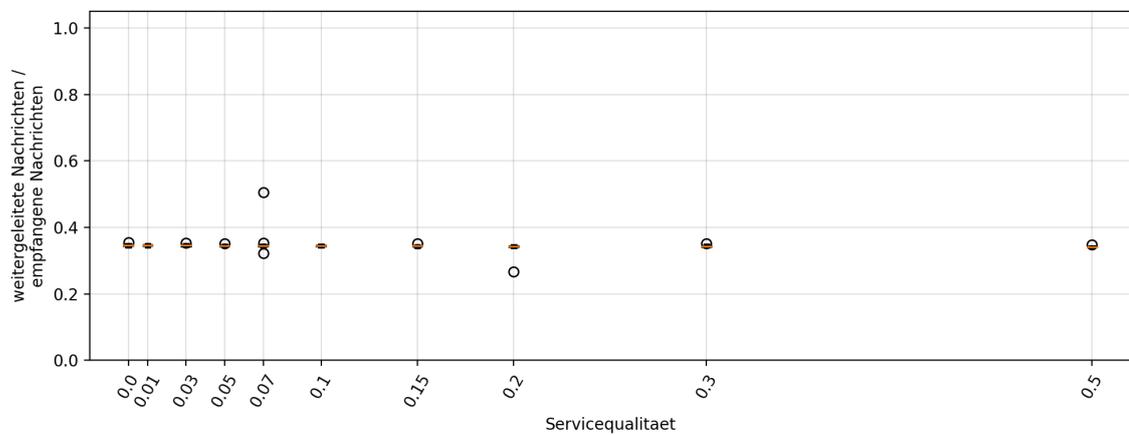


c) Aufwand

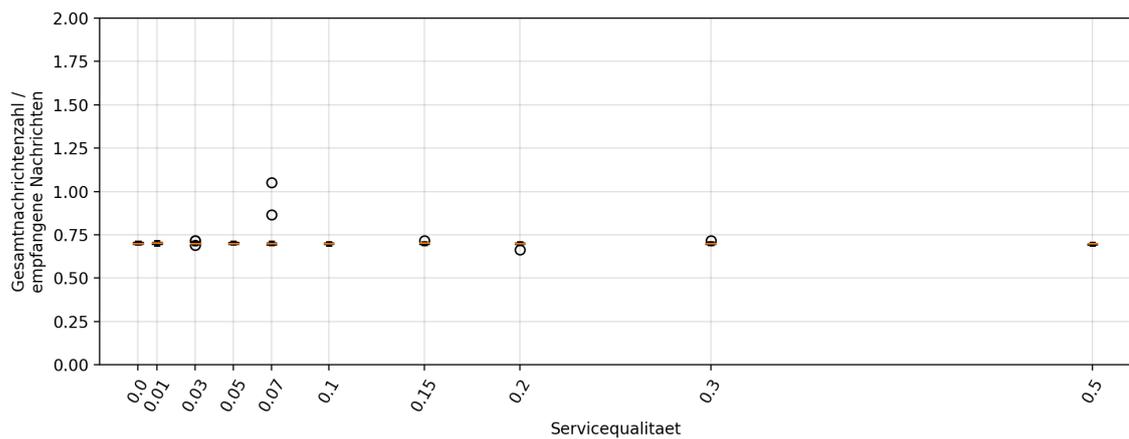
Abbildung 6.11: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 4 Knoten



a) Versorgung

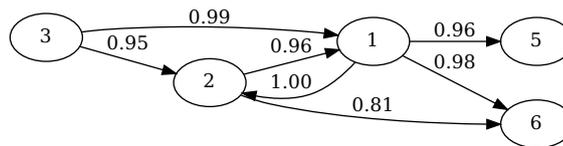


b) Güte

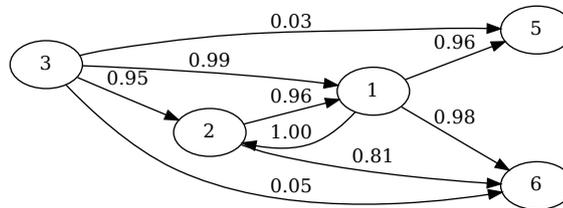


c) Aufwand

Abbildung 6.12: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 4 Knoten



a) geplante Topologie



b) tatsächliche Topologie

Abbildung 6.13: Die 5-Knoten-Topologie, wie sie geplant war und sich dann tatsächlich einstellte. Zur Übersichtlichkeit wurden nur die Knotenverbindungen in Senderichtung eingezeichnet

6.1.4 5-Knoten-Topologie

Die Experimente auf dieser Topologie (Abbildung 6.13 a)) sollten eigentlich den Vorteil von dNABB gegenüber sNABB herausstellen. Knoten 3 ist der einzige Sendeknoten, Knoten 1 und 2 leiten die Broadcast-Nachrichten an Knoten 5 und 6 weiter. Bei dNABB würde Knoten 2 nach einer Weiterleitung feststellen, dass Knoten 1 die Nachricht ebenfalls weiterleitet (Versorgung von Knoten 5). Die zukünftige Weiterleitungswahrscheinlichkeit bei Knoten 2 würde dann sinken.

Die tatsächlich entstandene Topologie wich aber von der geplanten in kleinen, wichtigen Details ab. Wie in Abbildung 6.13 b) zu sehen ist, konnten Knoten 5 und 6 wenige Broadcast-Nachrichten von Knoten 3 direkt erhalten. Das führt aber dazu, dass 5 und 6 in die 1-Hop-Nachbarschaft von 3 kommen und es mit den NABB-Protokollen für Knoten 1 und 2 nicht mehr notwendig erscheint, die Broadcast-Nachricht weiterzuleiten.

Gossiping

Die Ergebnisse des Gossiping-Experimentes sind in Abbildung 6.14 gegeben.

Die Versorgung ist hier so gut wie bei keinem Gossiping Experiment bisher. Die Mediane der Versorgung liegen zwischen 0,91 und 0,81 und fallen bei steigender Servicequalität langsam ab. Der Aufwand bei einer Servicequalität von 0 liegt knapp über dem Idealwert von 1,2.

sNABB

Die Ergebnisse des sNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.15 gegeben.

Bei sNABB fallen besonders die großen Boxhöhen für Versorgung und Güte auf. Das Spektrum an Ergebnissen ist größer als bei den vorhergehenden Experimenten. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass sich die unteren Antennenenden bei der Versorgung auf einer Ebene bei ungefähr 0,51 liegen. Die oberen Antennenenden folgen ungefähr der Kurve, die aufgrund der vorhergehenden Experimente (z.B. Abbildung 6.7) für den Median zu erwarten wären.

Dieses Verhalten lässt sich durch zwei Stadien des Experimentes erklären, die nacheinander durchlaufen werden. Im ersten Stadium haben Knoten 5 und 6 noch keine Nachricht von Knoten 3 erhalten (Abbildung 6.13a)) und befinden sich nicht in dessen 1-Hop-Nachbarschaft. Knoten 1 und 2 wiederholen Broadcast-Nachrichten von Knoten 3. Alle 4 möglichen Empfänger empfangen die Broadcast-Nachricht mit hoher Wahrscheinlichkeit (natürlich weiterhin in Abhängigkeit zur Servicequalität).

Irgendwann erhalten Knoten 5 und 6 eine Nachricht direkt von Knoten 3. Das Experiment wechselt nun in das zweite Stadium. Knoten 5 und 6 werden ab jetzt als 1-Hop-Nachbarn von Knoten 3 gesehen (Abbildung 6.13b)) und Knoten 1 und 2 hören auf, Broadcast-Nachrichten von Knoten 3 zu wiederholen. Der überwiegende Teil der Broadcast-Nachrichten von Knoten 3 erreicht Knoten 5 und 6 aber nicht. Es empfangen (überwiegend) nur noch 2 der möglichen 4 Empfänger die Broadcast-Nachricht.

Der Übergang zwischen den Stadien ist fließend, in dem Sinne, dass eventuell erst Knoten 5 und später Knoten 6 in die 1-Hop-Nachbarschaft von 3 fällt oder andersrum. Das Stadium wechselt irgendwann im Laufe des Experiments. Je nach dem, ob diese Änderung früher oder später geschieht, fällt das Ergebnis des Experiments anders aus. Am längsten haben sich die Experimente in ersten Stadium gehalten, die den größten Versorgungswert haben. Experimente mit einer Versorgung von 0,5 sind sehr früh in das zweite Stadium gewechselt.

Der Median der Versorgung liegt überwiegend um 0,6. Die Vermutung liegt daher nahe, dass der Stadienwechsel häufiger früher als später im Experiment stattgefunden hat.

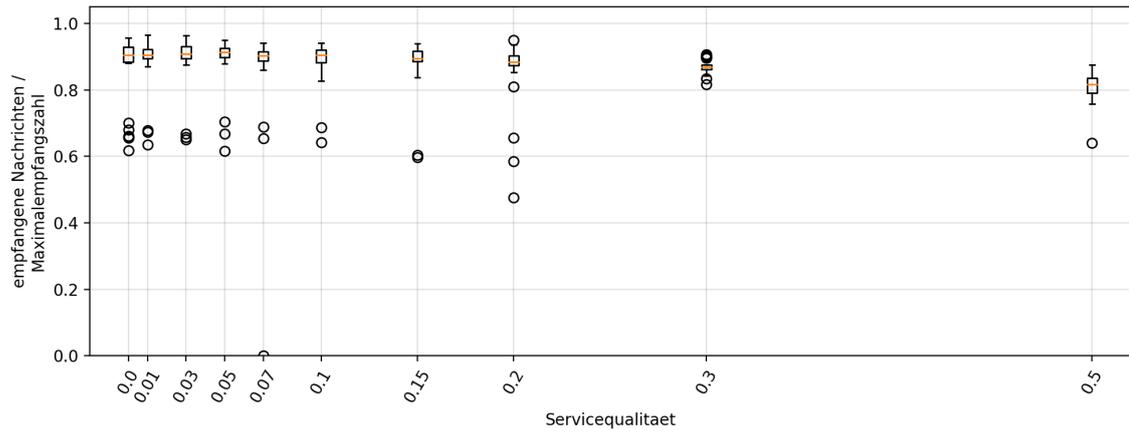
Bei der Güte lassen sich die beiden Stadien wieder an den Extremen erkennen. Bei den oberen Gütewerten befindet sich das Experiment lange im ersten Stadium, bei den unteren Extremen ist es früh ins zweite Stadium gewechselt.

dNABB

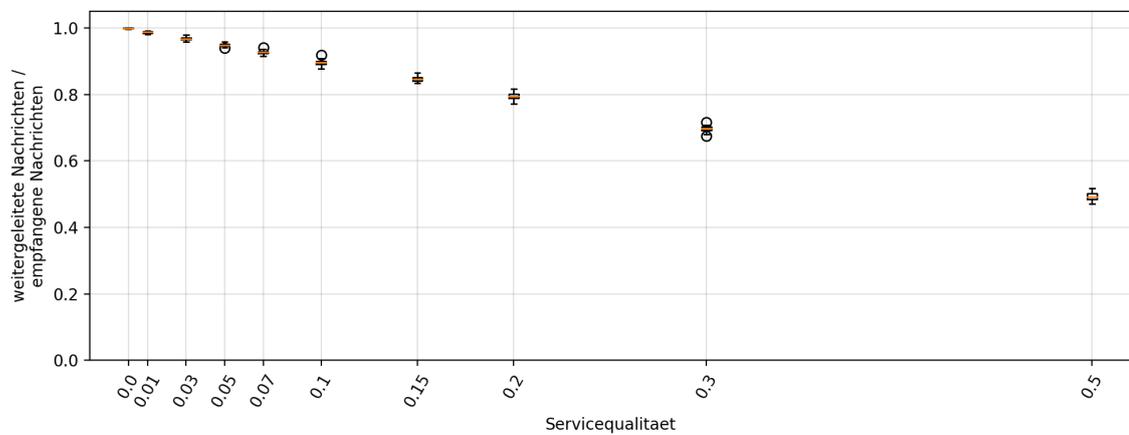
Die Ergebnisse des dNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.16 gegeben.

Bei dNABB sind die Boxhöhen der Versorgung und Güte wieder größer als bei den vorhergehenden Experimenten. Auffällig ist, dass sich die Extremwerte, ähnlich dem Median vorhergehender Experimente, wieder auf bestimmten Ebenen einstellen. So sind die unteren Extreme der Versorgung überwiegend bei 0,5 (wie sNABB) und die oberen Extreme bei ungefähr 0,96. Dieses Verhalten lässt sich wieder mit besonders frühen oder späten Wechsel der Experimentstadien erklären.

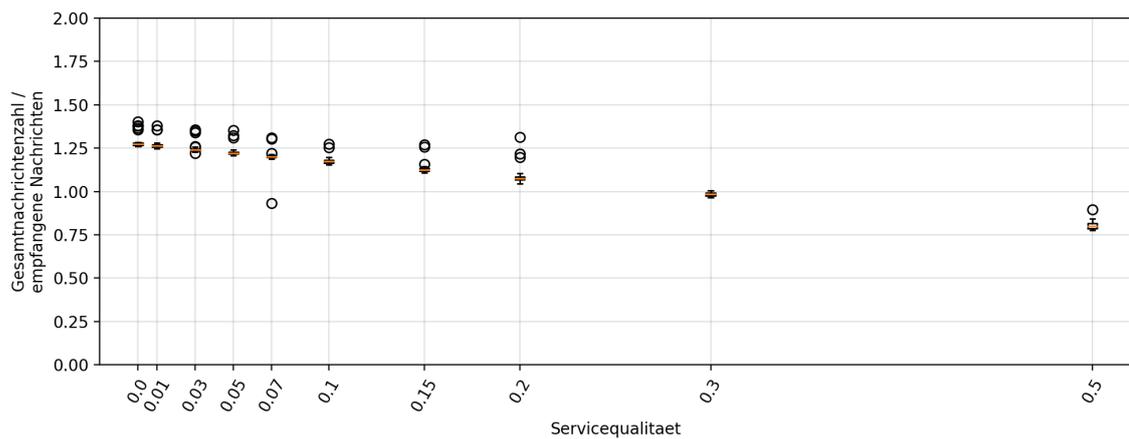
Bei der Güte verhält es sich ähnlich. Es gibt eine Ebene oberer Extreme und eine Ebene unterer Extreme und Verteilung der Werte dazwischen hängt vom Zeitpunkt des Wechsels der Experimentstadien ab.



a) Versorgung

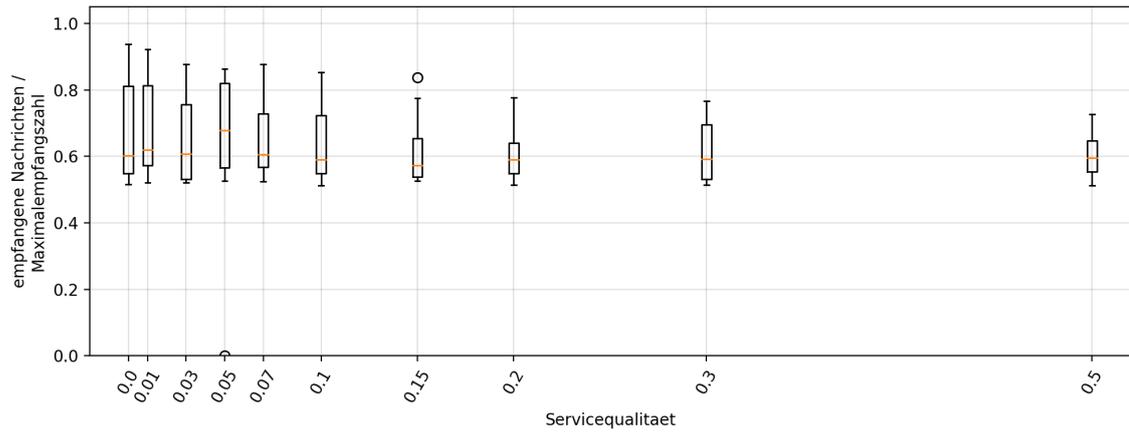


b) Güte

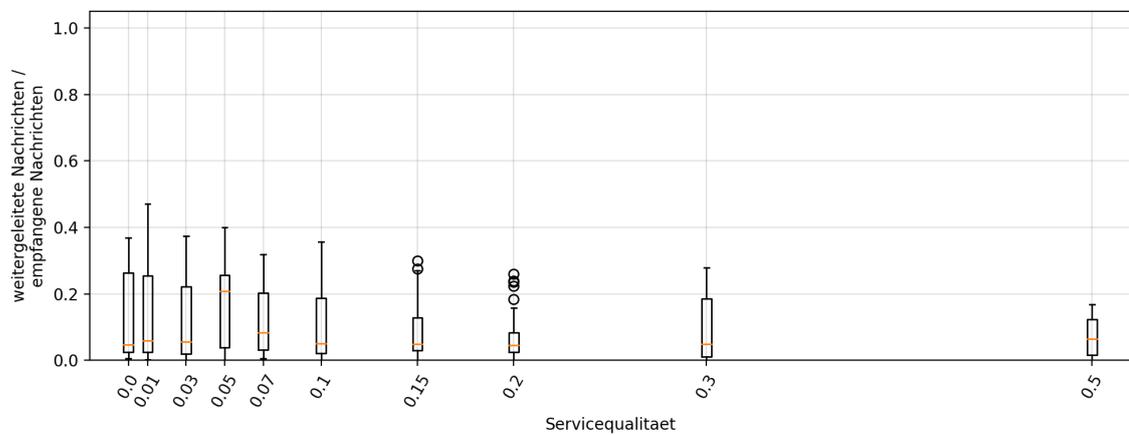


c) Aufwand

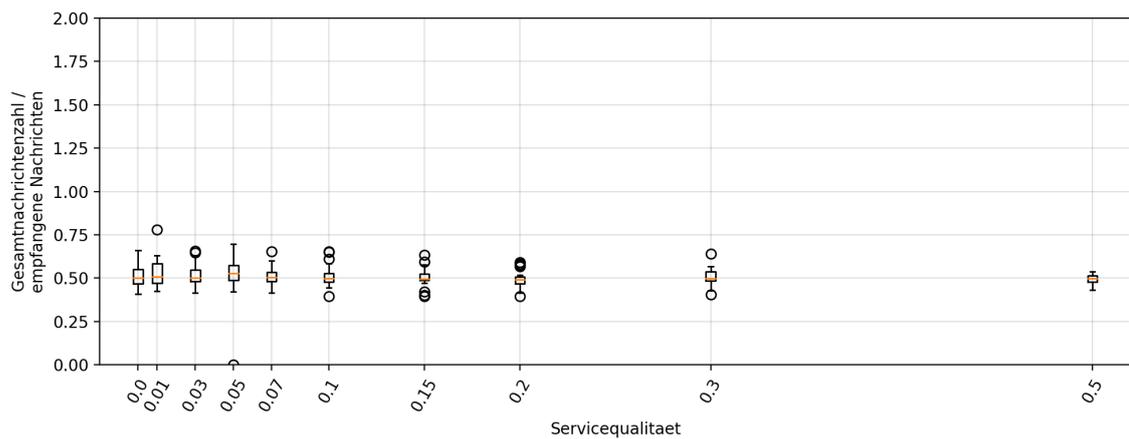
Abbildung 6.14: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = Gossiping, Topologie = 5 Knoten



a) Versorgung

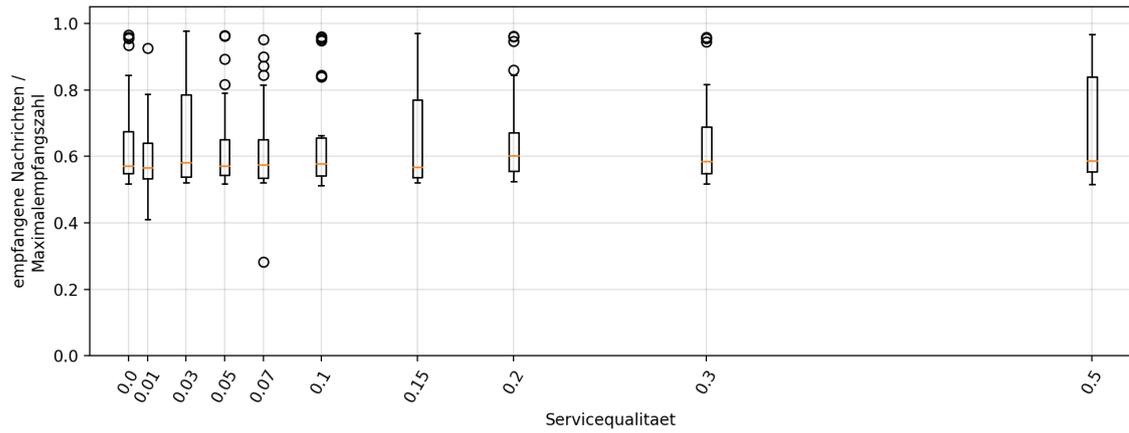


b) Güte

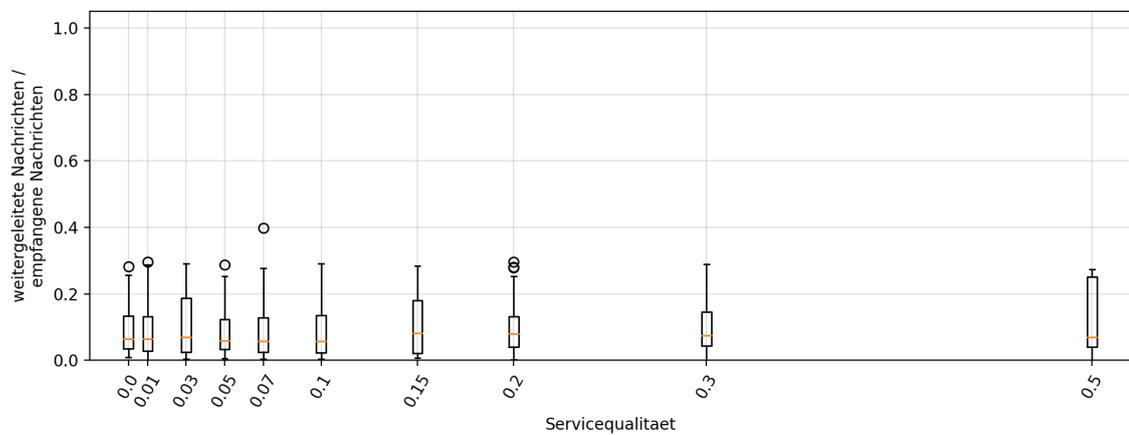


c) Aufwand

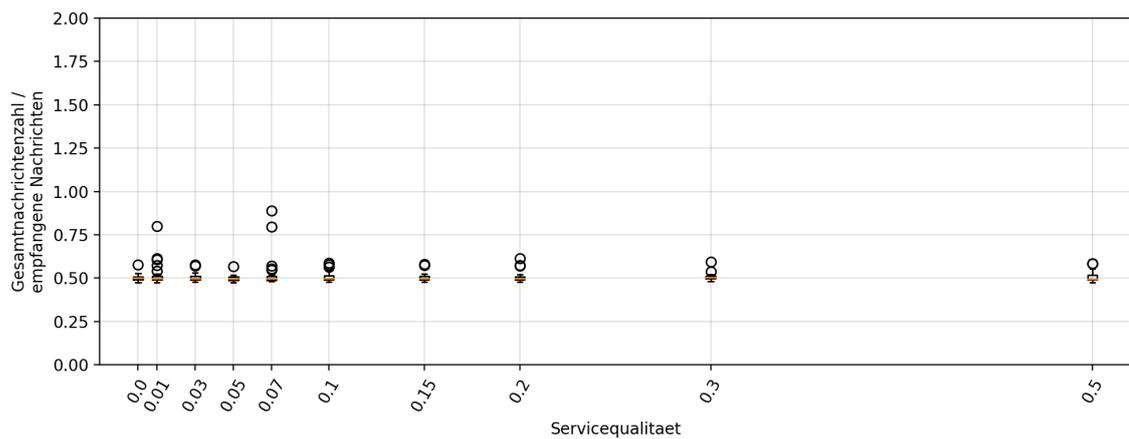
Abbildung 6.15: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 5 Knoten



a) Versorgung



b) Güte



c) Aufwand

Abbildung 6.16: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 5 Knoten

Tabelle 6.3: Verteilung Knotengrade der 8-Knoten Topologien, so wie in den Beispiel-Topologien der entsprechenden Sendeleistung dargestellt (es handelt sich also um Momentaufnahmen)

Sendeleistung	Verbindungen	Knotengrad	0	1	2	3	4	5	6	7
0 dBm	43	Eingangsgrad					3	2		3
		Ausgangsgrad					2	3	1	2
-10 dBm	36	Eingangsgrad				1	4	2		1
		Ausgangsgrad				1	4	2		1
-15 dBm	28	Eingangsgrad		1		3	3		1	
		Ausgangsgrad		1		3	3		1	
-20 dBm	20	Eingangsgrad	1	1		5	1			
		Ausgangsgrad		1	4	1	2			

6.2 Experimente mit allen Knoten

In diesem Abschnitt werden die Experimente mit allen Knoten ausgewertet. Die verschiedenen Topologien werden durch die Änderung der Sendeleistung der Transceiver erreicht. In Anhang A.2 sind für jede Sendeleistung Beispieltopologien, entnommen aus den Experimenten, dargestellt.

In Tabelle 6.3 sind die Knotengrade und die damit verbundene Anzahl an Verbindungen für die verschiedenen Acht-Knoten-Topologien angegeben. Es lässt sich festhalten, dass die Anzahl der Verbindungen und damit die Knotengrade bei sinkender Sendeleistung ebenfalls sinken. Die Qualität der Verbindungen ist Abbildung 6.17 zu entnehmen. Der Anteil an Verbindungen mit hohen Verbindungsqualitäten nimmt bei sinkender Sendeleistung ebenfalls ab.

6.2.1 8-Knoten-Topologie bei 0dBm

Diese Topologie zeichnet sich durch hohe Knotengrade und gute Verbindungsqualitäten zwischen den Knoten aus. In Tabelle 6.3 ist zu sehen, dass 2 Knoten einen Ein- und Ausgangsgrad von sieben haben (Knoten 1 und 7). Für diese zwei Knoten wäre theoretisch keine Weiterleitung nötig. Für alle anderen Knoten würde bei idealen Verbindungsverhältnissen eine Weiterleitung genügen, um alle Knoten zu erreichen.

Gossiping

In Abbildung 6.18 sind sehr hohe Boxhöhen zu erkennen. Die ersten zwei Drittel der Experimente lagen im Median und Durchschnitt bei 0,98 und 0,96, während das letzte Drittel der Experimente bei Median und Durchschnitt jeweils bei 0,84 lag (bezogen auf die Experiment-Reihe mit einer Servicequalität von 0). Bei der Ursachenforschung kam heraus, dass das Einbrechen der Ergebnisse genau nach 0 Uhr stattfand. Ich vermute deswegen eine externe Ursache für die schwächeren Ergebnisse und damit die großen Boxhöhen.

Im Median lässt sich ein leichter Abwärtstrend ablesen, die Versorgung bleibt aber durchweg sehr hoch. Die Güte ist, wie bei Gossiping üblich sehr hoch.

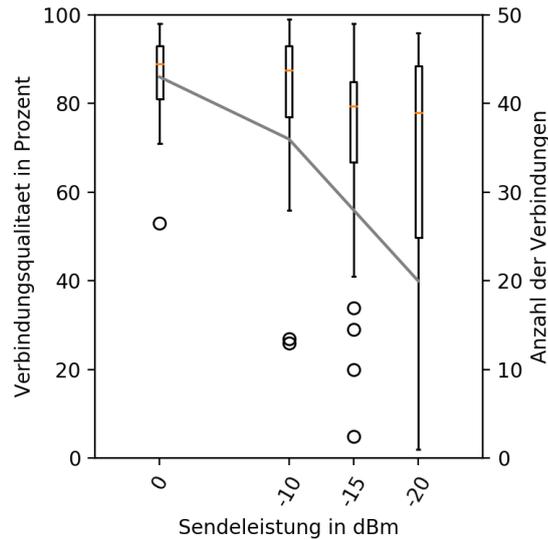


Abbildung 6.17: Die Boxplots zeigen die Verteilung der Verbindungsqualitäten bei den verschiedenen 8-Knoten-Topologien, so wie in den Beispiel-Topologien in Anhang A.2 dargestellt (es handelt sich also um Momentaufnahmen). Der Graph zeigt die Anzahl der Verbindungen aus Tabelle 6.3 für die jeweilige Topologie.

sNABB

Die Ergebnisse des sNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.19 gegeben.

Der Median der Versorgung fällt bei sinkender Servicequalität von 0,94 bis auf 0,77 ab und liegt immer unter den Medianen von Gossiping. Es liegt nahe, dass schwache Knotenverbindungen den Versorgungswert drücken, insbesondere die Verbindungen der zwei Knoten mit einem Ausgangsgrad von 7 (vgl. Abbildung A.2 und Tabelle 6.3)

Dafür sind Güte und Aufwand deutlich niedriger als bei Gossiping. Wie oben beschrieben, kann das gesamte Netz mit Maximal einer Weiterleitung versorgt werden. Der theoretische ideale Gütewert sollte also $1/7 = 0,14$ (Ein Weiterleiter, 7 Empfänger) nicht überschreiten. Das er doch etwas höher liegt könnte durch die Verbindungsqualitäten zwischen den Knoten erklärt werden. So haben die beiden Knoten mit Ausgangsgrad 7 (Knoten 1 und 7) jeweils drei beziehungsweise vier Verbindungen mit einer Verbindungsqualität kleiner 0,9 (siehe Abbildung A.2). Das bedeutet, dass mindestens drei Knoten jede zehnte Weiterleitung nicht erhalten.

dNABB

In Abbildung 6.20 sind die Ergebnisse des dNABB Experiments abgebildet. Die Versorgungswerte liegen im Median konstant zwischen 0,95 und 0,96 sehr hoch.

Die Güte sinkt bei steigender Servicequalität langsam ab, während die Versorgungswerte auf einer Ebene bleiben. Das könnte sich durch die dynamische Anpassung der Weiterleitungswahrscheinlichkeit von dNABB erklären lassen, da bestimmte redundante Wiederholungen

vermieden werden können. So konnte die Menge an Wiederholungen zwischen den Servicequalitäten 0 und 0,5 um rund 20 % gesenkt werden, wobei die Versorgung nur um 1 % fiel.² Im Vergleich dazu konnte bei dem sNABB Experiment 62 % der Weiterleitungen eingespart werden, was jedoch zu einer 18 % schlechteren Versorgung führte.

2

Beispiel zur Berechnung der Einsparungen:

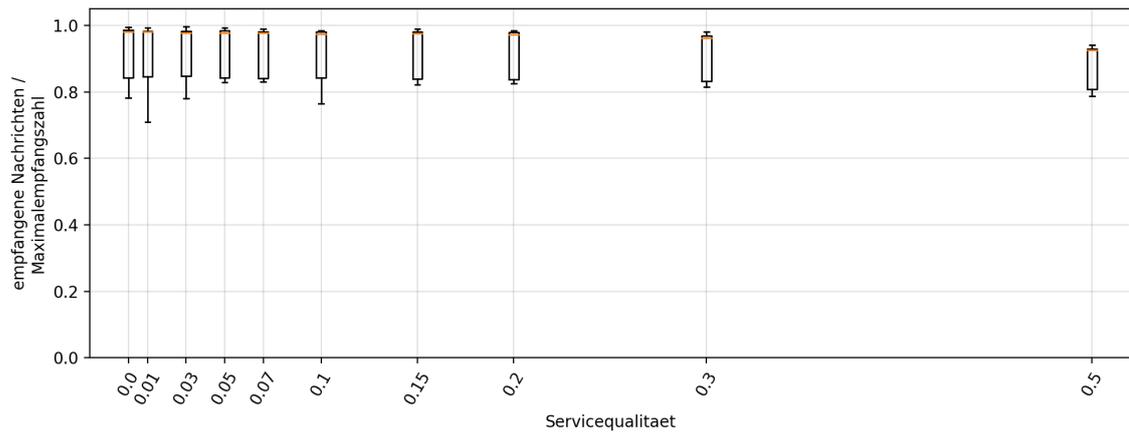
\widetilde{G}_x – Median der Güte bei einer Servicequalität von x

Δ_G – Änderung der Güte

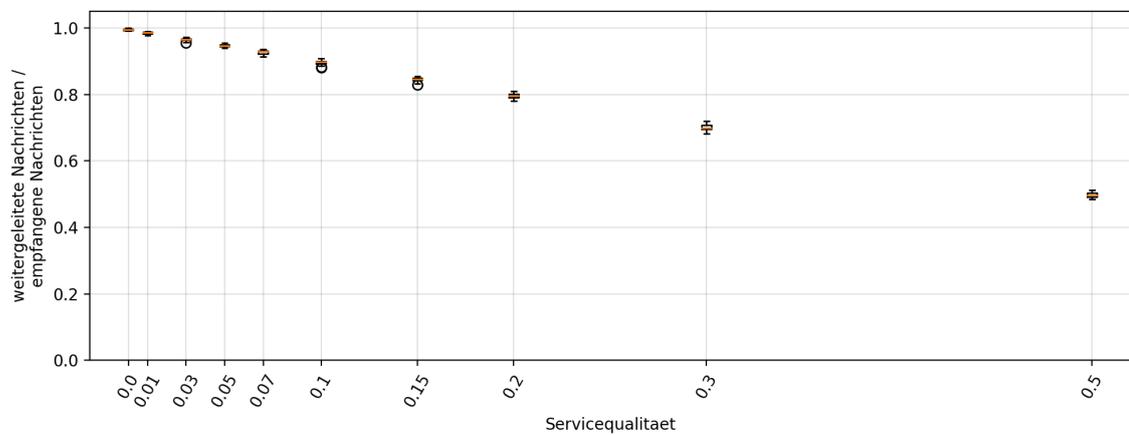
$$\Delta_G = 1 - (\widetilde{G}_{0,5} / \widetilde{G}_0)$$

$$\Delta_G = 1 - (0,15 / 0,19)$$

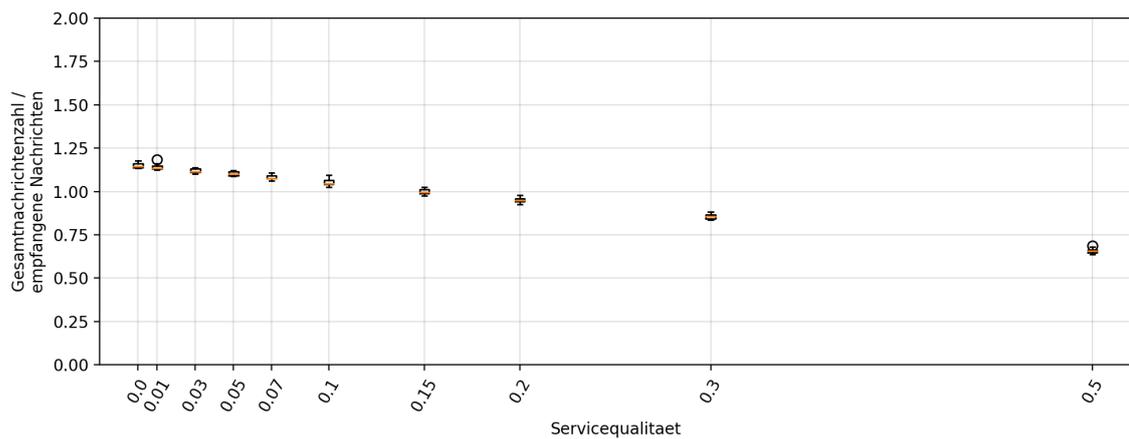
$$\Delta_G = 0,21$$



a) Versorgung

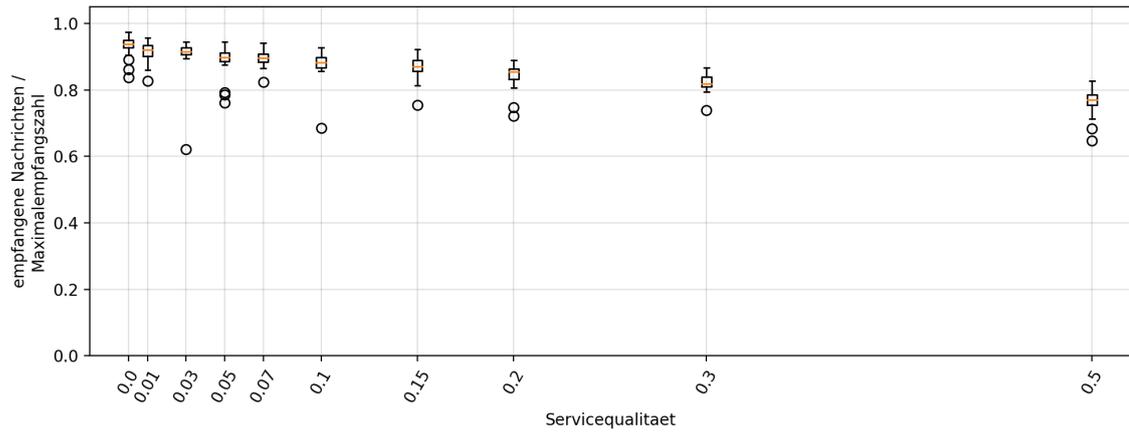


b) Güte

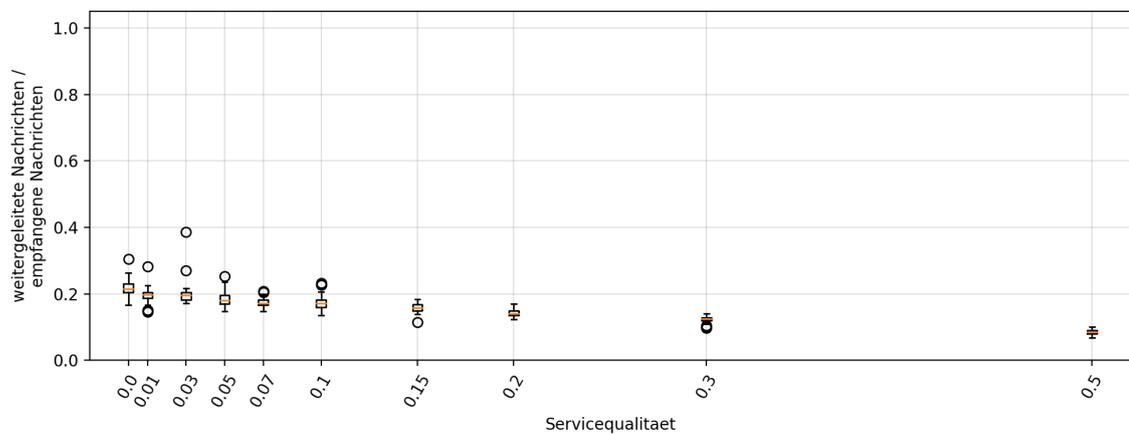


c) Aufwand

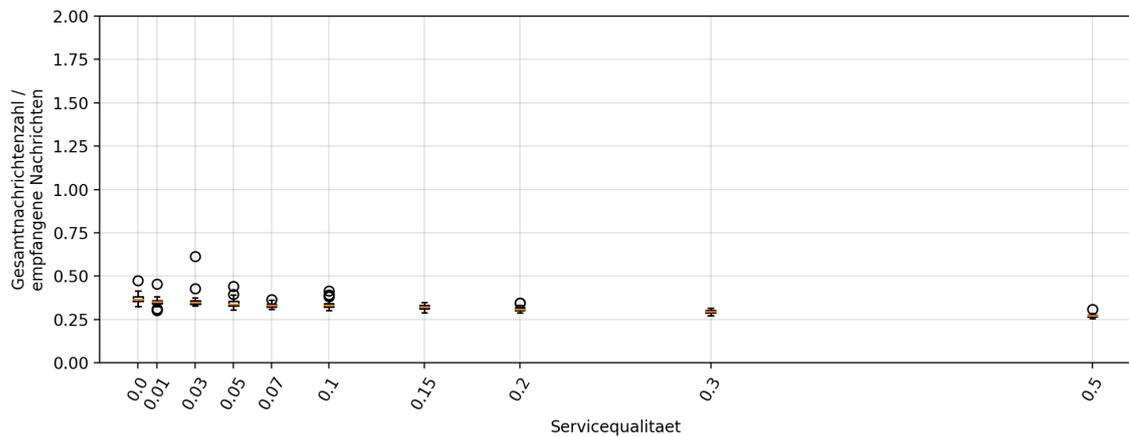
Abbildung 6.18: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = Gossiping, Topologie = 8 Knoten bei 0 dBm Sendeleistung



a) Versorgung

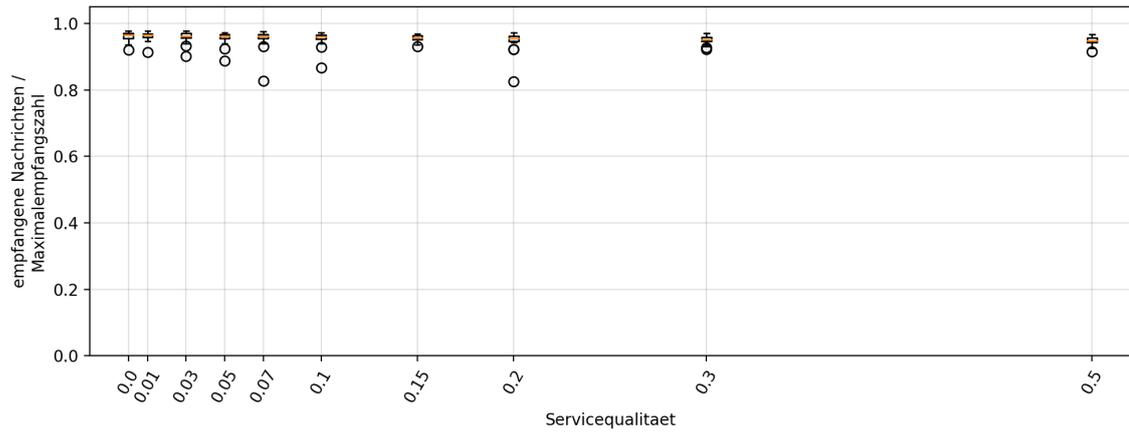


b) Güte

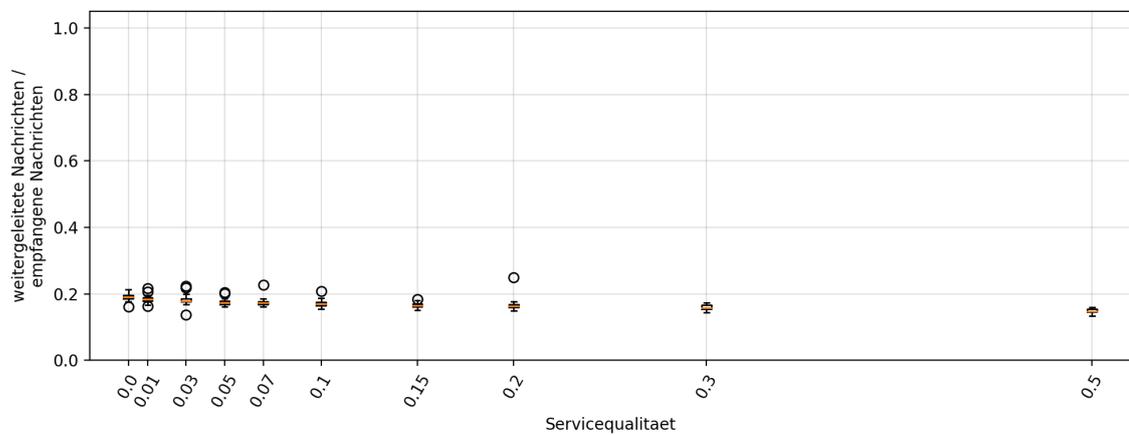


c) Aufwand

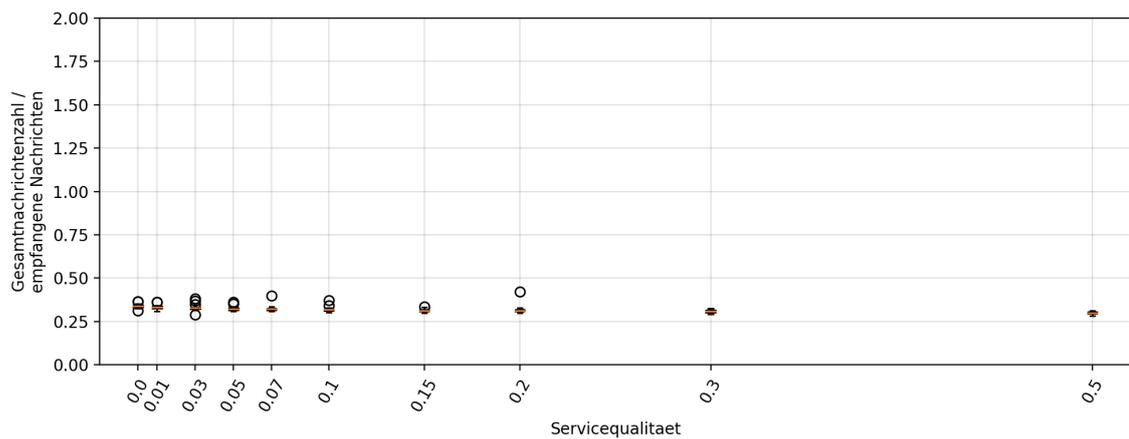
Abbildung 6.19: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 8 Knoten bei 0 dBm Sendeleistung



a) Versorgung



b) Güte



c) Aufwand

Abbildung 6.20: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 8 Knoten bei 0 dBm Sendeleistung

6.2.2 8-Knoten-Topologie bei -10 dBm

Bei einer Sendeleistung von -10 dBm gibt es insgesamt weniger Verbindungen und geringere Knotengrade als bei einer Sendeleistung von 0 dBm (siehe Abbildung 6.17). Es gibt einen Knoten mit Knotengrad 7 (Knoten 7), der weiterhin mit allen anderen Knoten in beide Richtungen verbunden ist (siehe Tabelle 6.3). Theoretisch würde also weiterhin maximal eine Weiterleitung pro Broadcast-Nachricht benötigt werden. Jedoch beträgt die Verbindungsqualität von 7 zu 8 in der Beispieltopologie (Abbildung A.3) nur 0,26 und weitere 4 Ausgangsgrade liegen unter 0,9.

Gossiping

Die Ergebnisse des Gossiping-Experimentes sind in Abbildung 6.21 gegeben.

Die Versorgung bei Gossiping liegt leicht unter den Werten des 0 dBm Experiments. Der Median liegt zwischen 0,97 und 0,84 und fällt etwas schneller ab.

sNABB

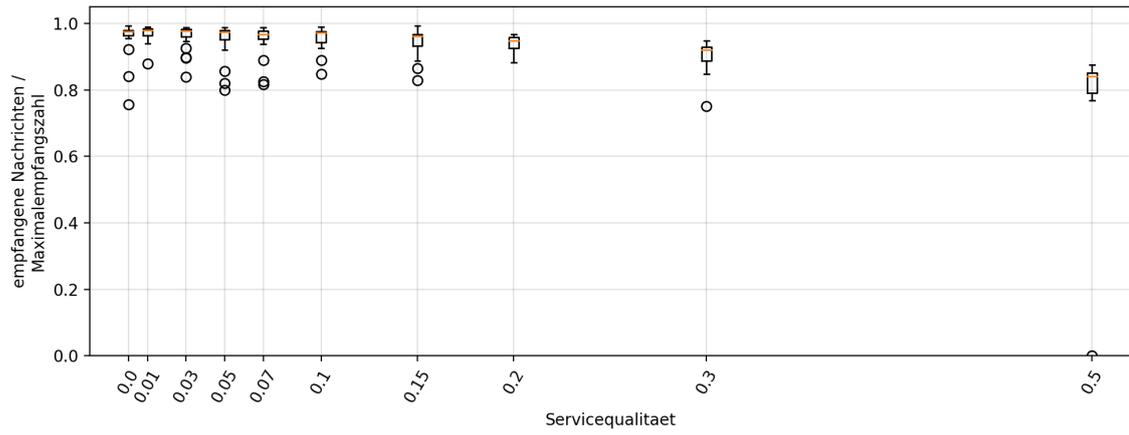
Die Ergebnisse des sNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.22 gegeben.

Wie bei Gossiping liegen die Versorgung leicht unter denen des 0 dBm Experiments. Güte und Aufwand liegen etwas höher.

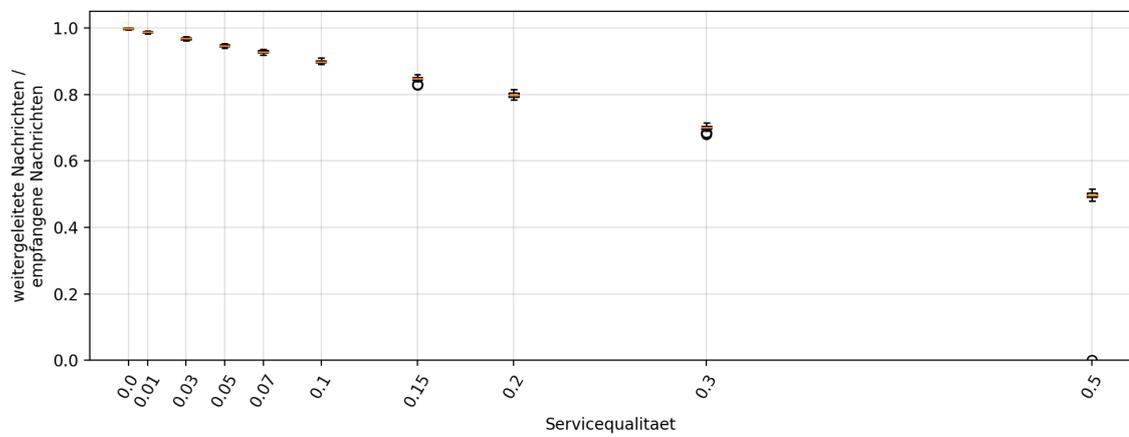
dNABB

Die Ergebnisse des dNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.23 gegeben.

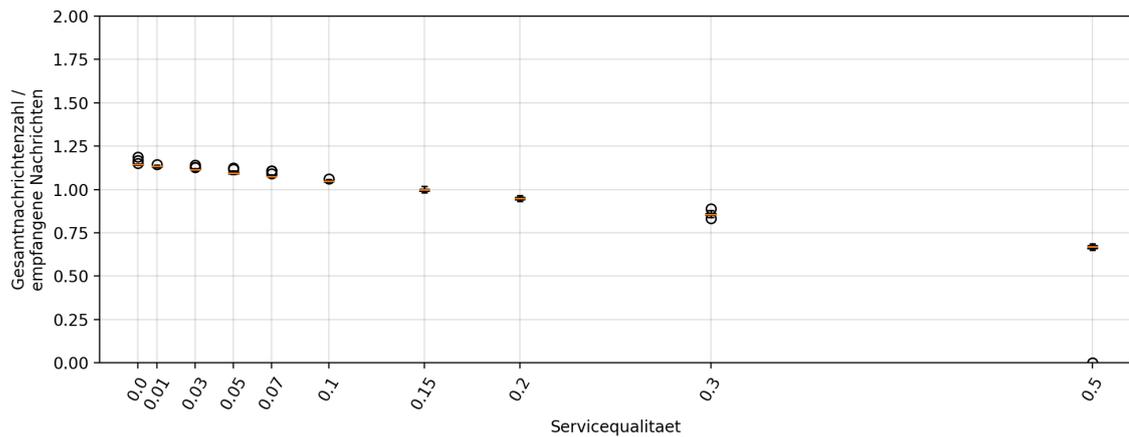
Bei dNABB liegen die Ergebnisse wieder auf einer Linie. Die Versorgung liegt bei einer Servicequalität von 0 im Median bei 0,89 etwas unter den Wert von 0,93 des sNABB Experiments. Auch die Ergebnisse von Güte und Aufwand sind etwas ungünstiger. Eine niedrigere Versorgung in Kombination mit einer höheren Güte weisen auf eine insgesamt niedrigere Verbindungsqualität während des Experiments hin.



a) Versorgung

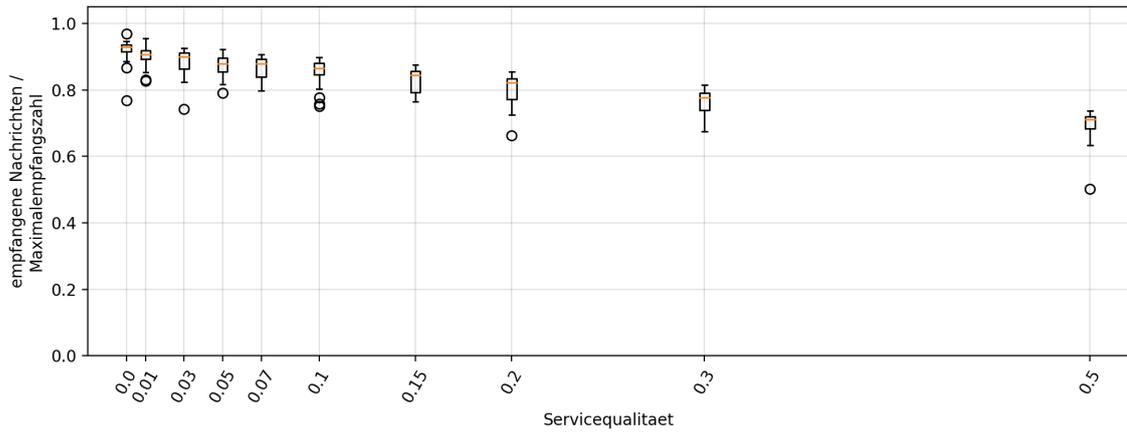


b) Güte

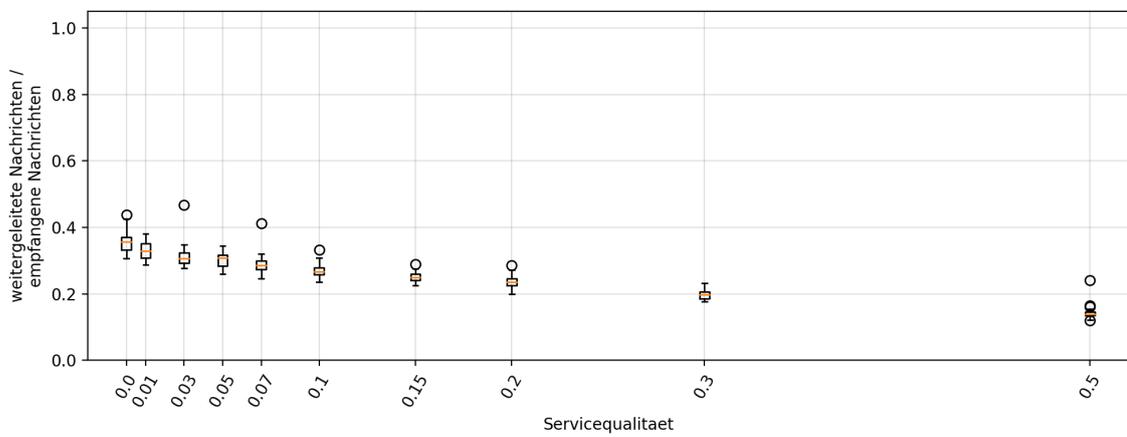


c) Aufwand

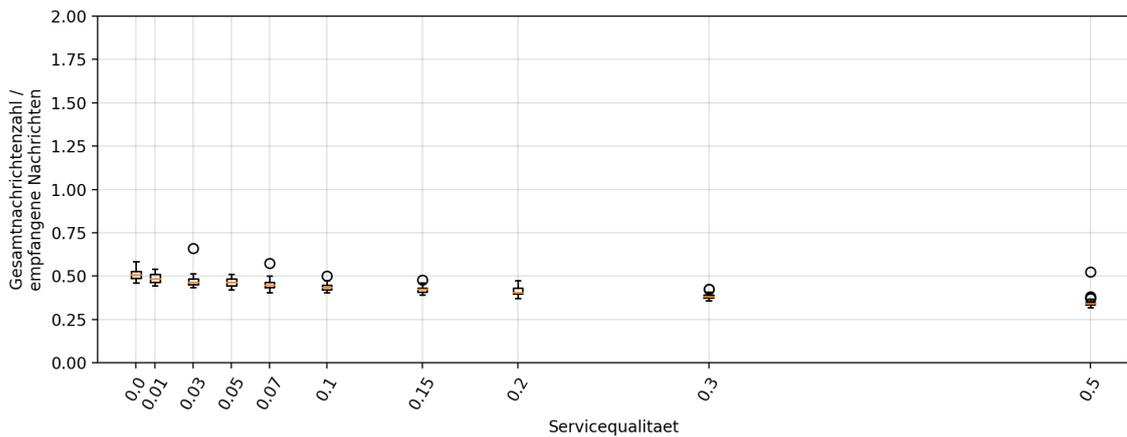
Abbildung 6.21: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = Gossiping, Topologie = 8 Knoten bei -10 dBm Sendeleistung



a) Versorgung

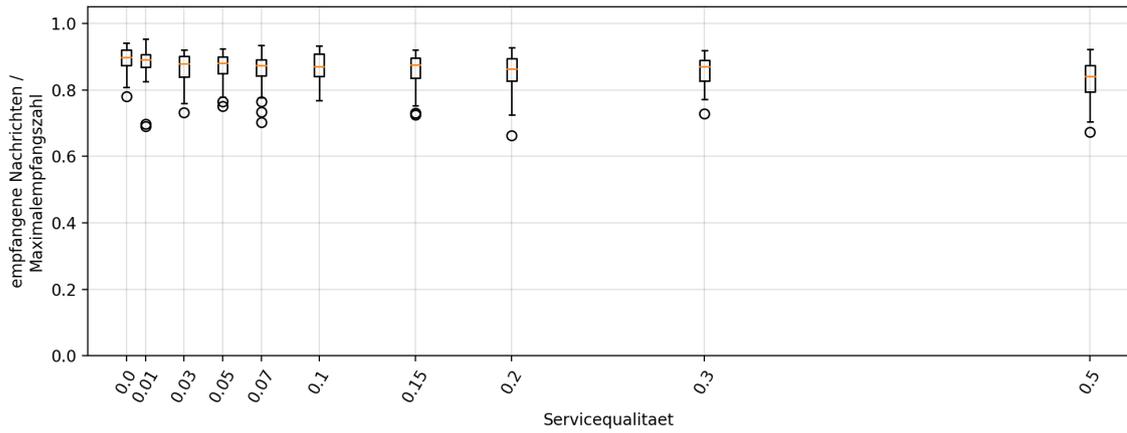


b) Güte

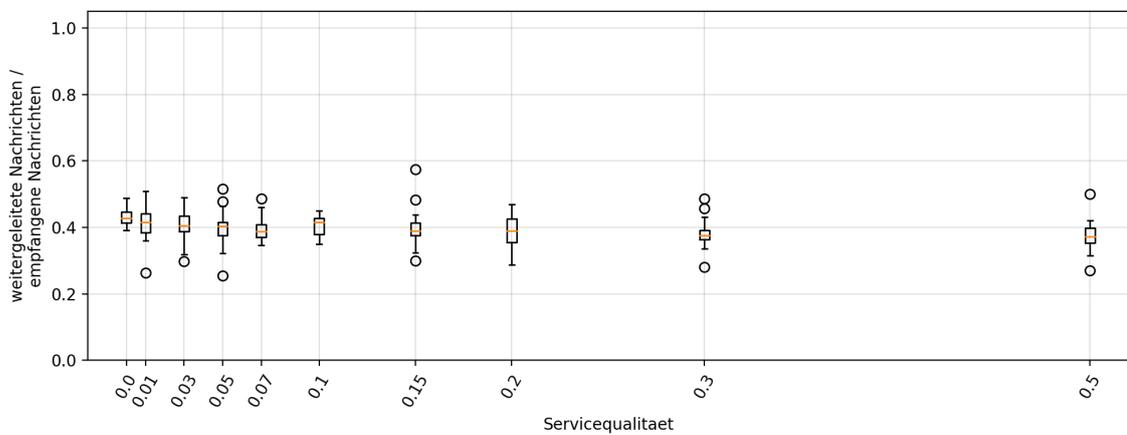


c) Aufwand

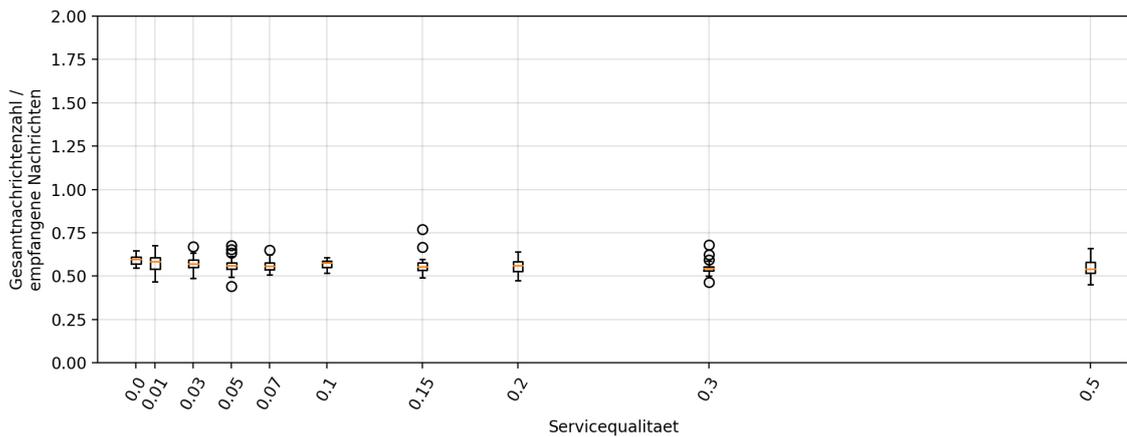
Abbildung 6.22: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 8 Knoten bei -10 dBm Sendeleistung



a) Versorgung



b) Güte



c) Aufwand

Abbildung 6.23: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 8 Knoten bei -10 dBm Sendeleistung

Tabelle 6.4: Unterschiede in der Durchführung von den Experimenten und den Simulationen

Eigenschaft	Experiment	Simulation
Nachrichtenzahl	~500 Broadcast-Nachrichten pro Experiment, verteilt auf alle Knoten	2 Varianten: 1. 1 Sender, dann 32 Broadcast-Nachrichten 2. Alle Sender, dann ~3,7 Broadcast-Nachrichten pro Sender
Knotenzahl Linientopologie	3 Knoten	20 Knoten
Knotenzahl Zufälliges Netzwerk	8 Knoten	64 Knoten
Netzwerktopologie	Topologie festgelegt durch Testbed, Variationen möglich über das Weglassen von Knoten und Modifizieren der Sendeleistung	Freie Gestaltungsmöglichkeit, stark strukturierte und zufällig erzeugte Topologien möglich
Verbindungsqualität	schwankend, sowohl zwischen als auch während der Experimente	2 Varianten: 1. Idealisiertes Medium ohne Verluste 2. Simuliertes WLAN, bei dem es zu Verlusten kommen kann, diese sind aber deutlich geringer als in Experimenten
Metriken	Versorgung, Güte, Aufwand	Versorgung, Güte, Ersparnisse

6.3 Vergleich der Experimente mit den Simulationen

In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse der durchgeführten Experimente mit den Ergebnissen der Simulationen verglichen werden. Besonders dafür geeignet ist die Linientopologie, da sie sowohl in Experiment und Simulation getestet wurde, und die 8-Knoten-Topologie, die ähnliche Eigenschaften aufweist, wie die Simulation mit zufälligem Netzwerk. Das Hauptargument, warum sich die „Zufälliges Netzwerk“-Topologie mit der 8-Knoten-Topologie vergleichen lässt, liegt in der Unstrukturiertheit und Zufälligkeit der Topologien.

6.3.1 Unterschiede in den Bedingungen

In Tabelle 6.4 sind grundsätzliche Unterschiede zwischen den Simulationen und den Experimenten aufgeführt. So unterscheiden sie sich in Knotenzahl, Nachrichtenzahl, Dauer und Topologie. Am wichtigsten ist wahrscheinlich der Unterschied in der Verbindungsqualität. In den Simulationen wurde entweder ein idealisiertes, verlustfreies Übertragungsmedium genutzt oder WLAN simuliert, bei dem Verluste theoretisch möglich waren, jedoch eine Ausnahme bildeten. Extremfälle wie bei der 5-Knoten-Topologie (Abschnitt 6.1.4) werden daher von den Simulationen nicht abgebildet. Weiterhin ist anzumerken, dass sich nur die Metriken Versorgung und Güte vergleichen lassen.

6.3.2 Vergleich der Ergebnisse der Linientopologie

Die Linientopologie besteht im Experiment aus nur 3 Knoten (siehe Abschnitt 6.1.2), in der Simulation aus 20 Knoten. Verglichen werden die Ergebnisse der Simulation mit einem Sender und idealisierten Übertragungsprotokoll aus der dieser Arbeit zugrundeliegenden Masterarbeit [2], als Kopie zu finden im Anhang A.3. Effekte durch niedrigere Servicequalitäten werden durch die Anzahl beteiligter Knoten in der Simulation deutlicher.

Für Gossiping ist der Trend der Versorgung bei sinkender Servicequalität bei beiden gleich und geht nach unten. In der Simulation sinken die Werte schneller, weil die Anzahl benötigter Weiterleitungen höher ist. In der Simulation wird eine Versorgung von 1 bei einer Servicequalität von 0 erreicht. Die beste Versorgung für das Experiment beträgt, bedingt durch die Verbindungsqualität, nur 0,9. Die Güte ist bei beiden identisch, da sie immer allein von der Servicequalität abhängt.

Bei sNABB ist der Trend ebenfalls derselbe in Experiment und Simulation. Die Versorgung sinkt in der Simulation wieder schneller als im Experiment und die Ursache liegt hier wieder in der größeren Anzahl benötigter Weiterleitungen in der Simulation. Die Güte liegt bei beiden auf den erwarteten Werten von ca. 0,95 (18 Weiterleitungen/19 empfangene Nachrichten) für die Simulation und ca. 0,5 (1 Weiterleitung/2 empfangene Nachrichten) für das Experiment bei einer Servicequalität von 0.

Bei dNABB bleiben die Versorgungswerte bei beidem auf einem Level. Im Experiment, aufgrund der Verbindungsqualität, mit 0,95 etwas niedriger als in der Simulation, wo die Versorgung bei 1 liegt. Die Güte liegt auch in Simulation und Experiment auf einem Level auf den erwarteten Werten von 0,95 (Simulation) und 0,5 (Experiment).

6.3.3 Vergleich der Ergebnisse für 8-Knoten- und Netzwerktopologie

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des 8-Knoten Experiments mit 0 dBm Sendeleistung (siehe Abschnitt 6.2.1) mit der Simulation der zufälligen Netzwerktopologie mit zufälligen Sendern und idealisierter Übertragung verglichen (siehe Anhang A.4).

Bei Gossiping werden im Experiment die höchsten Versorgungswerte von allen Experimenten erreicht. Der Trend fällt leicht ab. In der Simulation fällt der Trend schneller. Aufgrund der Topologie sind hier längere Weiterleitungsketten nötig um das gesamte Netzwerk zu versorgen. Bei steigender Servicequalität steigt auch die Wahrscheinlichkeit das diese Weiterleitungsketten unterbrochen werden und eine Broadcast-Nachricht nicht weiter durch das Netzwerk propagiert wird. Im Experiment dagegen sind 2 Knoten mit allen anderen verbunden (vgl. Tabelle 6.3). Die Länge der Weiterleitungskette ist also auf 1 beschränkt. Jeder Knoten ist theoretisch mit einer Weiterleitung erreichbar. Daher macht sich eine niedrigere Weiterleitungswahrscheinlichkeit nicht so stark bemerkbar. Die Güte sinkt, wie immer bei Gossiping, indirekt proportional zur Servicequalität.

Die Versorgung von sNABB fällt in Simulation und Experiment etwas schneller als bei Gossiping. Im Experiment wird eine Versorgung von 1 nicht erreicht und liegt immer deutlich unter dem Wert von Gossiping. Jedoch werden sowohl in Experiment als auch in der Simulation deutlich mehr Weiterleitungen eingespart. Das Einsparpotenzial von Weiterleitungen bei einer Servicequalität von 0 gegenüber Gossiping liegt im Experiment bei ca. 80% und

in der Simulation bei ca. 60%. Der Gütwert ist deswegen bei sNABB im Gegensatz zu Gossiping sowohl in Experiment als auch in der Simulation deutlich niedriger.

Bei dNABB liegt die Versorgung im Experiment und Simulation jeweils auf einer Ebene. Im Experiment knapp unter 1, in der Simulation bei 1. Es können bei beiden Methoden Broadcast-Nachrichten bei steigender Servicequalität eingespart werden, wobei die Versorgung gleich bleibt. Daher sinkt auch der Gütwert bei steigender Servicequalität. Gegenüber Gossiping lassen sich auch hier viele Broadcast-Nachrichten einsparen. Bei einer höheren Servicequalität kann dNABB auch Weiterleitungen gegenüber sNABB (mit Servicequalität 0) einsparen. So liegt die Güte von sNABB im Experiment mit Servicequalität 0 bei 0,21 und für dNABB bei 0,19. Bei beiden Protokollen sinkt die Güte mit dem Erhöhen der Servicequalität. Während bei sNABB dann auch die Versorgung fällt, bleibt diese bei dNABB konstant, trotz weniger Weiterleitungen. Diese Beobachtung lässt sich genauso auch auf die Simulation übertragen.

6.4 Experimente mit modifizierten Protokollen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Experimente mit eingestellten Modifikationen vorgestellt.

6.4.1 Nachbarschaftsschwelle mit 5 Knoten

Die Topologie für dieses Experiment (Abbildung 6.24) entspricht der aus dem 5-Knoten Experiment aus Abschnitt 6.1.4 (Die Verbindungen von Knoten 3 zu 5 und 6 sind besser, die schwache Verbindung von Knoten 2 zu 5 ist dazugekommen). Gezeigt werden soll hierdurch, wie die Nachbarschaftsschwelle die aufgetretenen Probleme abmildern kann. Ein Schwellwert von 0 bedeutet, dass die Modifikation abgestellt ist. Ein Schwellwert von 100 bedeutet, dass kein Nachbar als solcher wahrgenommen wird und es zu keinen Weiterleitungen kommt. Zwischen diesen beiden Extremen lässt sich die Performance der Modifikation festmachen.

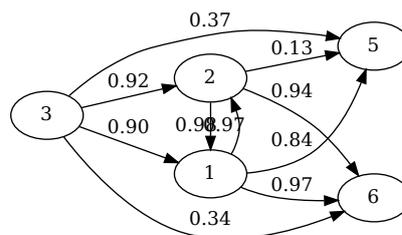


Abbildung 6.24: 5-Knoten-Topologie, Momentaufnahme mit annotierten Verbindungsqualitäten während eines Experiments mit eingestellter Nachbarschaftsschwelle. Es sind nur Verbindungen in Senderrichtung dargestellt.

sNABB

Die Ergebnisse des sNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.25 gegeben.

Der Median der Versorgung ohne Nachbarschaftsschwelle liegt bei 0,75 und kann als Vergleichswert dienen. Der Median steigt zwischen den Schwellwerten 10 bis 50 langsam an und erreicht einen Wert von 0,90. Das lässt sich damit erklären, dass die 1-Hop-Nachbarschaft zwischen den Knoten 3 und den Knoten 5 und 6 ignoriert wird und Knoten 1 und 2 häufiger weiterleiten. Diese Annahme wird unterstützt dadurch, dass auch in diesem Bereich der Median der Güte von 0 auf 0,33 steigt. Die Streubreite der Ergebnisse, also die Höhe der Box und die Antennenlänge, ist ab einem Schwellwert von 50 deutlich kleiner als vorher. Hier wird der Kipppunkt überschritten, die Nachbarschaft zwischen Knoten 3 und 5, sowie 3 und 6 wird ab hier eindeutig ignoriert. Auch diese Vermutung wird gestützt durch die ebenfalls große Ergebnisstreuung der Güte ab diesem Bereich.

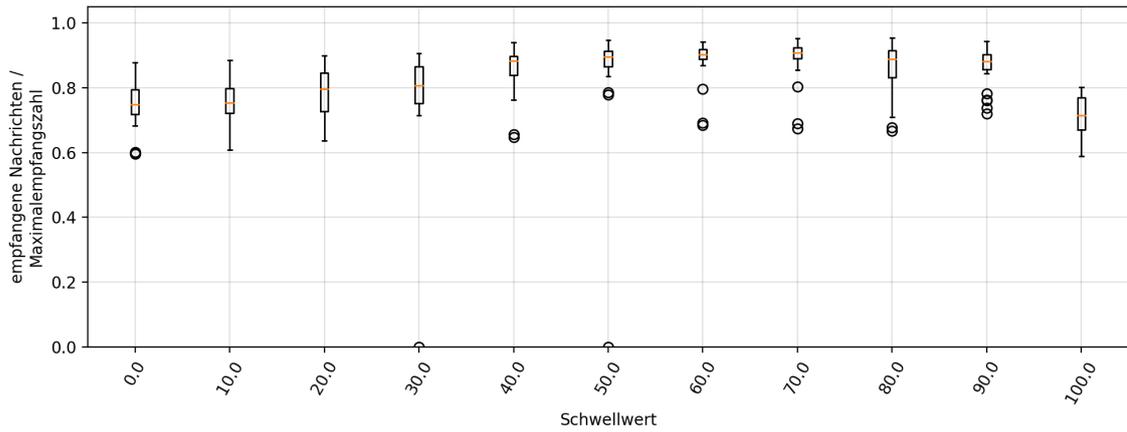
Ab einem Schwellwert von 80 fällt der Gütewert deutlich ab, es kommt also zu weniger Weiterleitungen. Die Versorgung sinkt ebenfalls leicht und hat eine, im Vergleich zu den Nachbarwerten, große Box. Eine mögliche Erklärung wäre, dass hier wieder ein Kipppunkt erreicht ist, nämlich das die Verbindung zwischen Knoten 1 und 5 nicht mehr als 1-Hop-Nachbarschaft gezählt wird. Bei kleineren Schwellwerten gab es 2 Weiterleitungsoptionen: Entweder Knoten 2 leitet für Knoten 6 Broadcast-Nachrichten weiter und Knoten 1 nochmal für Knoten 5, oder Knoten 1 leitet weiter für Knoten 5 und 6 und 2 gar nicht. Mit einem Schwellwert von 80 wird Knoten 5 vollständig isoliert und wird nur noch indirekt versorgt. Knoten 1 und Knoten 2 leiten Broadcast-Nachrichten ausschließlich für Knoten 6 weiter.

Bei dem Schwellwert 100 wird kein Nachbar als solcher gezählt und es kommt zu keinen Weiterleitungen mehr.

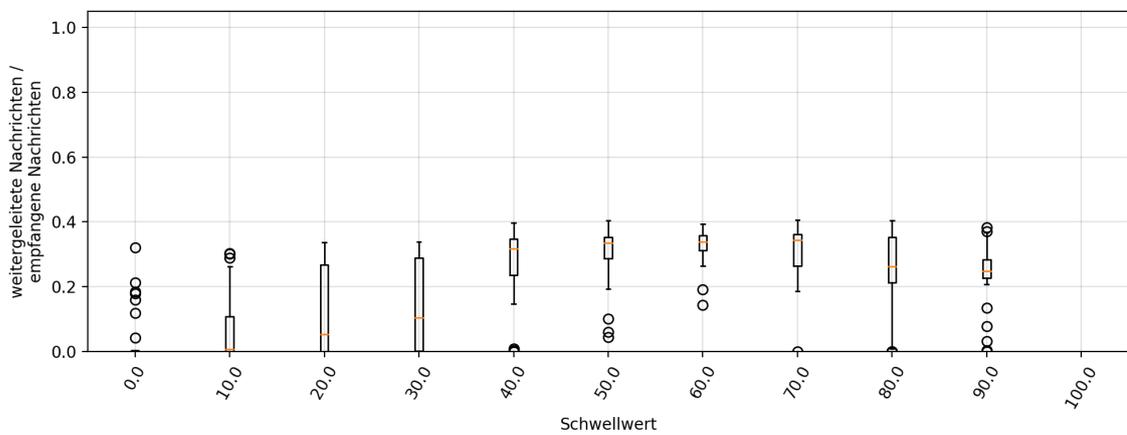
Im Vergleich zu dem 5-Knoten-Topologie Experiment ohne Nachbarschaftsschwelle (siehe Abschnitt 6.1.4) kann hier mit einem Schwellwert von 50 bis 70 eine stabile Versorgung, vergleichbar mit der von Gossiping, bei geringer Güte erreicht werden.

dNABB

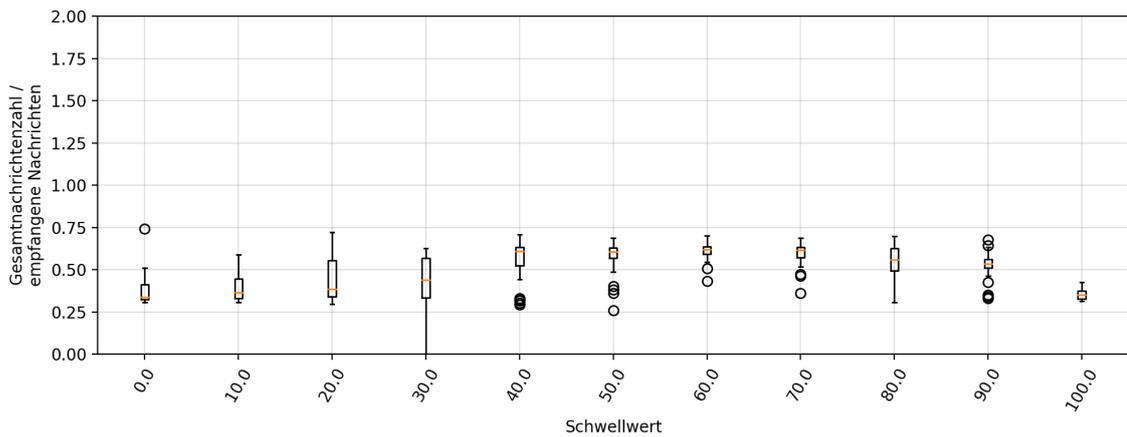
Die Ergebnisse zu dNABB befinden sich im Anhang, Abbildung A.15. Die Verbindungsqualitäten zwischen den Knoten 3 und 5, sowie 3 und 6 waren während der Durchführung dieses Experimentes besser als geplant. Deswegen lässt sich schwer eine Aussage über die Wirkung der Nachbarschaftsschwelle machen. (Dass es keinen Kipppunkt bei Schwellwerten bis 60 gibt, zu erkennen an den Boxhöhen der Güte, deutet darauf hin, dass alle Verbindungen deutlich bessere Qualität hatten).



a) Versorgung



b) Güte



c) Aufwand

Abbildung 6.25: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 5 Knoten bei -10 dBm Sendeleistung und eingestellter Nachbarschaftsschwelle

6.4.2 Nachbarschaftsschwelle mit 8 Knoten

Das hier vorgestellte Experiment wurde mit der 8 Knoten Topologie bei -10 dBm Sendeleistung durchgeführt. Es wurde zusätzlich mit 0 dBm und -15 dBm durchgeführt, die Effekte der Nachbarschaftsschwelle wurden bei diesen Experimenten aber nicht deutlich. Die Ergebnisse dazu befinden sich im Anhang A.5.3.

sNABB

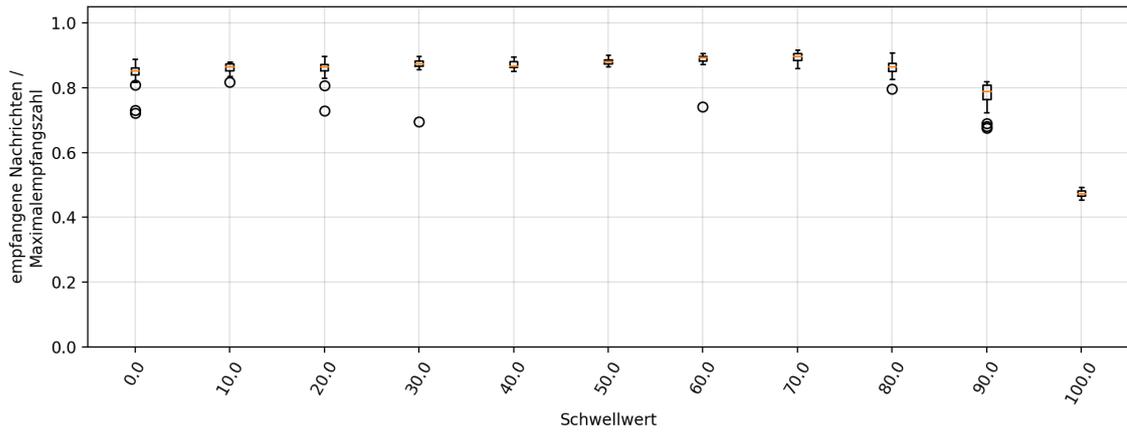
Die Ergebnisse des sNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.26 gegeben.

Die Versorgung liegt ohne Nachbarschaftsschwelle im Median bei 0,85. Ein leichter Aufwärtstrend für die Versorgung ist bei steigender Nachbarschaftsschwelle erkennbar. Ein Hochpunkt ist bei einem Schwellwert von 70 mit 0,90 erreicht. Steigt der Schwellwert weiter kommt es zu einem starken Abfall der Versorgung. Der Trend der Güte ist identisch, er steigt bis zu einem Schwellwert von 70 und fällt dann wieder ab. Dass Güte und Versorgung parallel steigen ist ein Hinweis darauf, dass Nachbarschaften mit schwachen Verbindungen durch die Nachbarschaftsschwelle negiert werden und durch eine zusätzliche Wiederholung der Broadcast-Nachricht die Wahrscheinlichkeit einer Versorgung gesteigert wird. Ab einem Schwellwert von 80 wird ein Kipppunkt überschritten. Ab hier werden wahrscheinlich zu viele Nachbarschaften negiert und wichtige Weiterleitungen bleiben aus.

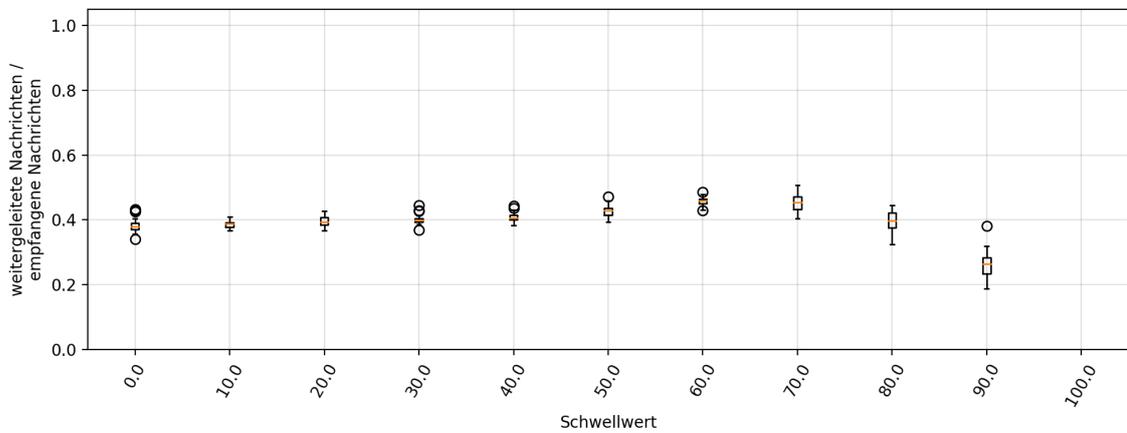
dNABB

Die Ergebnisse des dNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.27 gegeben.

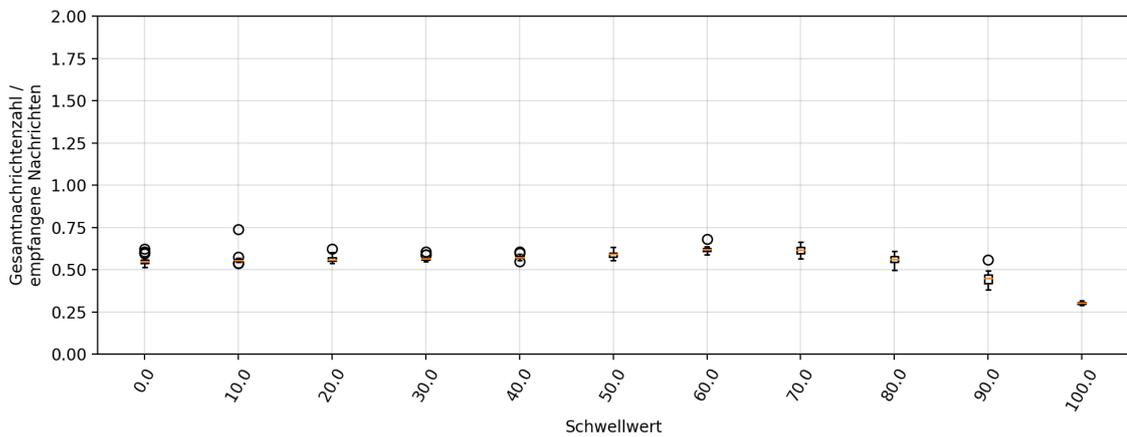
Die Ergebnisse für dNABB gleichen denen von sNABB. Der Hochpunkt des Medians der Versorgung liegt diesmal bei 0,92 bei einem Schwellwert von 50. Auch die Güte hat hier den höchsten Median. Ab einem Schwellwert von 70 fallen Güte und Versorgung wieder deutlich ab. Die Erklärungen dafür sind dieselben wie bei sNABB.



a) Versorgung

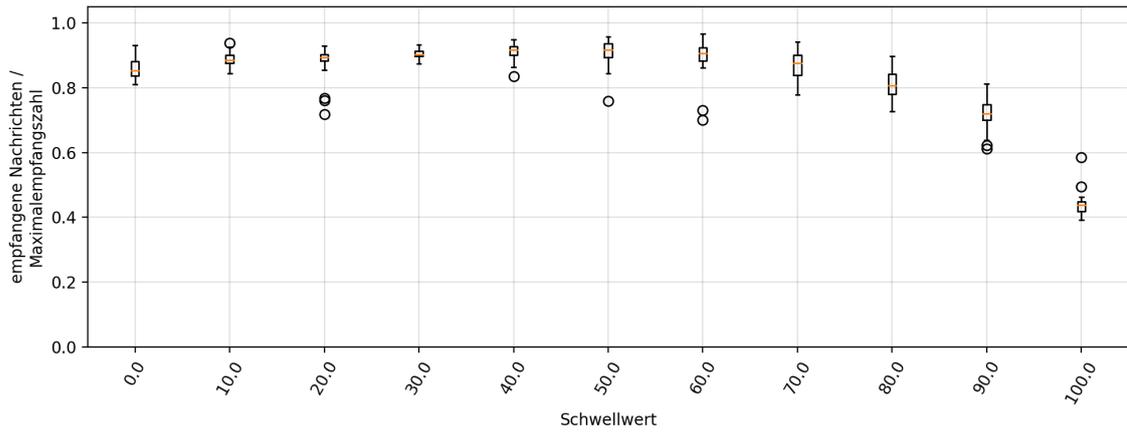


b) Güte

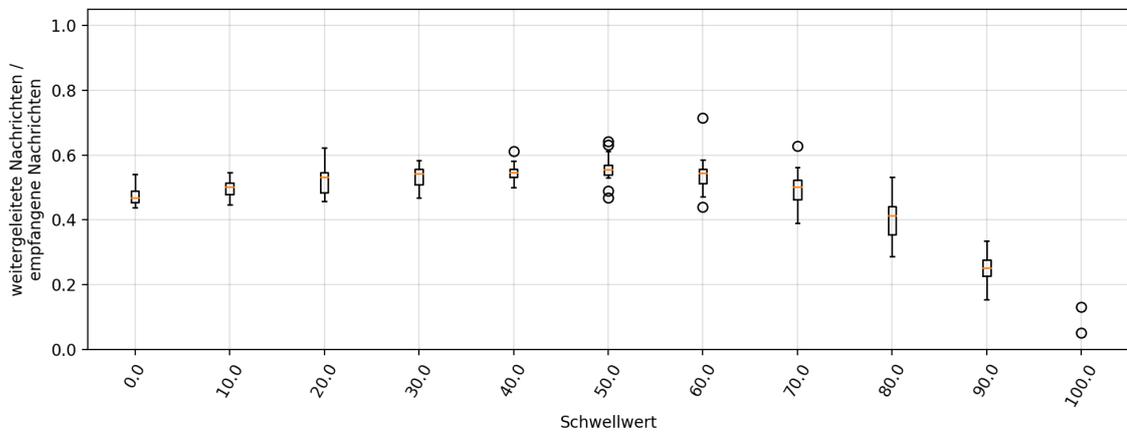


c) Aufwand

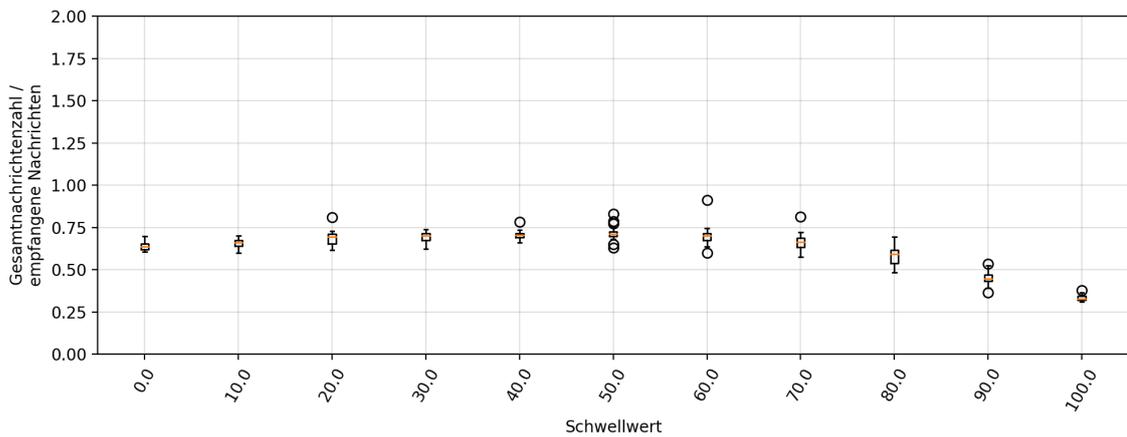
Abbildung 6.26: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 8 Knoten bei -10 dBm Sendeleistung und eingestellter Nachbarschaftsschwelle



a) Versorgung



b) Güte



c) Aufwand

Abbildung 6.27: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 8 Knoten bei -10 dBm Sendeleistung und eingestellter Nachbarschaftsschwelle

6.4.3 Flaschenhalserkennung mit 8 Knoten

Für die Flaschenhalserkennung ließ sich innerhalb des Testbeds keine Topologie konstruieren, mit der sich die Eigenschaften der Modifikation mit einfacher Topologie gut zeigen ließen. Deswegen werden hier nur die Ergebnisse der 8-Knoten-Topologie vorgestellt. Bei diesen Experimenten ist eine Nachbarschaftsschwelle von 80 eingestellt. Die Ergebnisse der Flaschenhalserkennung sind bei einem Schwellwert von 0 und 80 identisch. Bei 0 ist die Flaschenhalserkennung deaktiviert und bei 80 ist sie mit dem Nachbarschaftsschwellwert identisch und keine Verbindung fällt mehr unter die Flaschenhalserkennung.

Knoten 4 kann bei dieser Topologie als Flaschenhalsknoten dienen, da alle eingehenden Verbindungen zu ihm unter 0,80 liegen (genauer Knoten 7 mit 0,29, Knoten 5 mit 0,42 und Knoten 8 mit 0,20, nach der Beispieltopologie mit -15 dBm, Anhang A.4). Theoretisch könnte hinter Knoten 4 ein weiteres Teilnetz liegen, welches nur durch diesen versorgt werden kann. Die Isolation dieses Knotens durch die Nachbarschaftsschwelle wäre dann ungünstig. Da Knoten 4 in diesem Experiment somit eine Sonderrolle einnimmt, werden die Ergebnisse für ihn nochmal in Abbildung 6.30 und 6.31 gesondert dargestellt.

sNABB

Die Ergebnisse des sNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.28 und speziell für Knoten 4 in Abbildung 6.30 gegeben.

Ohne Flaschenhalserkennung wird eine Versorgung von 0,53 erreicht. Die Versorgung steigt auf bis zu 0,66 mit Flaschenhalserkennung. Gleichzeitig steigt auch der Gütewert stark an. Das lässt sich beispielsweise für den Schwellwert von 20 erklären. Für einen Knoten bei dem alle eingehende Verbindungen unterhalb der Nachbarschaftsschwelle von 80 liegen leiten alle Nachbarknoten, deren zu diesem Knoten ausgehende Verbindung über dem Flaschenhalschwellwert von 20 liegen, die Broadcast-Nachricht weiter. Je weiter der Schwellwert steigt, desto geringer wird der Einfluss durch die Flaschenhalserkennung. Versorgung und Güte nehmen langsam wieder ab.

Für Flaschenhalsknoten 4 kann die Versorgung stark verbessert werden. Ohne Flaschenhalserkennung lag die Versorgung im Median bei nur 0,18, mit Flaschenhalserkennung konnte sie auf bis zu 0,51 gesteigert werden. Das liegt daran, dass alle drei eingehenden Verbindungen von Knoten 4 zwischen den Schwellwerten der Nachbarschaftsschwelle und der Flaschenhalserkennung lagen. Die hohen Boxhöhen bei der Güte deuten darauf hin, dass ausgehende Verbindungen von Knoten 4 um die Schwellwerte der Modifikationen schwanken.

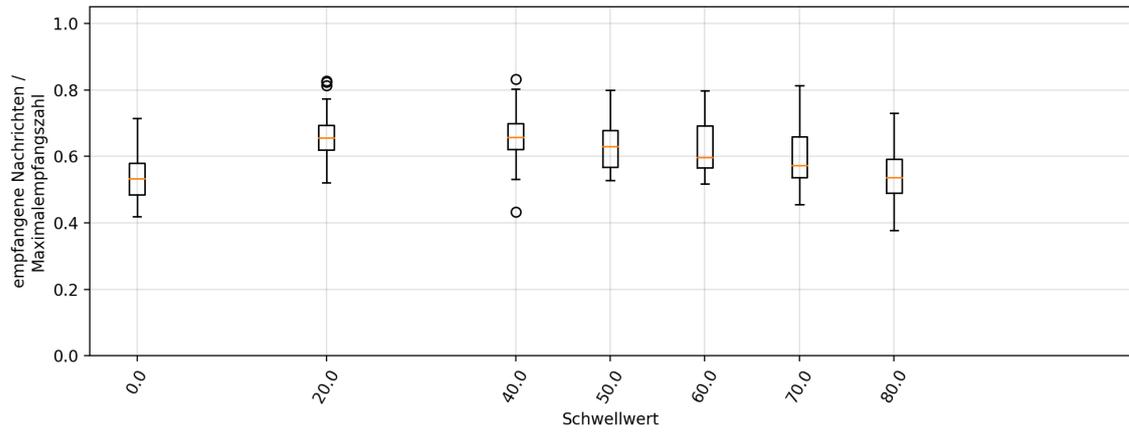
dNABB

Die Ergebnisse des dNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.29 und speziell für Knoten 4 in Abbildung 6.31 gegeben.

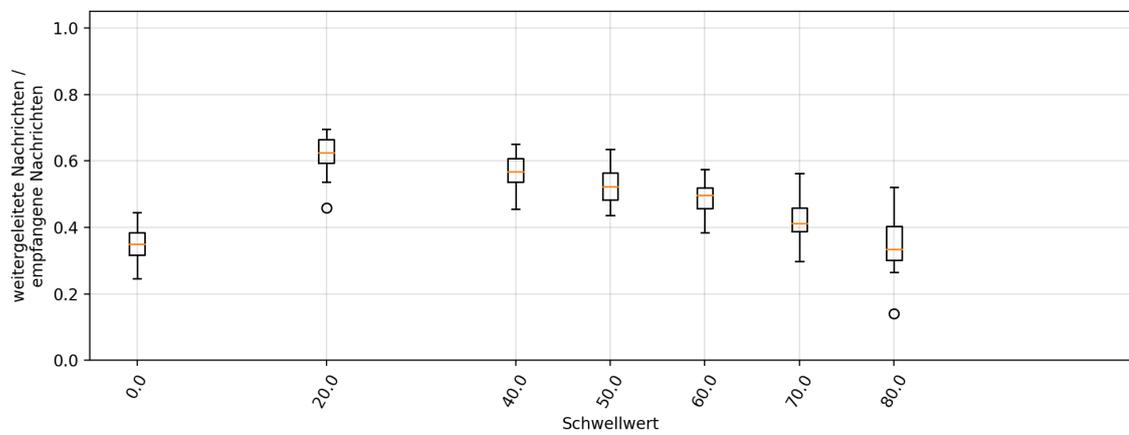
Versorgung und Güte (ohne Flaschenhalserkennung) liegen hier deutlich höher als bei dem sNABB Experiment. Erklären ließe sich das damit, dass die Verbindungsqualität im Netzwerk insgesamt höher war und mehr Verbindungen über der Nachbarschaftsschwelle lagen und der Einfluss der Servicequalität bei dieser verbindungsärmeren Topologie eine größere

Rolle spielte. Die Trends bei Versorgung und Güte sind dieselben wie beim vorhergehenden Experiment, die Ausprägung ist nur nicht ganz so stark.

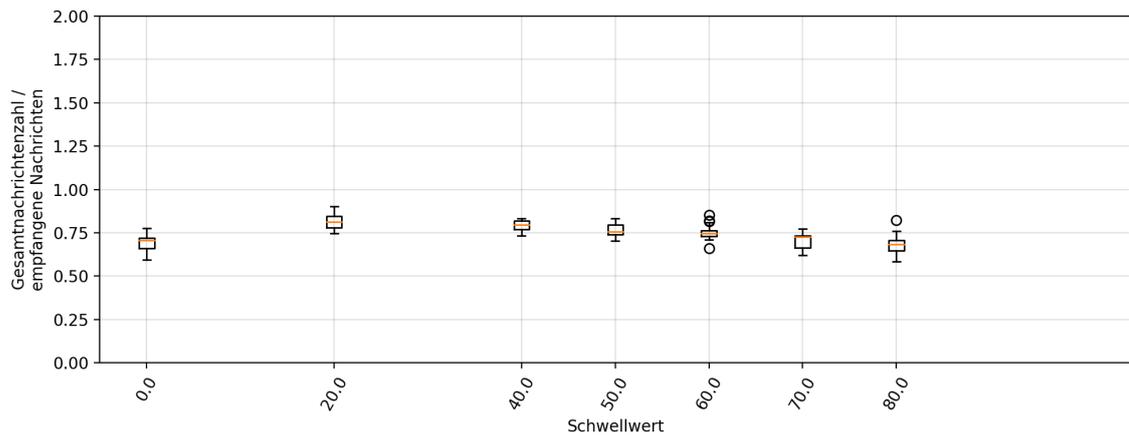
Auch hier kann die Versorgung des Flaschenhalsknotens mit der Flaschenhalserkennung von 0,24 auf 0,66 um 42 Prozentpunkte gesteigert werden, während sie im gesamten Netzwerk nur um neun Prozentpunkte stieg.



a) Versorgung

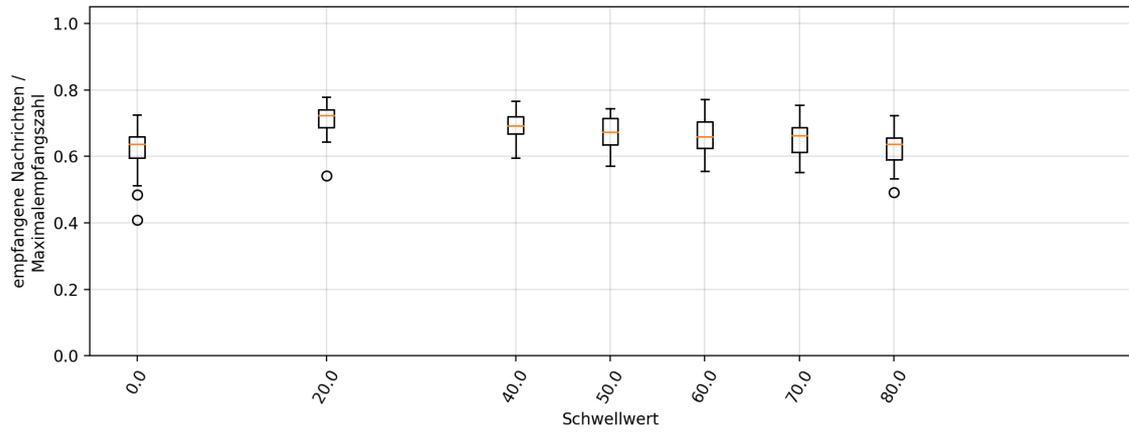


b) Güte

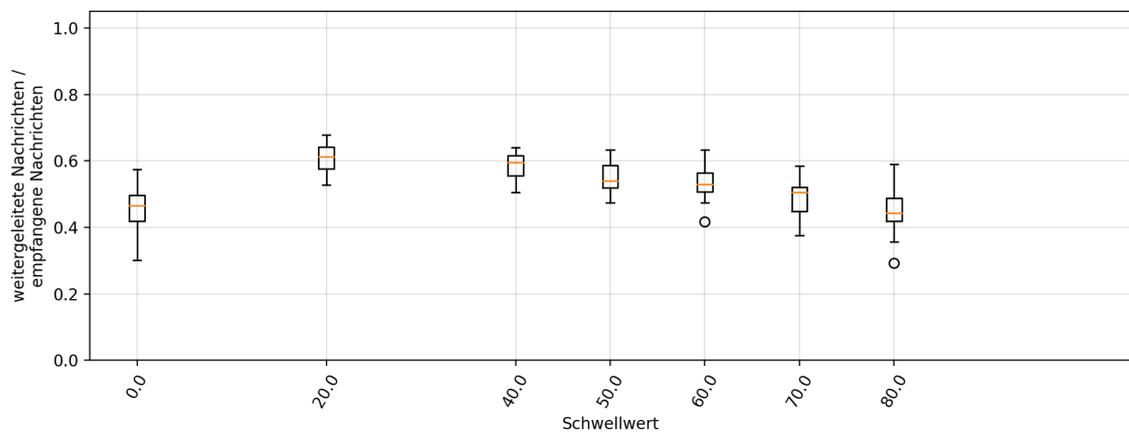


c) Aufwand

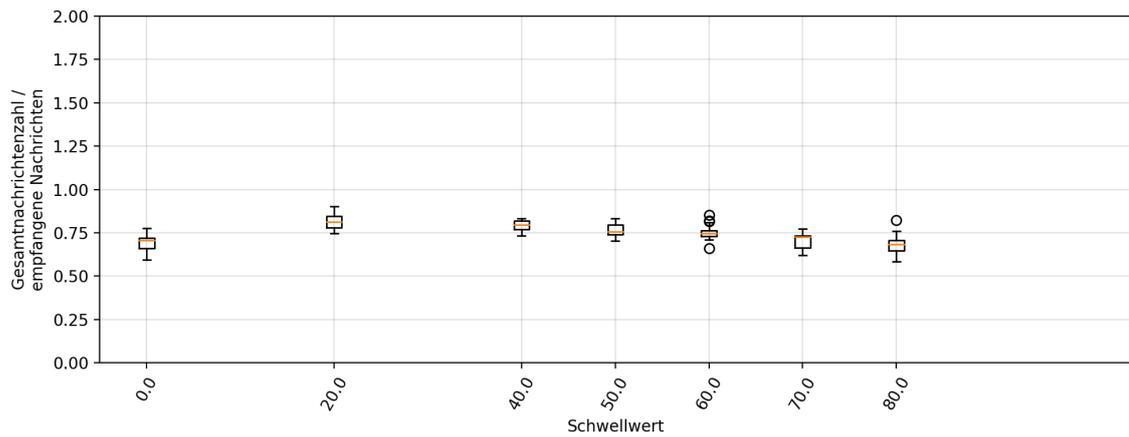
Abbildung 6.28: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 8 Knoten bei -15 dBm Sendeleistung und eingestellter Flaschenhalserkennung



a) Versorgung

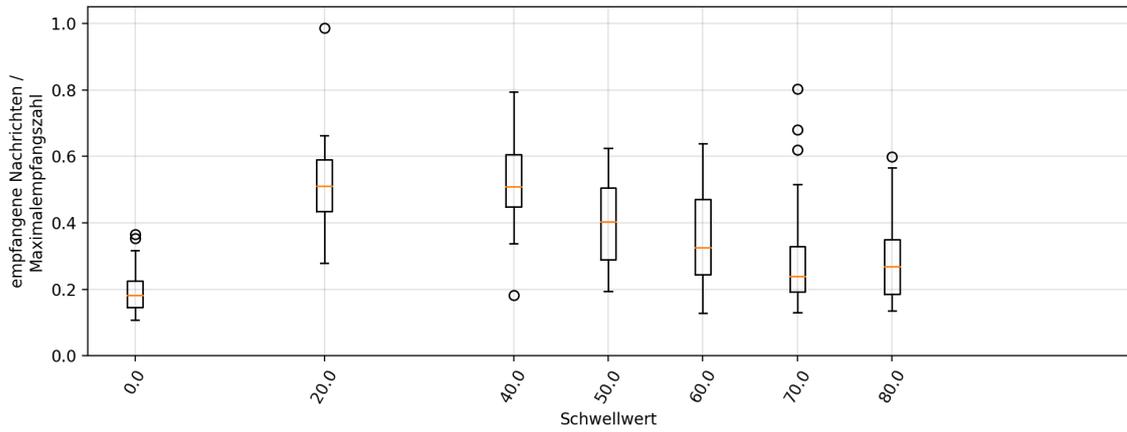


b) Güte

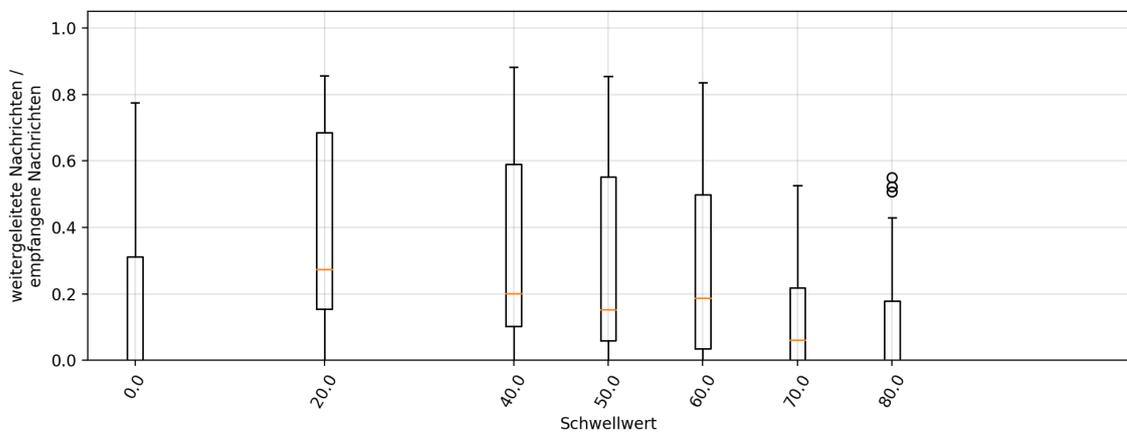


c) Aufwand

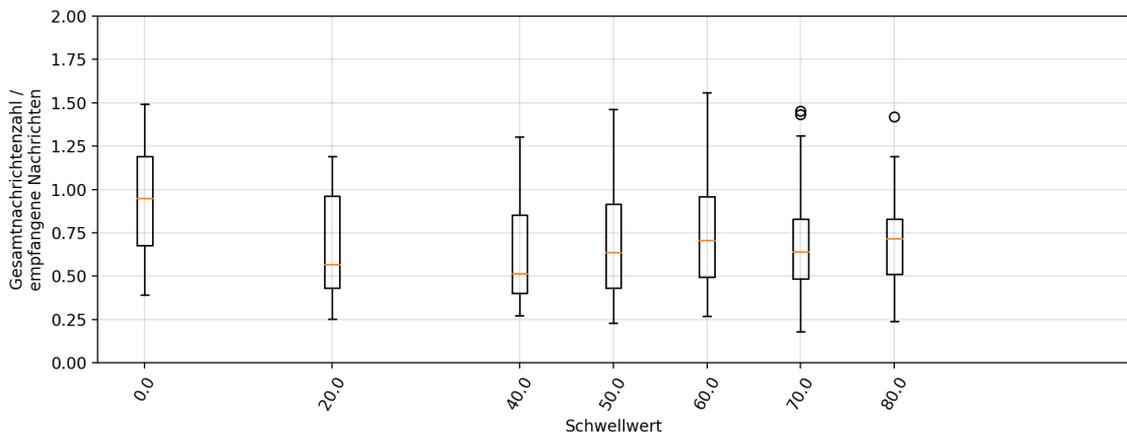
Abbildung 6.29: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 8 Knoten bei -15 dBm Sendeleistung und eingestellter Flaschenhalserkennung



a) Versorgung

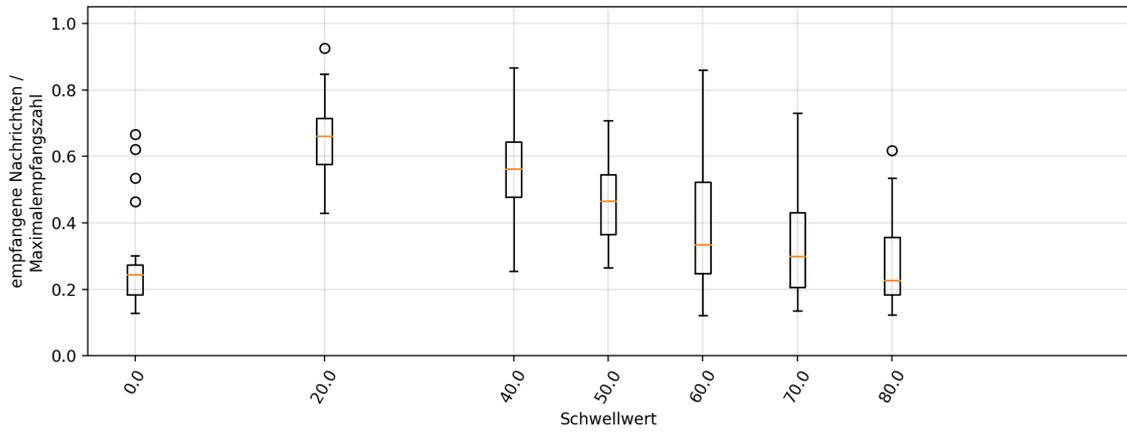


b) Güte

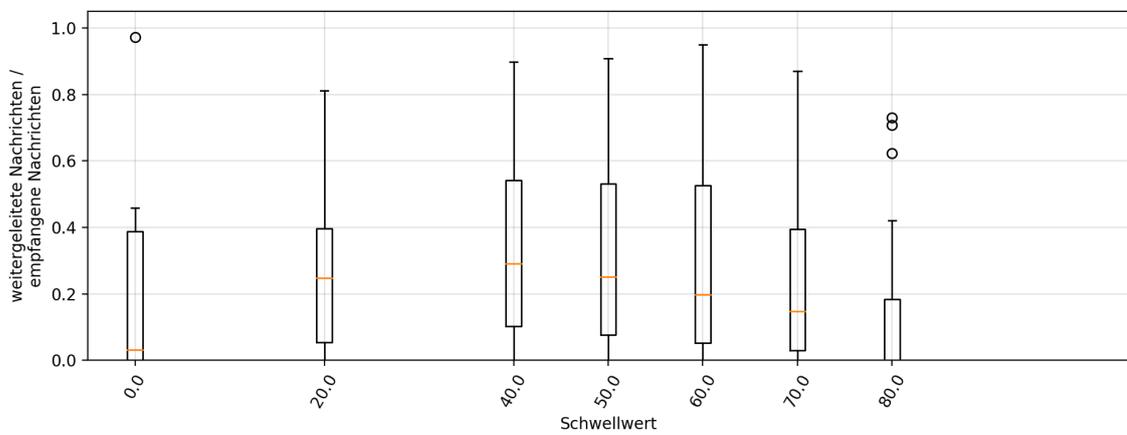


c) Aufwand

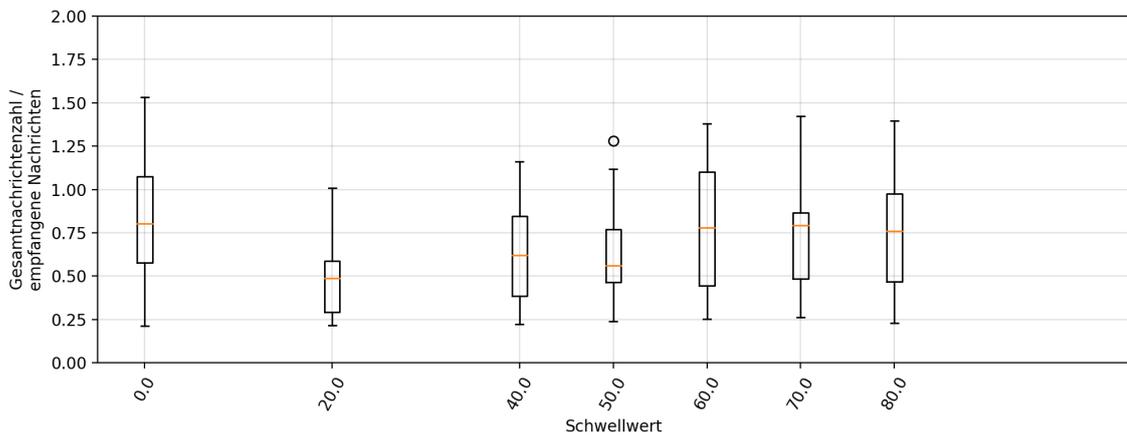
Abbildung 6.30: Die Ergebnisse der Experimente für Knoten 4 mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 8 Knoten bei -15 dBm Sendeleistung und eingestellter Flaschenhalserkennung



a) Versorgung



b) Güte



c) Aufwand

Abbildung 6.31: Die Ergebnisse der Experimente für Knoten 4 mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 8 Knoten bei -15 dBm Sendeleistung und eingestellter Flaschenhalserkennung

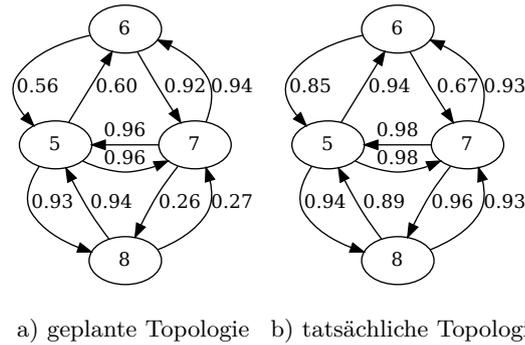


Abbildung 6.32: Die 4-Knoten-Topologie, wie sie erwartet wurde und wie sie sich dann tatsächlich einstellte.

6.4.4 Verbindungsqualitätsabhängiges Timeout mit 4 Knoten

Bei diesem Experiment kam es leider zu einer unerwarteten Änderung der Verbindungsqualitäten der Topologie. Daher sind die Ergebnisse der zwei Experimente hierzu nicht aussagekräftig. Das Problem lässt sich in Abbildung 6.32 erkennen. In der geplanten Topologie, einer Untermenge der -10 dBm 8-Knoten-Topologie (Abbildung A.3), haben die beiden Weiterleitungsknoten (5 und 7) jeweils einen großen Unterschied in der Verbindungsqualität zu ihren Zielknoten (6 und 8). So beträgt beispielsweise die Differenz der Verbindungsqualitäten der Knoten 5 zu 8 und 7 zu 8 $0,67\%$ ³ in der geplanten Topologie. In der tatsächlichen Topologie dann aber nur noch $0,02\%$.⁴ Dadurch kommen die Vorteile des Verbindungsqualitätsabhängigen Timeouts in diesen Experimenten nicht zum Tragen. Die Ergebnisse zu diesen beiden Experimenten befinden sich im Anhang, Abbildung A.20 und A.21.

6.4.5 Verbindungsqualitätsabhängiges Timeout mit 8 Knoten

Diese Experimente wurden mit einer Sendeleistung von -15 dBm Sendeleistung durchgeführt. Eine beispielhafte Topologie befindet sich im Anhang A.4.

sNABB

Die Ergebnisse des sNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.33 gegeben.

Die Versorgung steigt um 2 Prozentpunkte mit eingestelltem Verbindungsqualitätsabhängigen Timeout. Gleichzeitig springt auch die Güte von 0,41 auf 0,49. Die Ergebnisse bleiben mit eingestelltem Verbindungsqualitätsabhängigen Timeout unabhängig vom Verzögerungsfaktor relativ konstant.

Eine mögliche Erklärung für den Sprung in der Güte wäre, dass ohne Verbindungsqualitätsabhängigen Timeout die Knoten mit hohen Ausgangsgraden häufiger weiterleiten. Mit Verbindungsqualitätsabhängigen Timeout haben diese Knoten dann wahrscheinlicher einen

³ $0,93 - 0,26 = 0,67$

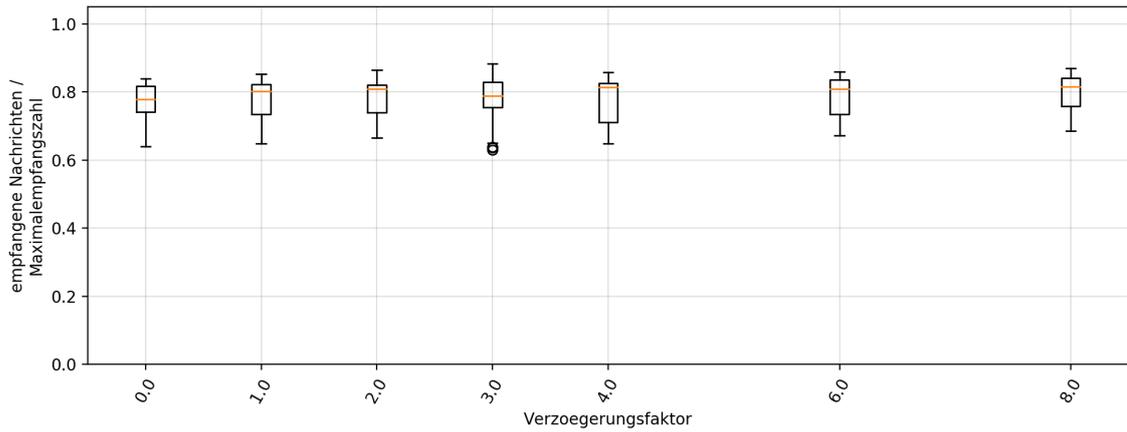
⁴ $0,96 - 0,94 = 0,02$

Nachbarn, zu dem sie eine schwache Verbindung haben. Die Sendeverzögerung ist in Abhängigkeit von dem Nachbarn mit der schlechtesten Verbindung implementiert. Dadurch werden Weiterleitungen eventuell eher durch Knoten mit geringeren Knotengraden, aber höheren minimalen ausgehenden Verbindungsqualitäten vorgenommen.

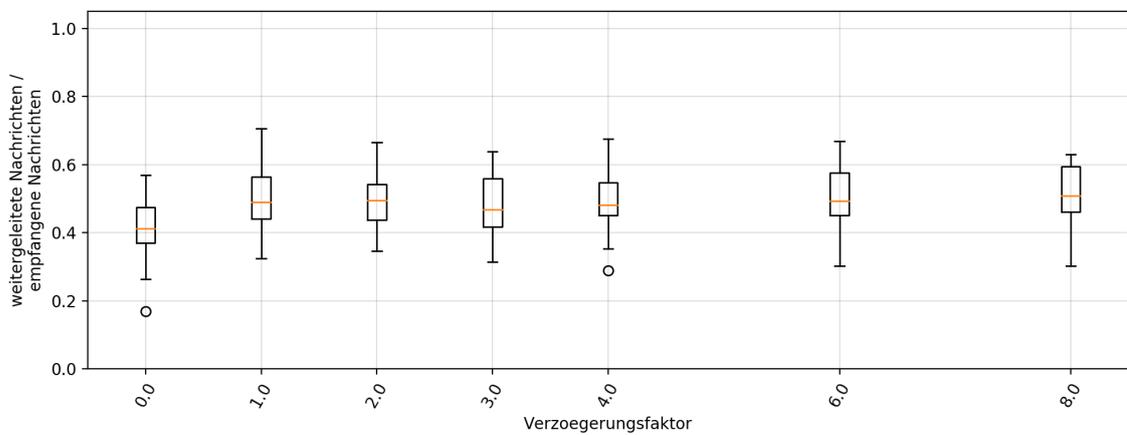
dNABB

Die Ergebnisse des dNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.34 gegeben.

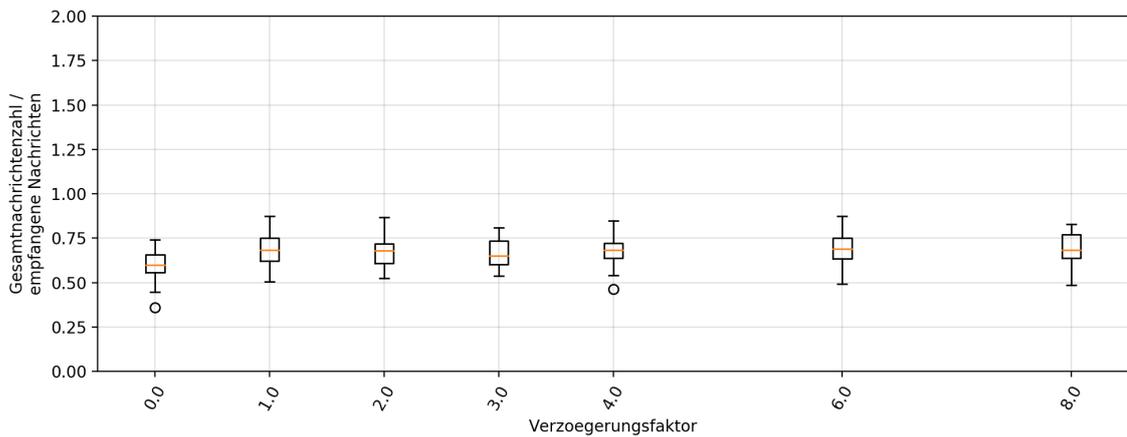
Die Ergebnisse des dNABB Experiments sind mit denen des sNABB Experiments ähnlich, die möglichen Schlussfolgerungen identisch.



a) Versorgung

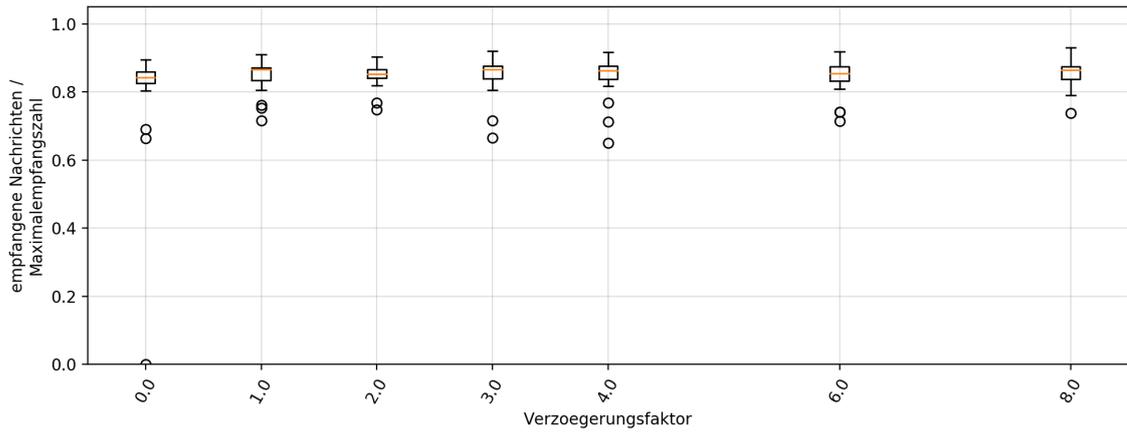


b) Güte

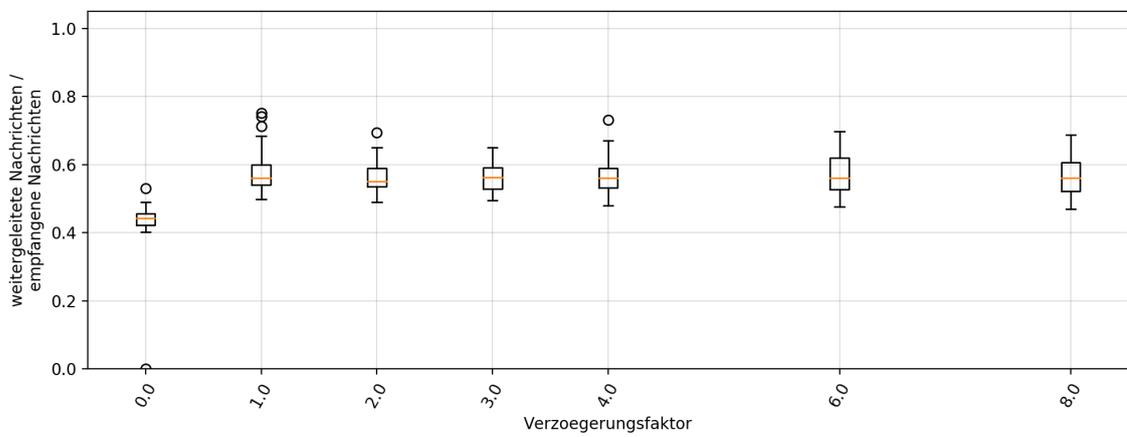


c) Aufwand

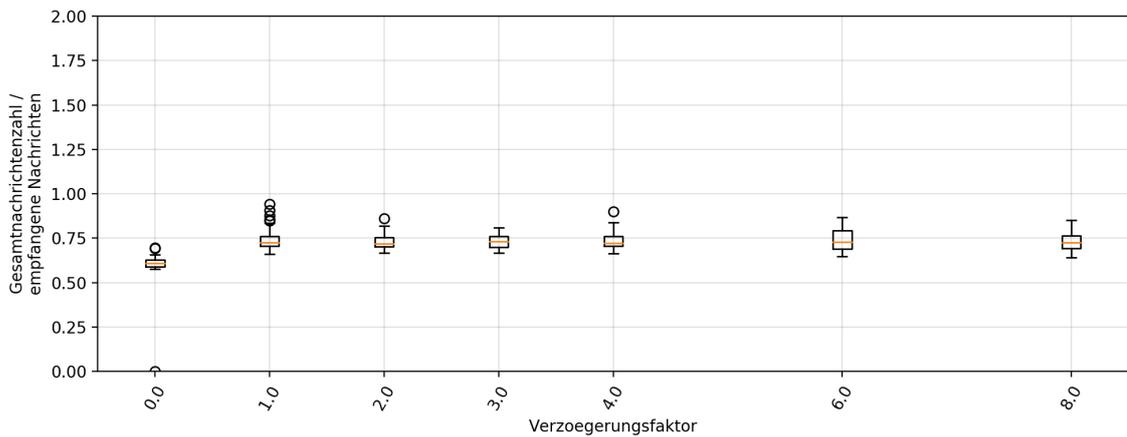
Abbildung 6.33: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 8 Knoten bei -15 dBm Sendeleistung und eingestelltem Verbindungsqualitätsabhängigen Timeout



a) Versorgung



b) Güte



c) Aufwand

Abbildung 6.34: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 8 Knoten bei -15 dBm Sendeleistung und eingestelltem Verbindungsqualitätsabhängigen Timeout

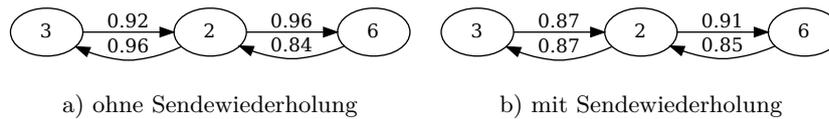


Abbildung 6.35: Die 3 Knotentopologie, Momentaufnahmen mit annotierten Verbindungsqualitäten während zweier Experimente, einmal ohne Sendewiederholung und einmal mit angestrebter Empfangswahrscheinlichkeit von 0,99. Die Verbindungsqualität nimmt insgesamt ab, wenn die Sendewiederholung eingestellt ist.

6.4.6 Sendewiederholung mit 3 Knoten

Bei Experimenten der Sendewiederholung bleibt die Güte auf einem Level, da die Sendewiederholung nicht die Weiterleitungsentscheidung beeinflusst, sondern wie oft eine Broadcast-Nachricht gesendet wird. Deswegen wird bei Experimenten mit Sendewiederholung die Betrachtung des Aufwands interessant. Der Aufwand gibt das Verhältnis aller (auch doppelt) versendeter Broadcast-Nachrichten zu empfangenen Broadcast-Nachrichten wieder. Die Abbildung 6.35 zeigt zwei Topologien aus den Experimenten. Es wird deutlich, dass die Sendewiederholung die Verbindungsqualität negativ beeinflusst. Erklären lässt sich dies damit, dass die Wahrscheinlichkeit für Kollisionen im Übertragungsmedium durch das erhöhte Nachrichtenaufkommen steigt. Diesem Umstand könnte durch eine Verlängerung der Experimentphase und damit einer Reduktion der Kollisionswahrscheinlichkeit begegnet werden.

sNABB

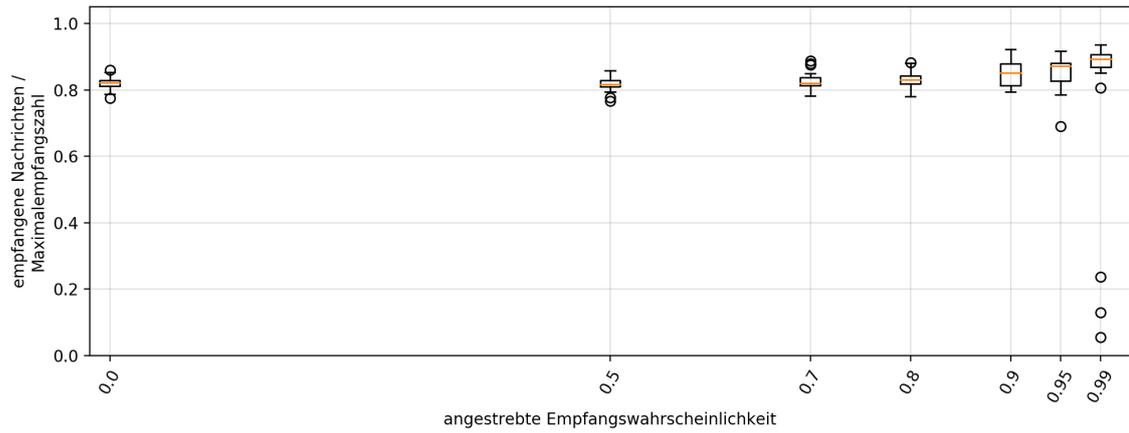
Die Ergebnisse des sNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.36 gegeben.

Die Versorgung kann durch die Sendewiederholung leicht gesteigert werden. Bei einer angestrebten Empfangswahrscheinlichkeit von 0,99 beträgt die Versorgung 0,89 im Gegensatz zu 0,82 ohne Sendewiederholung. Die Güte bleibt während des Experiments auf einem Level von 0,5, was dem erwarteten Wert für die Topologie entspricht. Der Aufwand bleibt bis zu einer angestrebten Empfangswahrscheinlichkeit von 0,8 konstant leicht über 1. Die Sendewiederholung greift hier noch nicht, da alle Verbindungsqualitäten über der jeweiligen angestrebten Empfangswahrscheinlichkeit liegen. Der Median des Aufwands steigt ab einer angestrebten Empfangswahrscheinlichkeit von 0,9 auf 1,32 und erreicht seinen Hochpunkt mit 2,03 bei 0,99 angestrebter Empfangswahrscheinlichkeit.

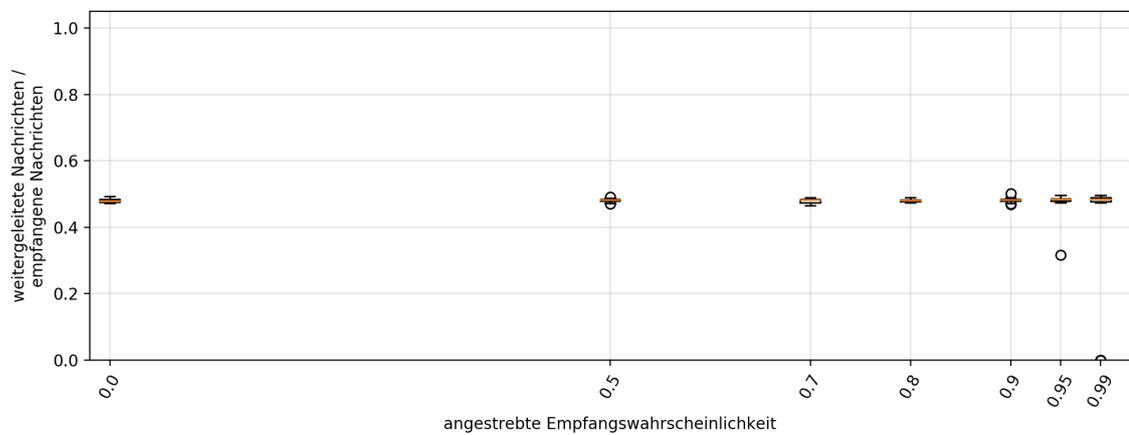
dNABB

Die Ergebnisse des dNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.37 gegeben.

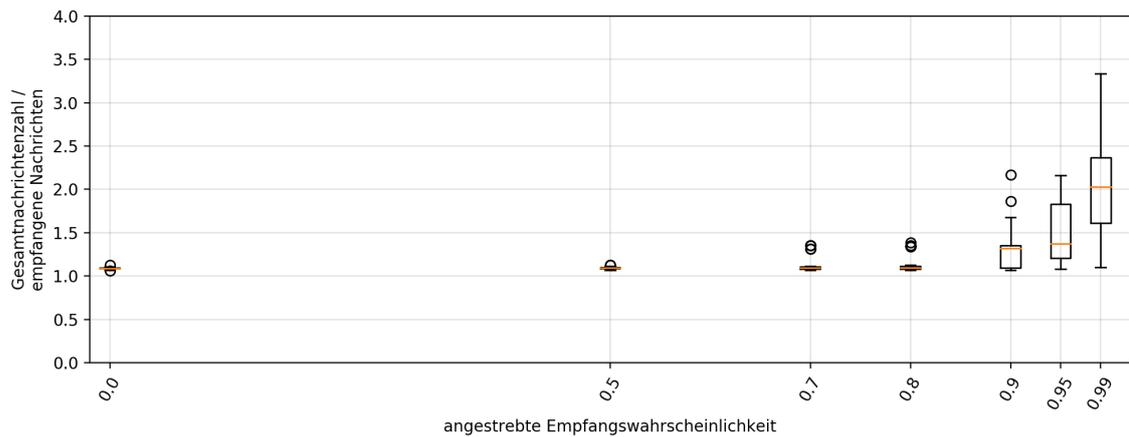
Die Ergebnisse des dNABB Experiments sind mit denen des sNABB Experiments ähnlich, die möglichen Schlussfolgerungen identisch.



a) Versorgung

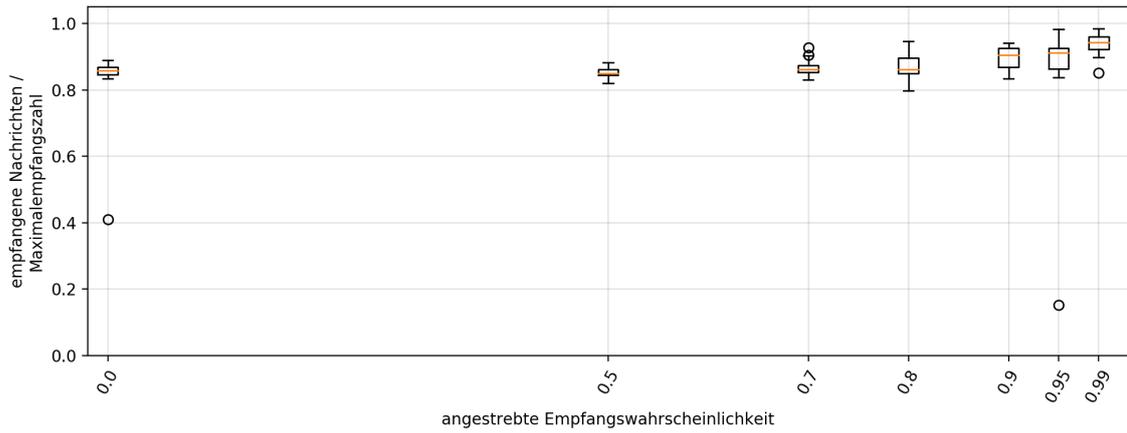


b) Güte

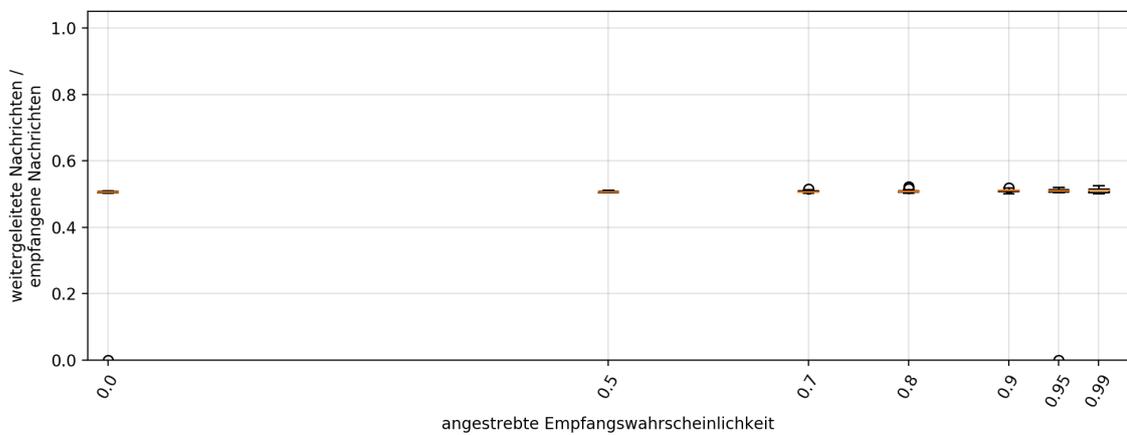


c) Aufwand

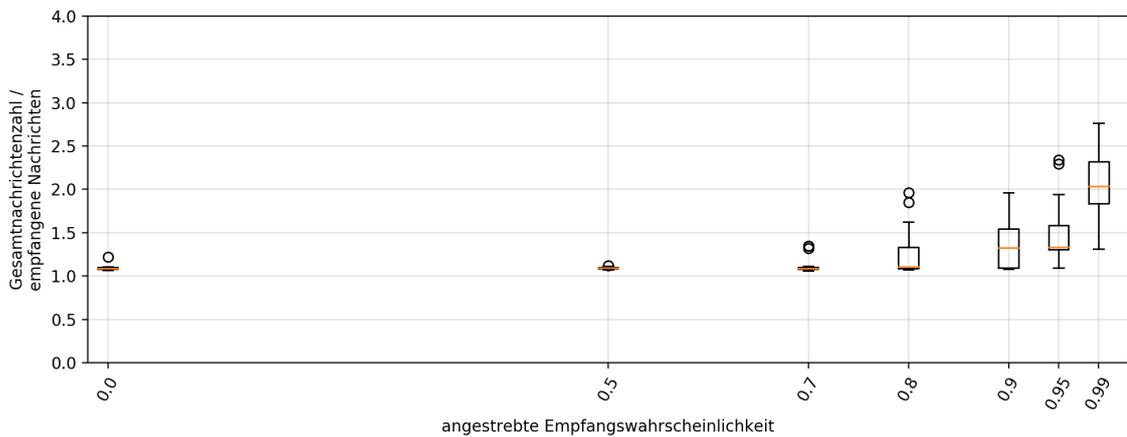
Abbildung 6.36: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 3 Knoten bei -5 dBm Sendeleistung und eingestellter Sendewiederholung



a) Versorgung



b) Güte



c) Aufwand

Abbildung 6.37: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 3 Knoten bei bei -5 dBm Sendeleistung und eingestellter Sendewiederholung

6.4.7 Sendewiederholung mit 8 Knoten

Die Experimente wurden auf der 8-Knoten-Topologie (Abbildung A.4) mit -15 dBm Sendeleistung durchgeführt.

sNABB

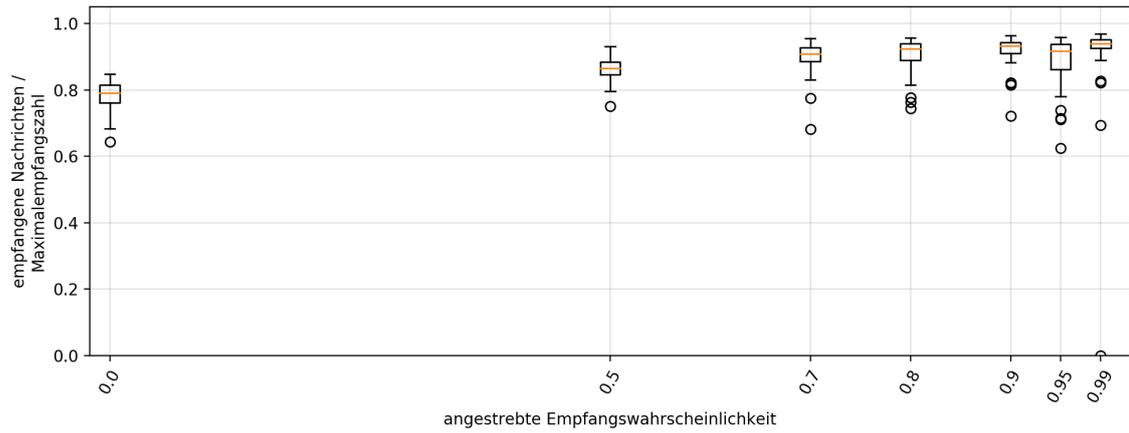
Die Ergebnisse des sNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.38 gegeben.

Die Versorgung liegt ohne Sendewiederholung bei 0,79 und kann mit Sendewiederholung auf bis zu 0,94 gesteigert werden. Dafür steigt aber auch der Aufwand stark an. Liegt dieser bei 0,59 Nachrichtensendungen für jede empfangene Broadcast-Nachricht, verdoppelt sich die Anzahl der Sendungen fast, nur um eine Empfangswahrscheinlichkeit von 0,5 zu erreichen. Für eine angestrebten Empfangswahrscheinlichkeit von 0,99 liegt der Aufwand bei 2,03, es wird also mehr als das Dreifache der Sendungen benötigt.

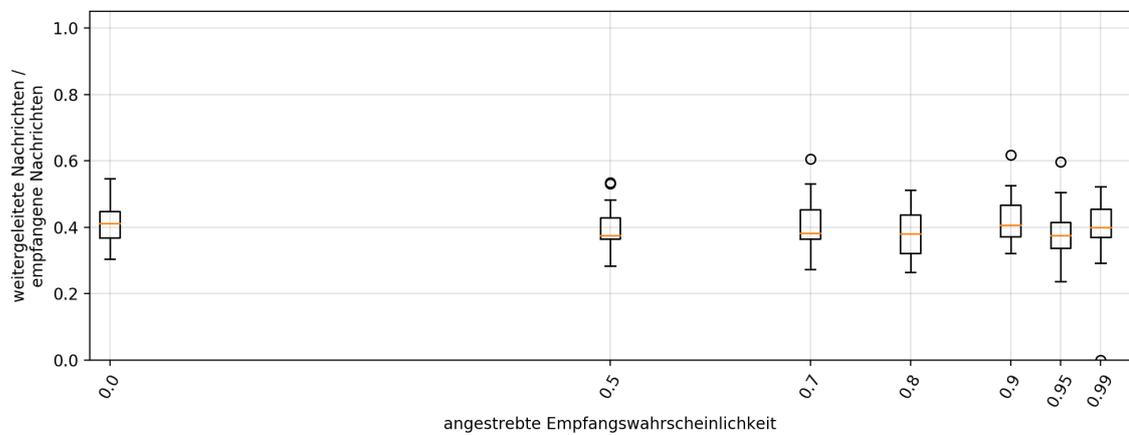
dNABB

Die Ergebnisse des dNABB-Experimentes sind in Abbildung 6.39 gegeben.

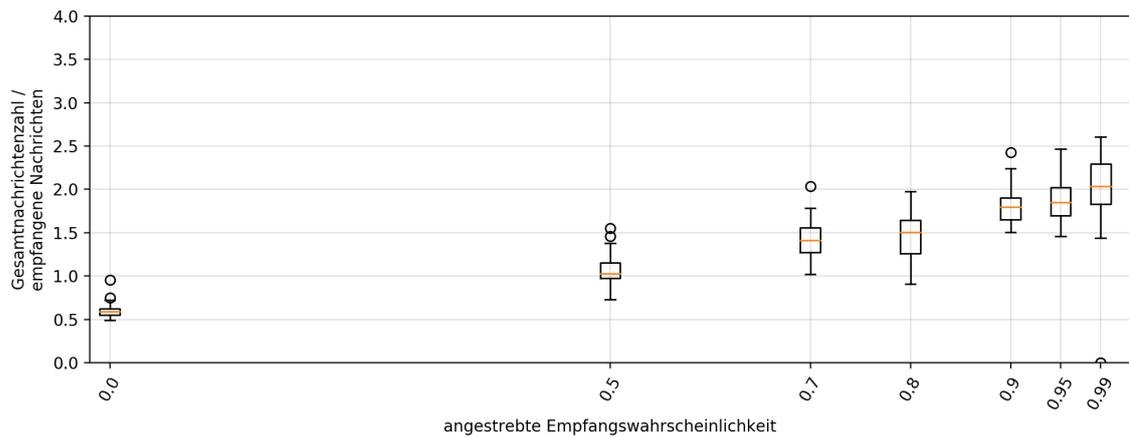
Die Versorgung kann von 0,71 auf bis zu 0,88 gesteigert werden, durch die Nutzung der Sendewiederholung. Bei hohen angestrebten Empfangswahrscheinlichkeiten fangen die Ergebnisse im Median an zu schwanken, so liegt die Versorgung mit einer angestrebten Empfangswahrscheinlichkeit von 0,99 mit 0,85 drei Prozentpunkte unter dem Maximalwert von 0,88. Das könnte daran liegen, dass die Verbindungsqualitäten im Netzwerk durch zu viele Sendungen negativ beeinflusst werden. Je höher die angestrebten Empfangswahrscheinlichkeit gewählt wird, und damit indirekt die Versorgung, desto schwieriger wird es, eben diese Versorgung zu erreichen.



a) Versorgung

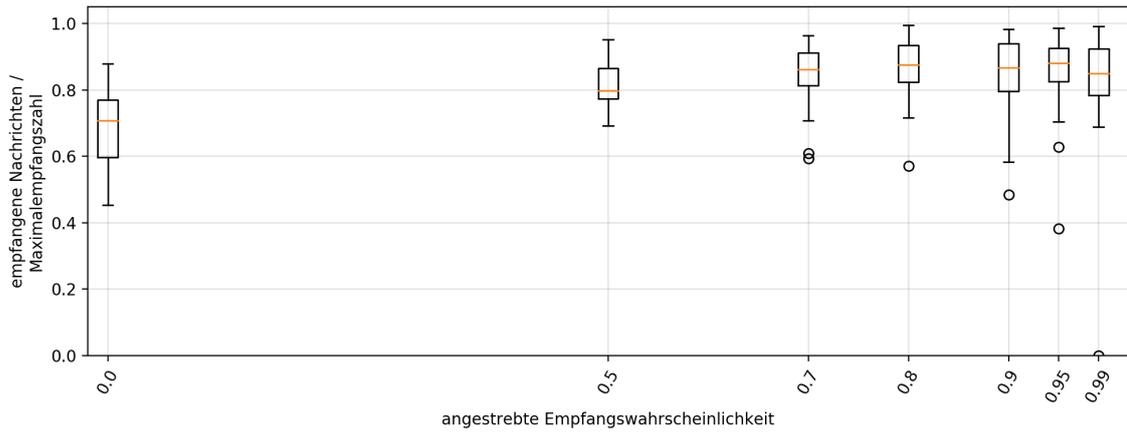


b) Güte

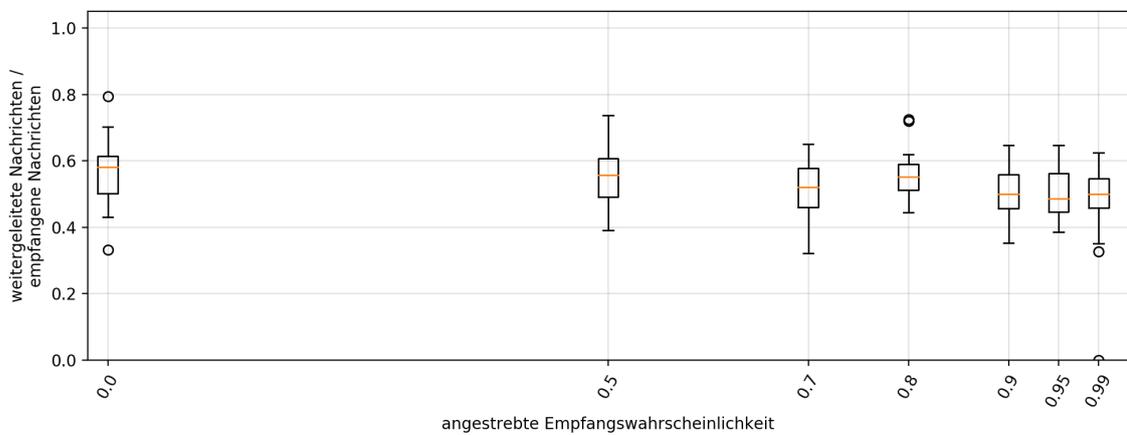


c) Aufwand

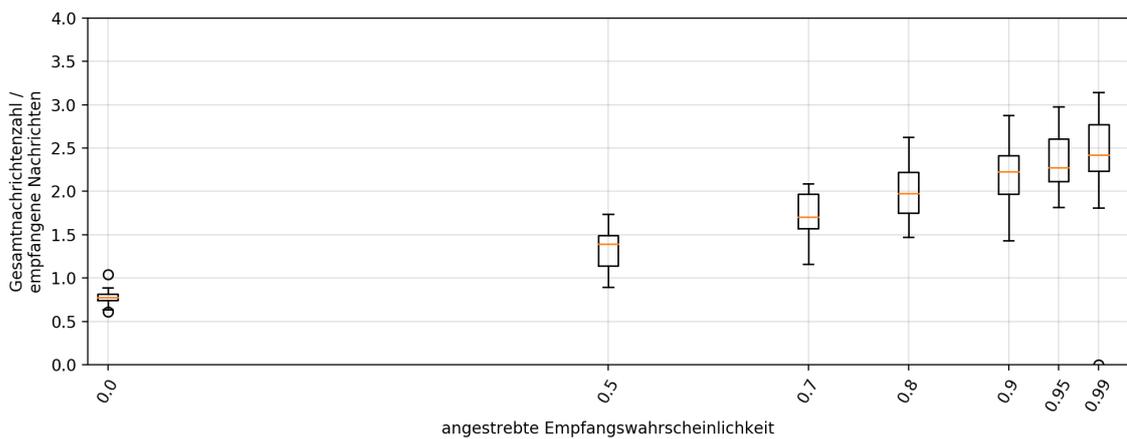
Abbildung 6.38: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 8 Knoten bei -15 dBm Sendeleistung und eingestellter Sendewiederholung



a) Versorgung



b) Güte



c) Aufwand

Abbildung 6.39: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 8 Knoten bei -15 dBm Sendeleistung und eingestellter Sendewiederholung

KAPITEL 7

Fazit

Die Ergebnisse der Experimente stützen die Ergebnisse der Simulation (Abschnitt 6.3). Die beiden NABB Protokolle erreichen im Vergleich mit Gossiping überwiegend eine hohe Versorgung bei einer deutlich niedrigeren Güte. Unterschiede in den Ergebnissen entstanden, da die Verbindungsqualität zwischen den Knoten des MIoT-Lab deutlich unter denen der Simulation lag. In Extremfällen blieb deswegen die erreichte Versorgung der NABB-Protokolle deutlich unter der Versorgung durch Gossiping zurück (Abschnitt 6.1.4). Ein weiterer Unterschied zwischen Experiment und Simulation ist, dass die maximal erreichte Versorgung durch Gossiping die der NABB-Protokolle übertreffen kann (Beispielsweise Abschnitt 6.2.2).

Verschiedene Lösungsstrategien für die Schwäche der NABB Protokolle, Verbindungen zwischen Knoten nur binär und nicht als fließend zu betrachten, wurden erarbeitet. Die Grundlage hierfür bildet die Einteilung der Knotenverbindungen in Reichweite Kategorien (Abschnitt 4) nach Schiller [7]. Die Messung der Verbindungsqualitäten zwischen den Knoten sorgt für einen kleinen Protokoll-Overhead. Die vier Lösungsstrategien waren:

- *Nachbarschaftsschwelle* - Nachbarschaft ist abhängig von der Verbindungsqualität zwischen zwei Knoten (Abschnitt 4.3)

Mit der Nachbarschaftsschwelle konnten erfolgreich die Nachteile durch niedrige Verbindungsqualitäten vermieden werden (Vergleiche Abschnitt 6.1.4 mit 6.4.1). Weiterhin konnte die Versorgung und damit die Verlässlichkeit des Protokolls (bei gleichzeitiger Steigerung der Güte) ebenfalls gesteigert werden (Abschnitt 6.4.2), indem die Weiterleitung der Broadcast-Nachrichten durch schwache Knotenverbindungen ignoriert und damit auf starke Knotenverbindungen gezwungen wurde.

- *Flaschenhalserkennung* - Erweiterung der Nachbarschaftsschwelle, versucht Versorgung von Flaschenhälsen im Netzwerk zu verbessern (Abschnitt 4.4)

Durch die Flaschenhalserkennung konnte die Versorgung eines (theoretischen) Flaschenhalsknotens bei eingestellter Nachbarschaftsschwelle deutlich gesteigert werden (Abschnitt 6.4.3). Dies wurde erreicht, indem seine direkten Nachbarn trotzdem für diesen Flaschenhalsknoten die Broadcast-Nachricht wiederholten, obwohl die Nachbarschaft unterhalb der Nachbarschaftsschwelle lag. Dabei stieg jedoch die Güte für das gesamte Netzwerk, bei lediglich moderater Steigerung der allgemeinen Versorgung,

stark an.

- *Sendewiederholung* - Broadcast-Nachrichten werden so oft wiederholt bis eine festgelegte Empfangswahrscheinlichkeit erreicht wurde (Abschnitt 4.2)

Durch die Sendewiederholung konnte die Versorgung zwar respektabel gesteigert werden, jedoch nur, indem ein Vielfaches der ursprünglichen Nachrichtensendungen vorgenommen wurde (Abschnitt 6.4.6 ff.). Da die Sendewiederholung das Problem des Broadcast Storms verschärft, sollte diese Option nur in Ausnahmefällen in Betracht gezogen oder ganz vermieden werden.

- *Verbindungsqualitätsabhängiges Timeout* - der Zeitpunkt für die Weiterleitung der Broadcast-Nachricht wird in Abhängigkeit der geringsten ausgehenden Verbindungsqualität eines Knotens gewählt (Abschnitt 4.5)

Mit dem Verbindungsqualitätsabhängigen Timeout konnte die Versorgung durch NABB bei erhöhten Gütewerten leicht gesteigert werden (Abschnitt 6.4.4 ff.). Mithin wurden Weiterleitungen durch Knoten mit hohen Knotengraden implementationsbedingt stärker verzögert, da diese Knoten wahrscheinlicher wenigstens eine schwache ausgehende Verbindung hatten.

Unter den entwickelten Lösungsstrategien schnitt die Nachbarschaftsschwelle hinsichtlich der Steigerung der Versorgung unter Berücksichtigung von Güte und Aufwand am besten ab.

Um die Auswirkungen der dynamischen Anpassung der Weiterleitungswahrscheinlichkeit für dNABB direkt zu testen konnte, im MIoT-Lab keine passende Topologie erstellt werden.

7.1 Ausblick

Nach einem weiteren Ausbau des MIoT-Labs könnten die durchgeführten Experimente nochmals wiederholt werden, um eine genauere Aussage über die Leistungsfähigkeit der Protokolle zu erhalten.

Die Weiterleitungsverzögerung der NABB-Modifikation Verbindungsqualitätsabhängiges Timeout wurde nur mit einer linearen Verzögerung getestet. Eine exponentielle Verzögerung könnte zusätzlich getestet werden. Außerdem wurde die Verzögerung immer anhand der schlechtesten Verbindung berechnet. Hier könnten nochmal verschiedene andere Kriterien getestet werden. Beispielsweise eine Verzögerung anhand der besten Verbindung oder eines „Gesamtversorgungspotentials“, das alle ausgehenden Verbindungen berücksichtigt.

Eine Kombination verschiedener Modifikationen könnte ebenfalls zur Steigerung der Performance der Protokolle beitragen und könnte getestet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Yu-Chee Tseng, Sze-Yao Ni, Yuh-Shyan Chen, and Jang-Ping Sheu. *Wireless Networks*, 8(2/3):153–167, 2002.
- [2] Kai Kientopf. Ressourcensparendes broadcasting in dezentralen drahtlosen netzwerken per nachbarschaftsanalyse. Masterarbeit, Universität Münster, 2016.
- [3] K. Kientopf and M. Guenes. Analyze the 2-hop-neighborhood for efficient broadcasting in wireless multi hop networks. In *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, pages 1–6, 2017.
- [4] E. Baccelli, C. Gündoğan, O. Hahm, P. Kietzmann, M. S. Lenders, H. Petersen, K. Schleiser, T. C. Schmidt, and M. Wählisch. Riot: An open source operating system for low-end embedded devices in the iot. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(6):4428–4440, 2018.
- [5] M. Lenders. Analysis and comparison of embedded network stacks. Master’s thesis, Freien Universität Berlin, 2016.
- [6] 18. gi/itg kuvs fachgespräch sensornetze, fgsn 2019 : Programm ; 19. september - 20. september, 2019.
- [7] Jochen Schiller. *Mobile communications*. Pearson Education Limited, United Kingdom, 2009.
- [8] Raj Jain. *The art of computer systems performance analysis - techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*. Wiley professional computing. Wiley, 1991.

Anhang

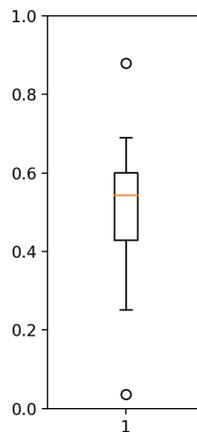
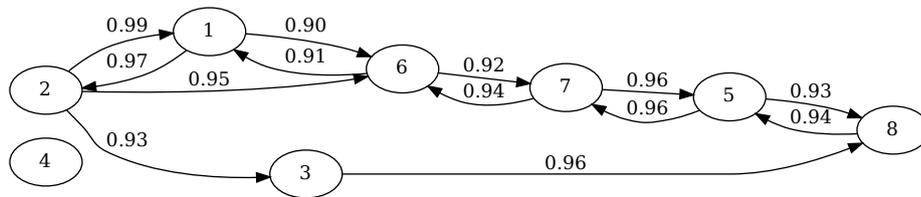
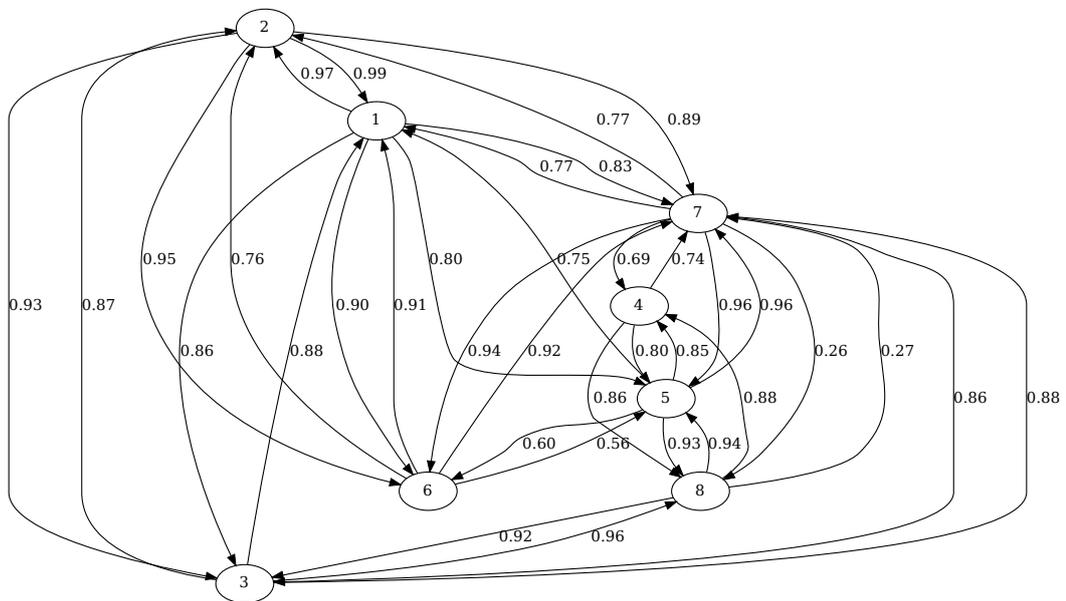


Abbildung A.1: Boxplot

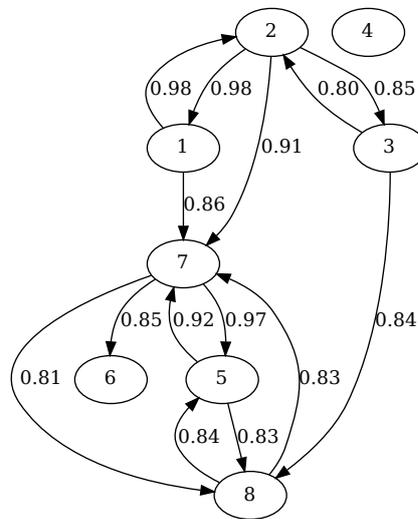
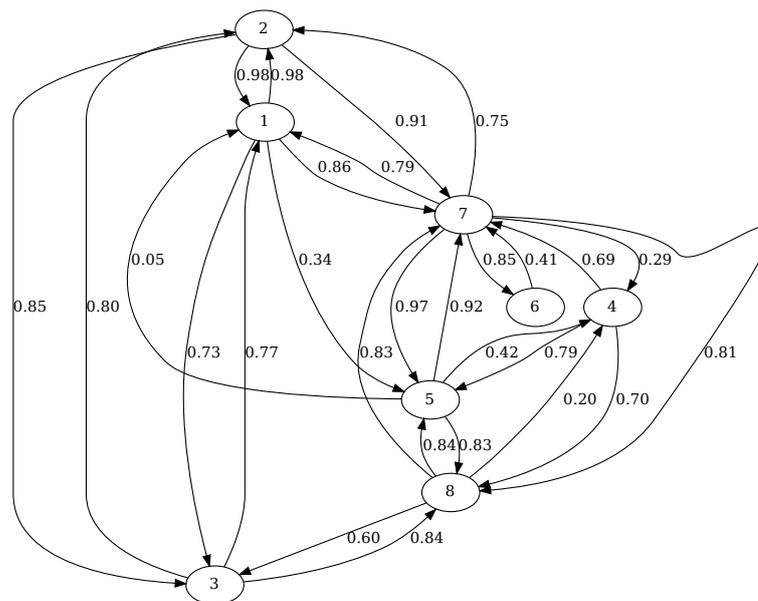
A.1 Boxplots

Boxplots sind ein Mittel zur Darstellung von Verteilungen, ein Beispiel ist in Abbildung A.1 gegeben. Die Box Ober- und Untergrenzen entsprechen dem oberen und dem unteren Quartil, beziehungsweise das 0,75- und das 0,25-Quantil. Die Hälfte der Datenpunkte liegt also innerhalb der Box. In der Box befindet sich eine Horizontale (orangene) Linie, die den Median der zugrundeliegenden Daten beschreibt. Ober- und unterhalb der Box schließen sich die T-förmigen Antennen an. Diese haben eine maximale Länge des 1,5-fachen Interquartilabstands, also der Box-Höhe. Sie enden bei dem letzten Datum, das sich noch innerhalb dieses Bereichs befindet. Die Datenpunkte die sich noch außerhalb der Reichweite der Antennen befinden gelten als Ausreißer und werden durch Kreise dargestellt.

a) Nur Verbindungen ≥ 0.9 

b) Alle Verbindungen

Abbildung A.3: Topologie des Netzwerks der Knoten des MIoT-Labs mit -10 dBm Sendeleistung der Transceiver und annotierten Verbindungsqualitäten

a) Nur Verbindungen ≥ 0.8 

b) Alle Verbindungen

Abbildung A.4: Topologie des Netzwerks der Knoten des MIoT-Labs mit -15 dBm Sendeleistung der Transceiver und annotierten Verbindungsqualitäten

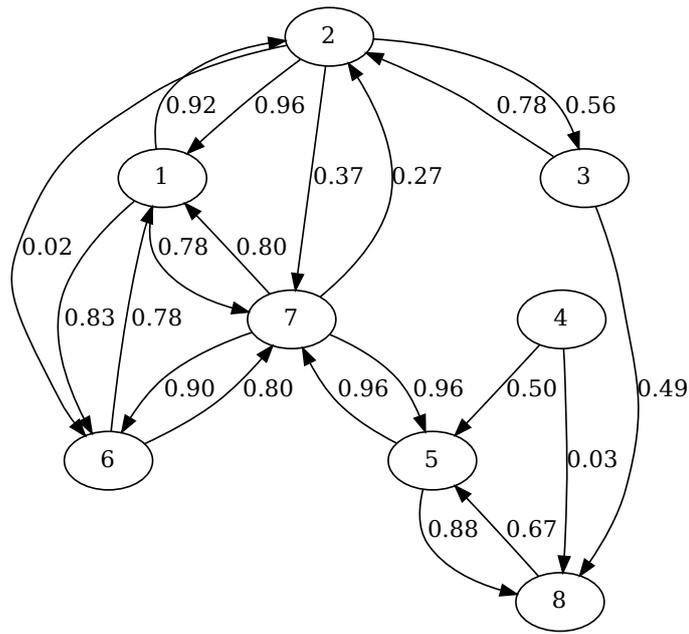


Abbildung A.5: Topologie des Netzwerks der Knoten des MIIoT-Labs mit -20 dBm Sendeleistung der Transceiver und annotierten Verbindungsqualitäten

A.3 Simulationsergebnisse Linientopologie

A.4 Ergebnisse mit einem Sender

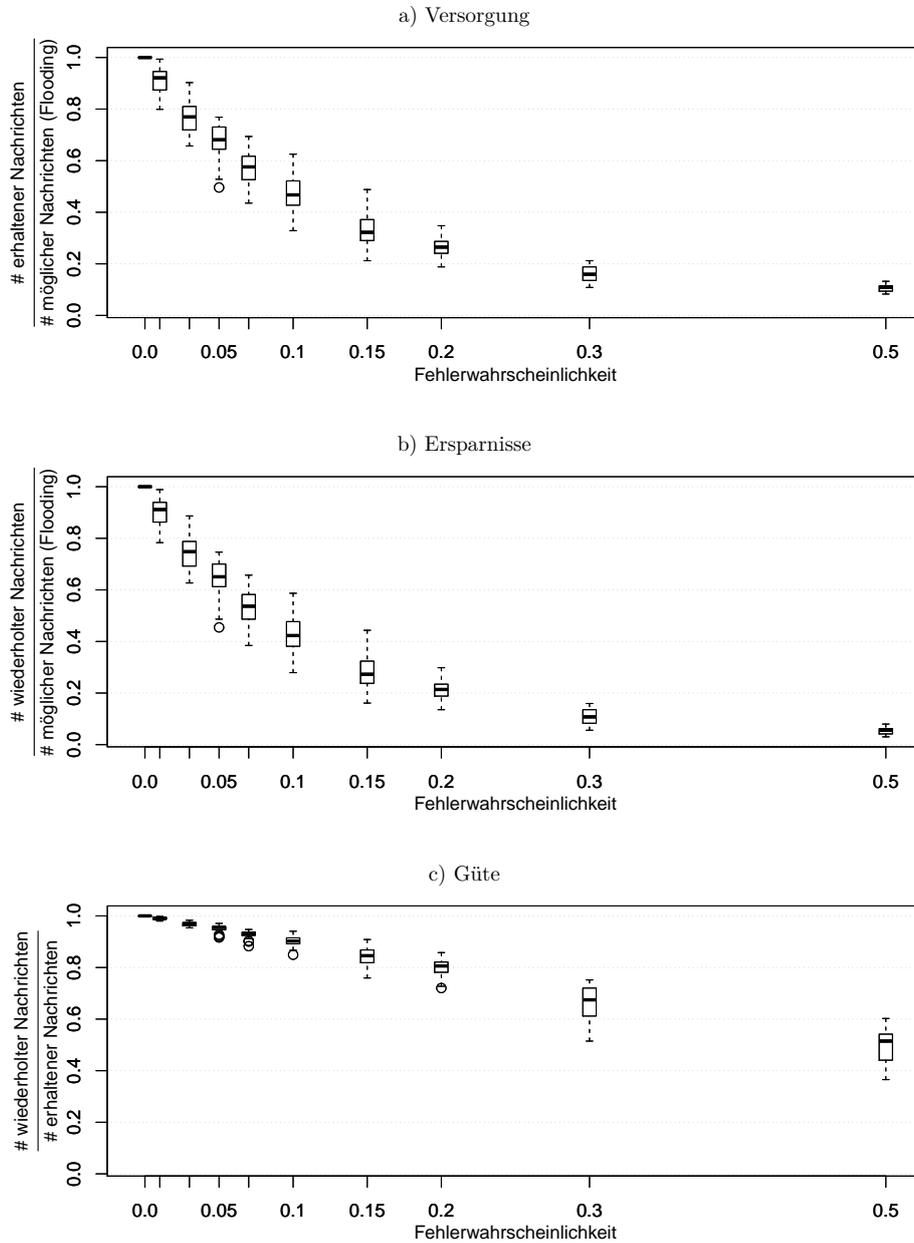


Abbildung A.3: Die Boxplots der Ergebnisse von der Simulation mit Konfiguration: [I] Gossiping [II] Linie [III] ein Sender [IV] Protokoll variabel [V] idealisiert

Abbildung A.6: Ausschnitt aus der Masterarbeit von Kai Kientopf [2]

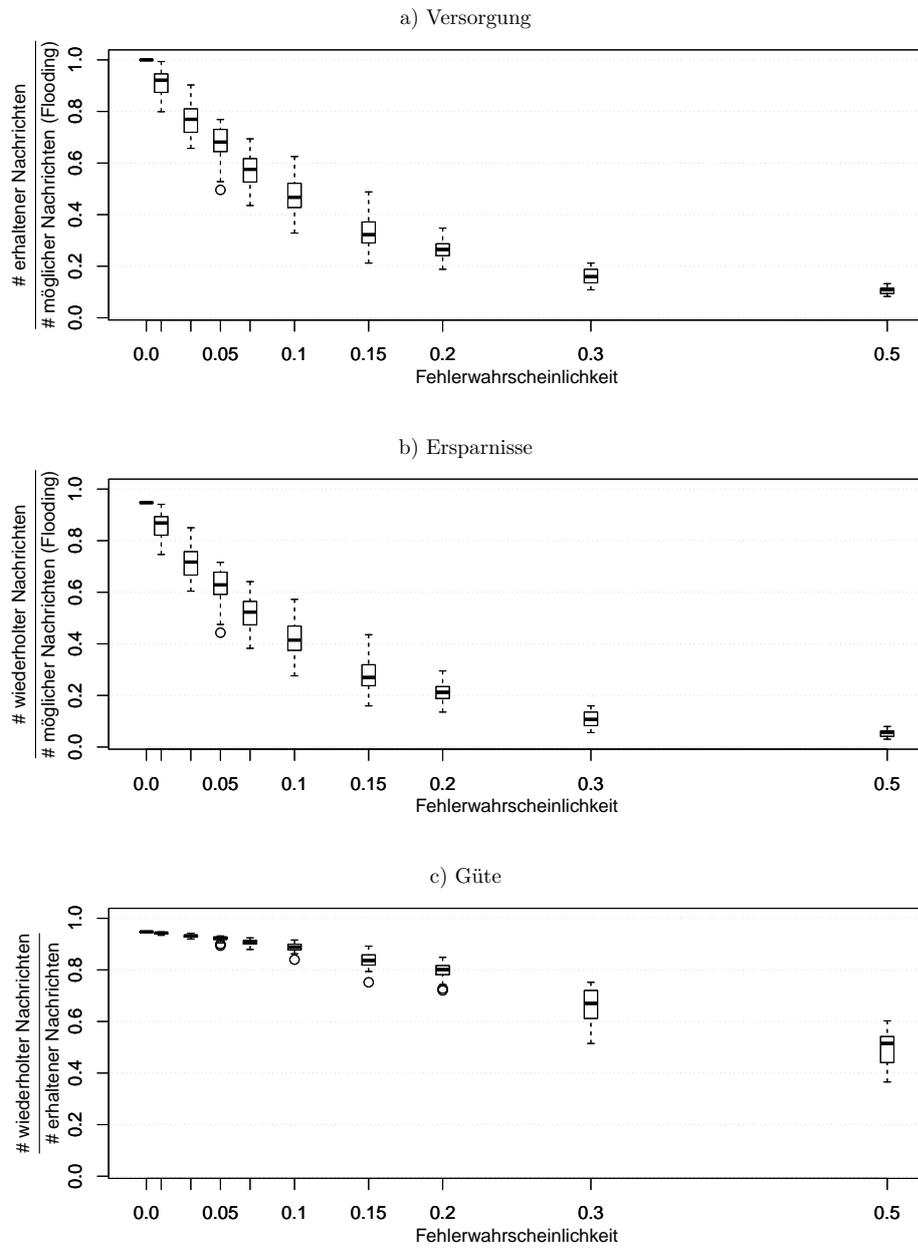


Abbildung A.4: Die Boxplots der Ergebnisse von der Simulation mit Konfiguration: [I] einfaches Protokoll [II] Linie [III] ein Sender [IV] Protokoll variabel [V] idealisiert

Abbildung A.7: Ausschnitt aus der Masterarbeit von Kai Kientopf [2]

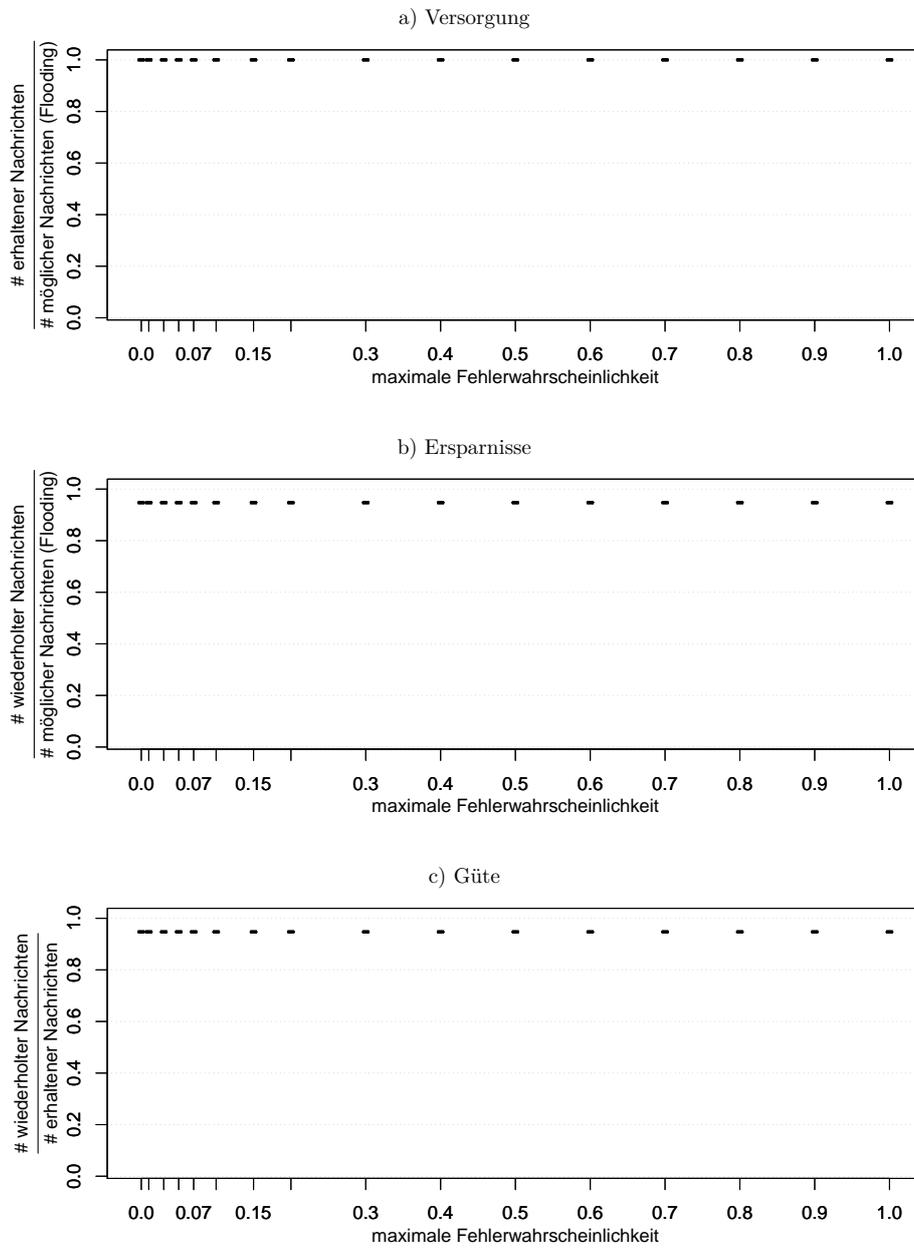


Abbildung A.5: Die Boxplots der Ergebnisse von der Simulation mit Konfiguration: [I] dynamisches Protokoll [II] Linie [III] ein Sender [IV] Protokoll variabel [V] idealisiert

Abbildung A.8: Ausschnitt aus der Masterarbeit von Kai Kientopf [2]

A.4 Simulationsergebnisse Netzwerktopologie

50

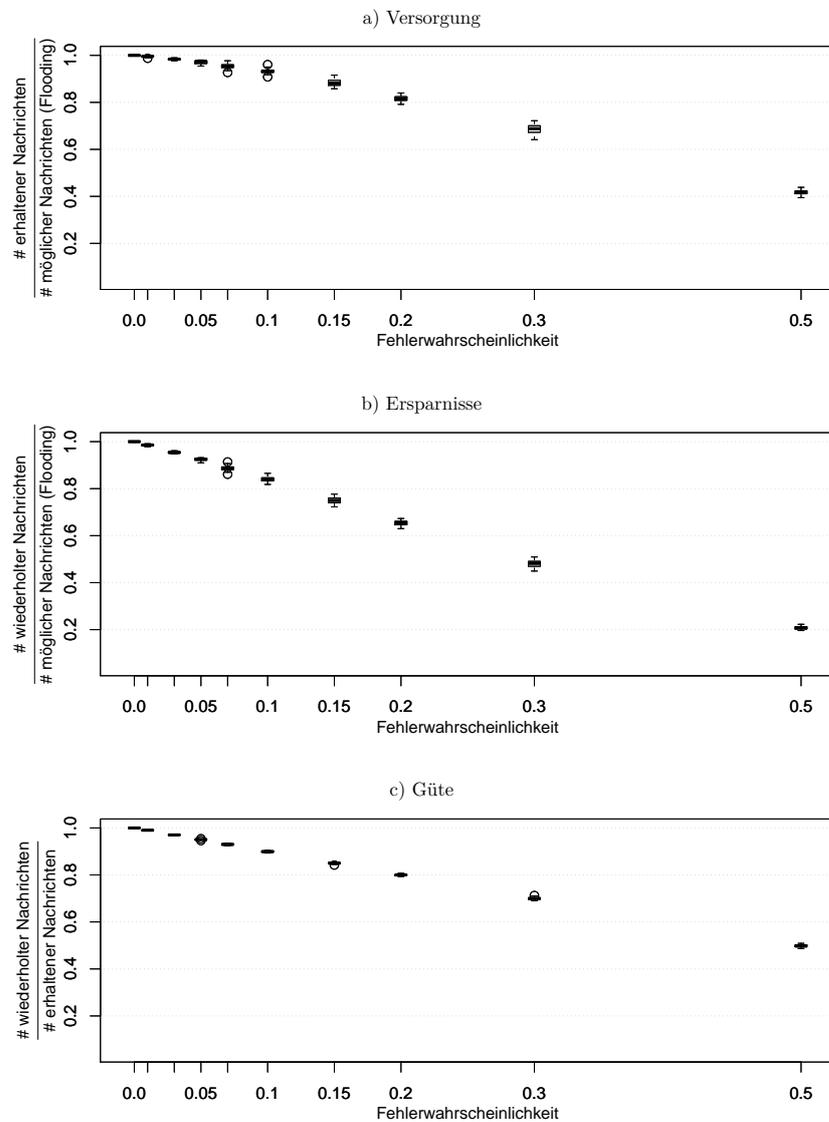


Abbildung 5.10: Die Boxplots der Ergebnisse von der Simulation mit Konfiguration: [I] Gossiping [II] zufälliges Netzwerk [III] zufällige Sender [IV] Protokoll variabel [V] idealisiert

Abbildung A.9: Ausschnitt aus der Masterarbeit von Kai Kientopf [2]

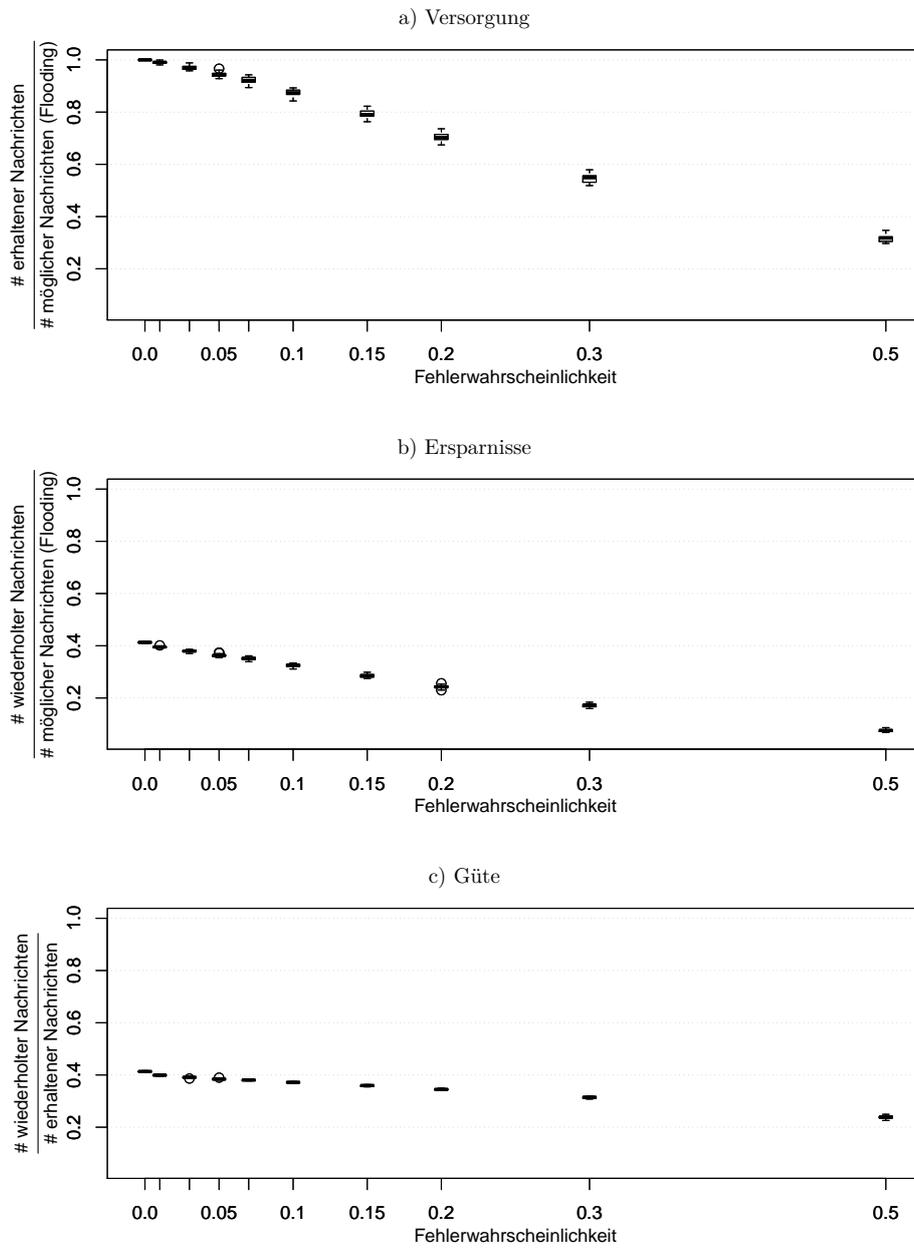


Abbildung 5.11: Die Boxplots der Ergebnisse von der Simulation mit Konfiguration: [I] einfaches Protokoll [II] zufälliges Netzwerk [III] zufällige Sender [IV] Protokoll variabel [V] idealisiert

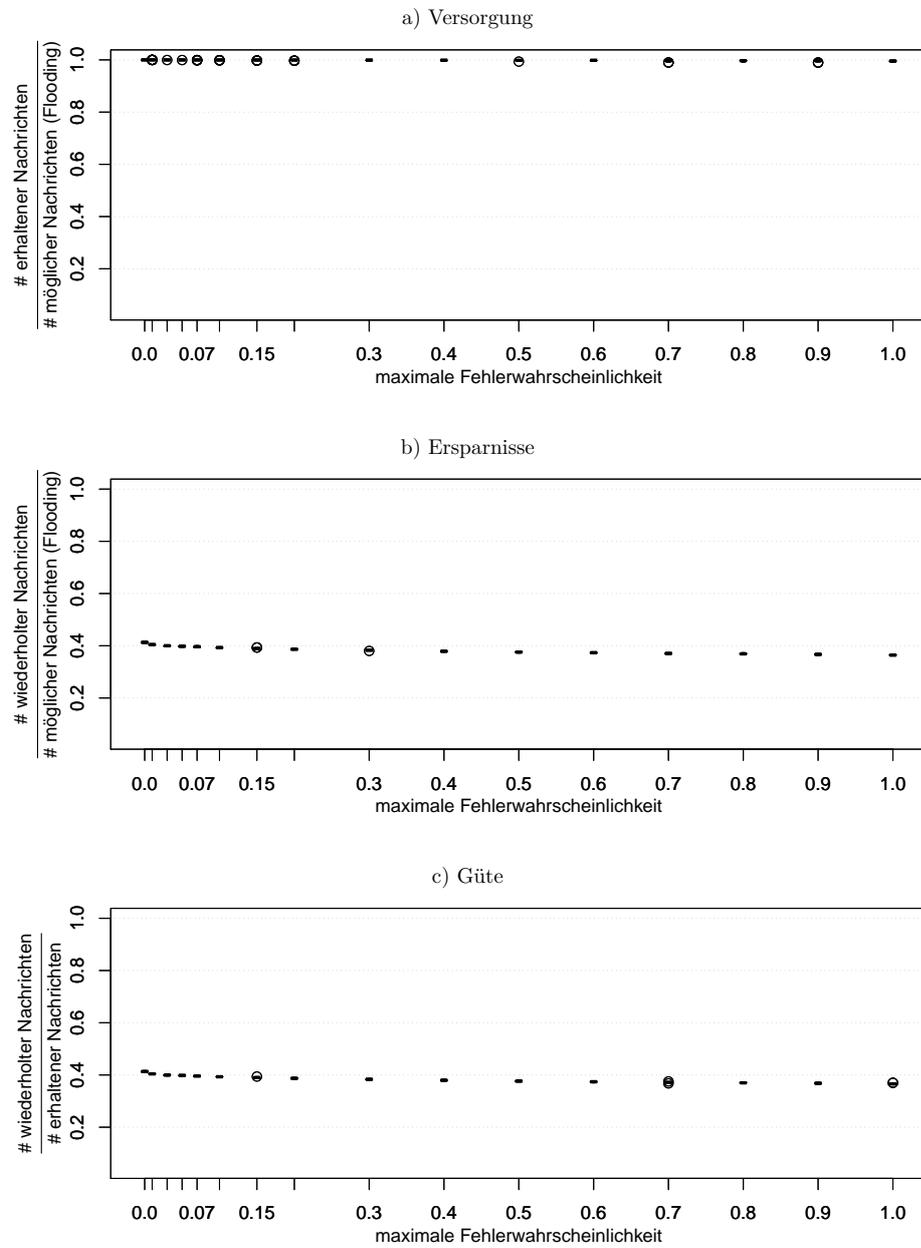
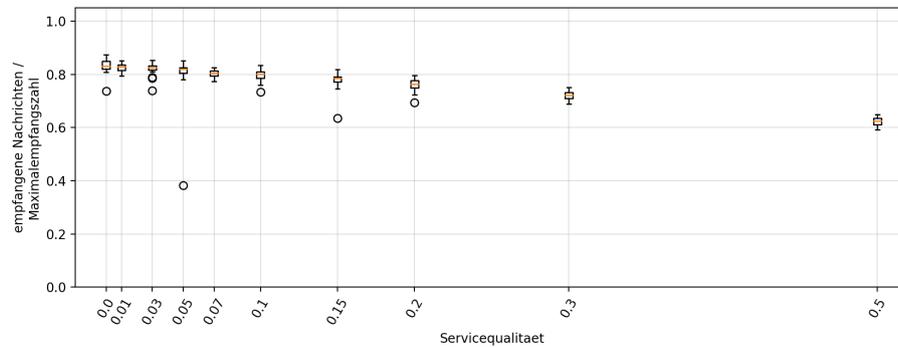


Abbildung 5.12: Die Boxplots der Ergebnisse von der Simulation mit Konfiguration: [I] dynamisches Protokoll [II] zufälliges Netzwerk [III] zufällige Sender [IV] Protokoll variabel [V] idealisiert

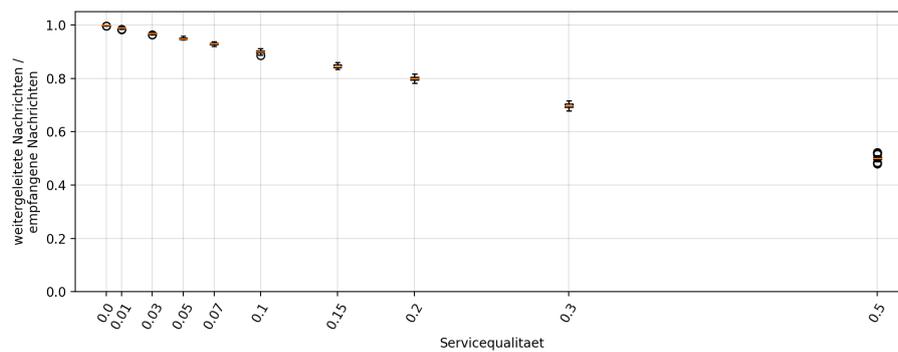
Abbildung A.11: Ausschnitt aus der Masterarbeit von Kai Kientopf [2]

A.5 Ergebnisse anderer Experimente

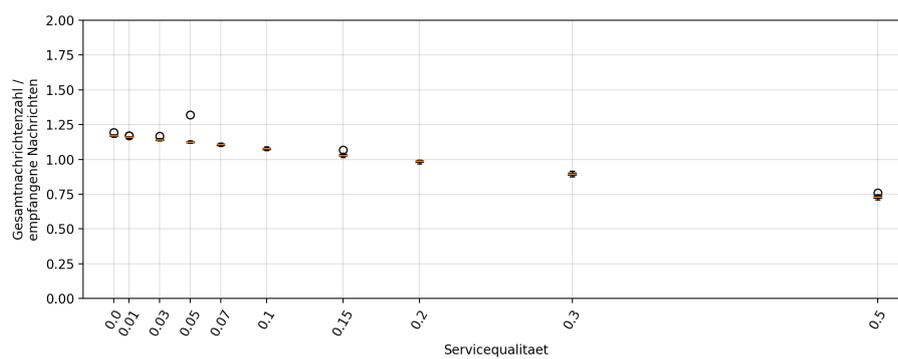
A.5.1 8-Knoten-Topologie bei -15 dBm Sendeleistung



a) Versorgung

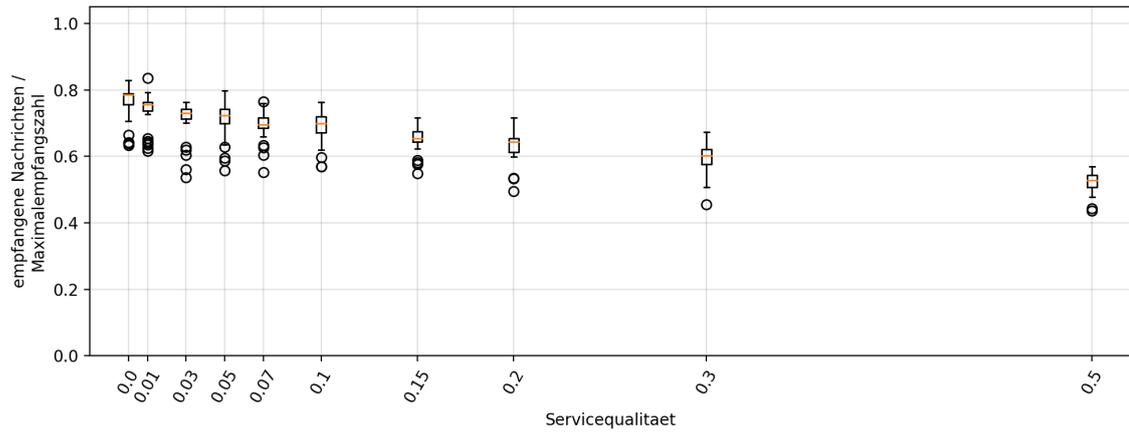


b) Güte

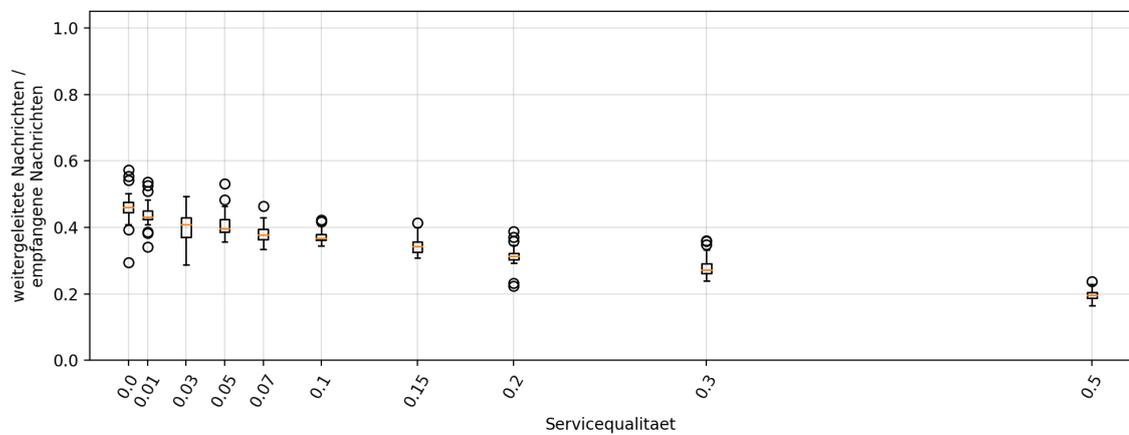


c) Aufwand

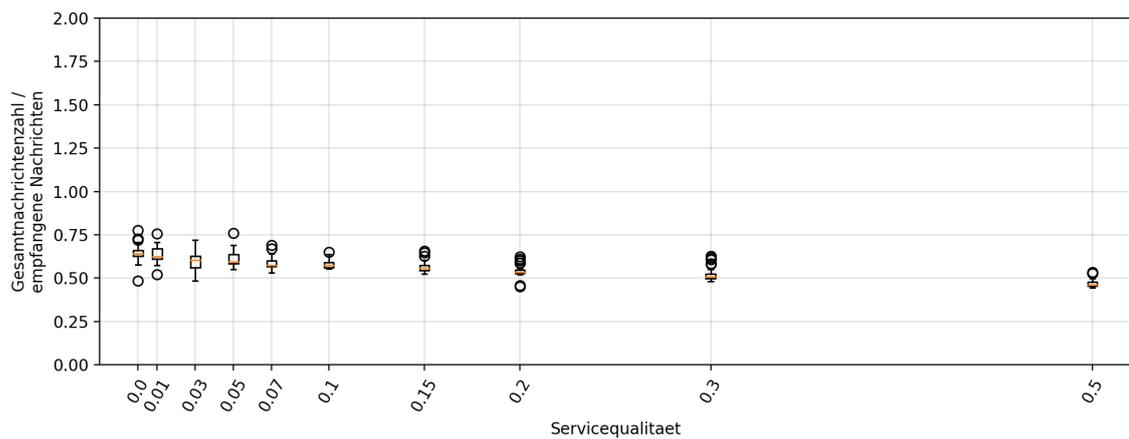
Abbildung A.12: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = Gossiping, Topologie = 8 Knoten bei -15 dBm Sendeleistung



a) Versorgung

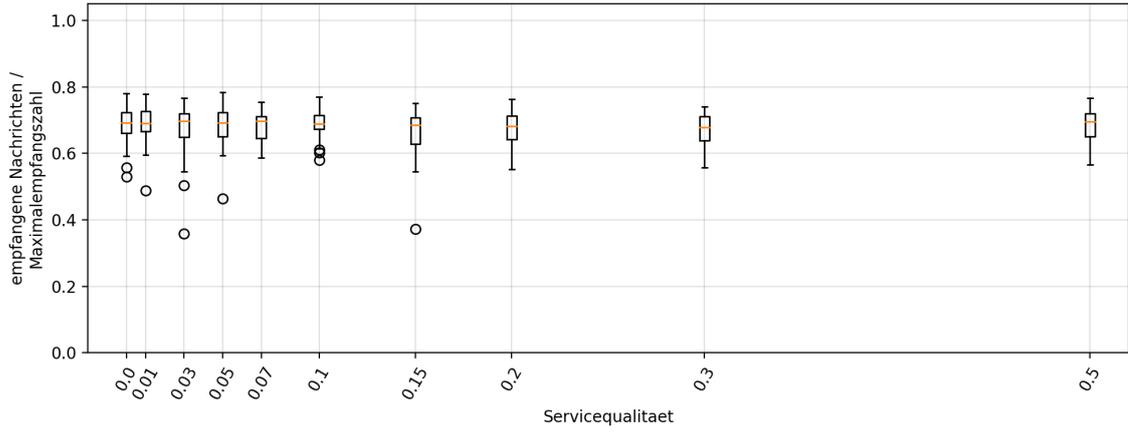


b) Güte

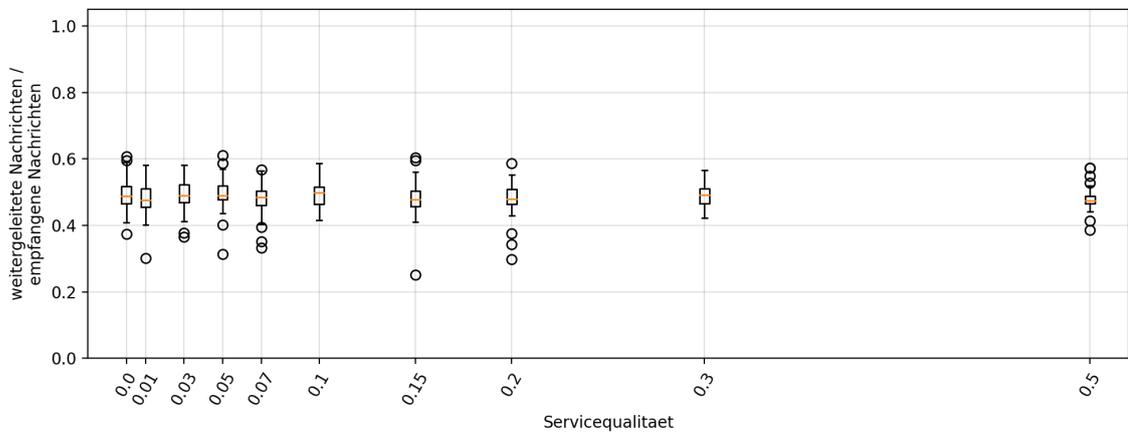


c) Aufwand

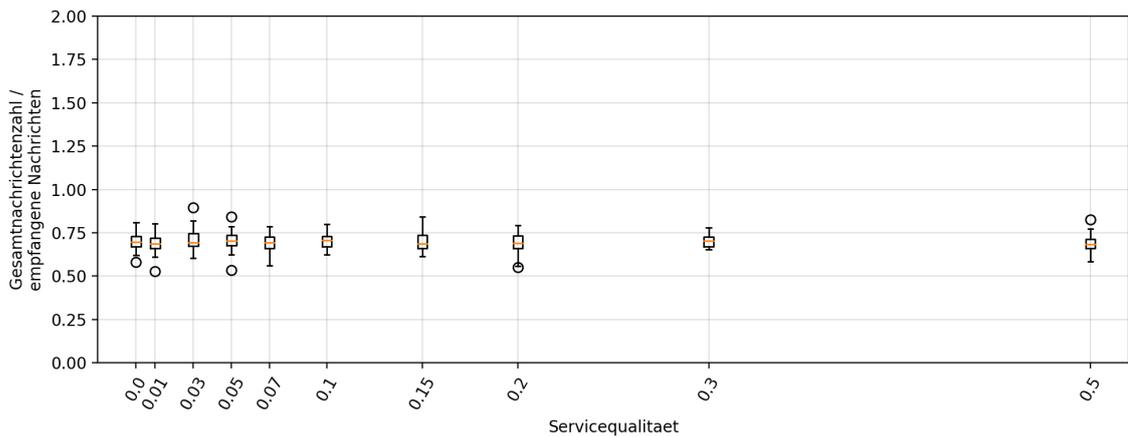
Abbildung A.13: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 8 Knoten bei -15 dBm Sendeleistung



a) Versorgung



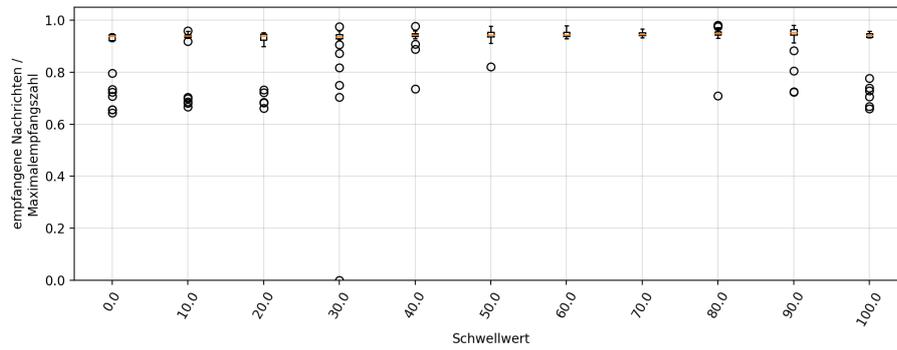
b) Güte



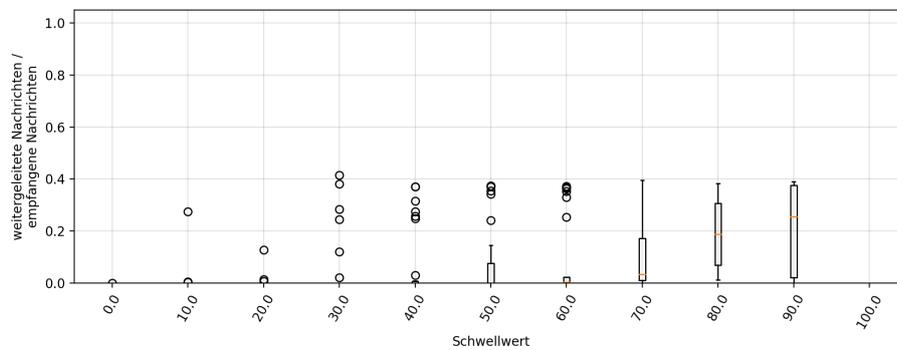
c) Aufwand

Abbildung A.14: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 8 Knoten bei -15 dBm Sendeleistung

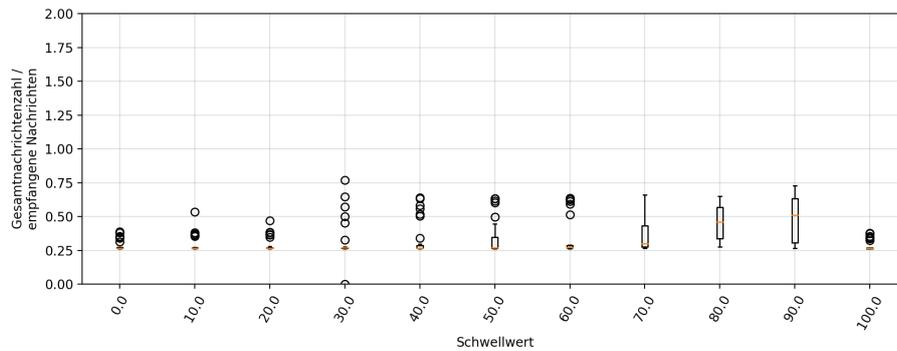
A.5.2 Nachbarschaftsschwelle mit 5-Knoten



a) Versorgung



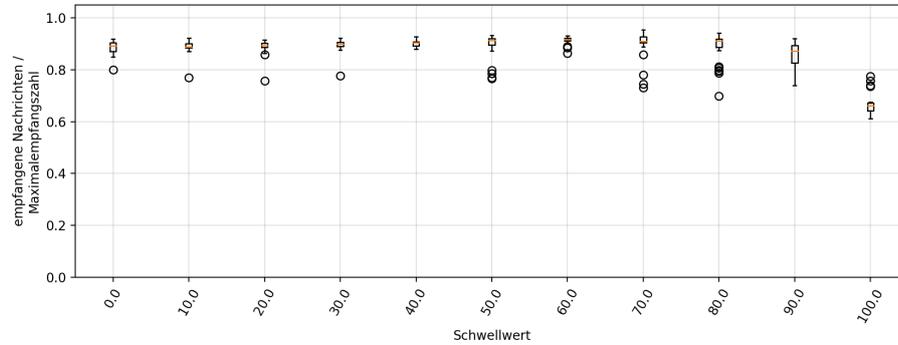
b) Güte



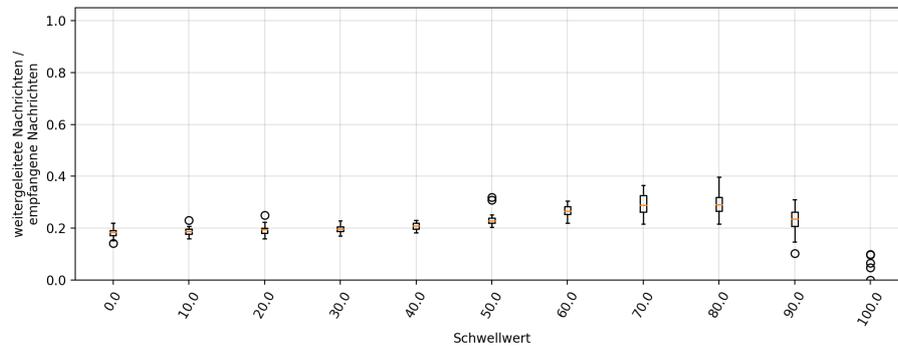
c) Aufwand

Abbildung A.15: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 5 Knoten bei -10 dBm Sendeleistung und eingestellter Nachbarschaftsschwelle

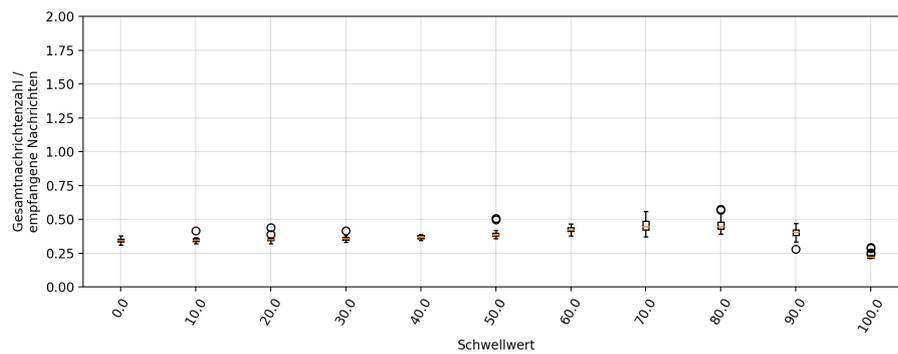
A.5.3 Nachbarschaftsschwelle mit 8-Knoten bei 0 und -15 dBm Sendeleistung



a) Versorgung

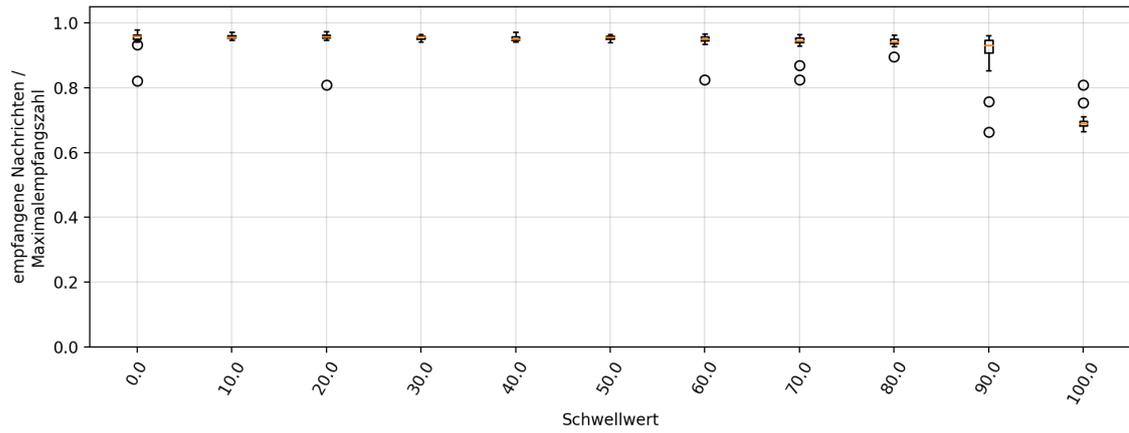


b) Güte

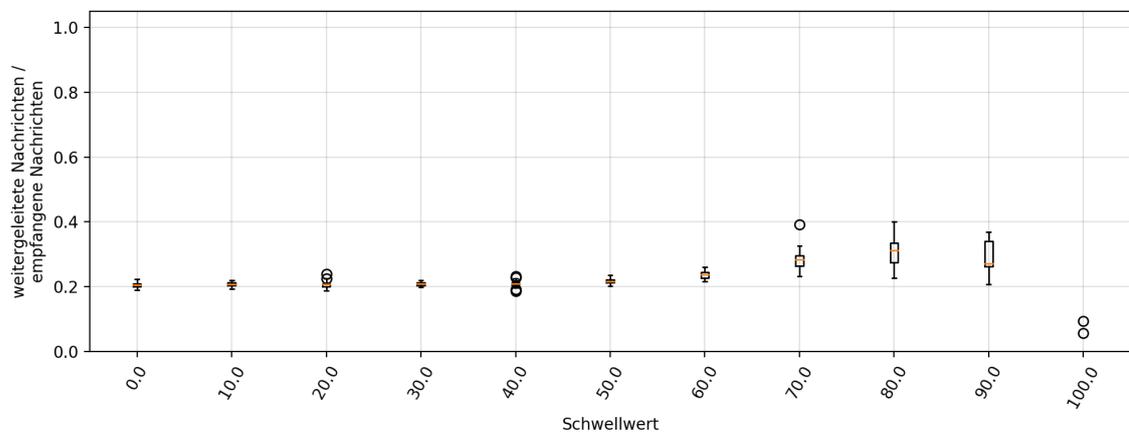


c) Aufwand

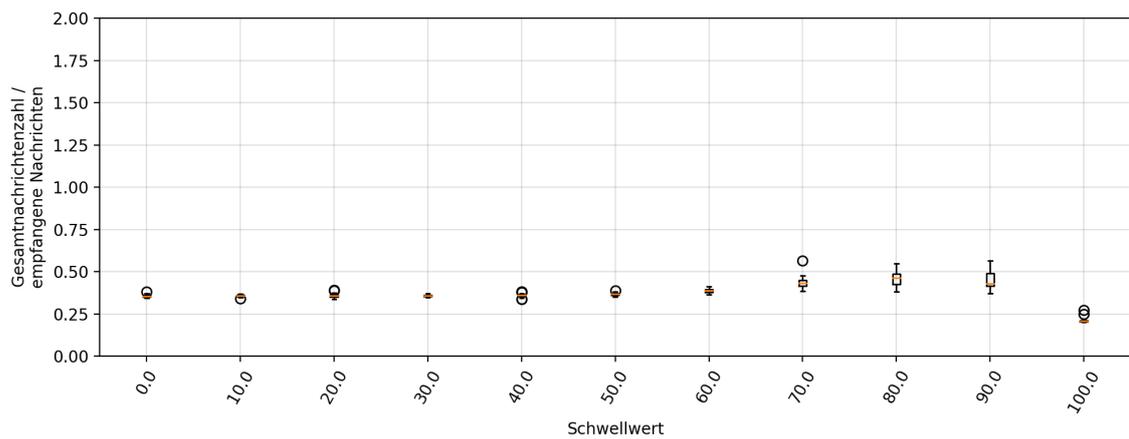
Abbildung A.16: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 8 Knoten bei 0 dBm Sendeleistung und eingestellter Nachbarschaftsschwelle



a) Versorgung

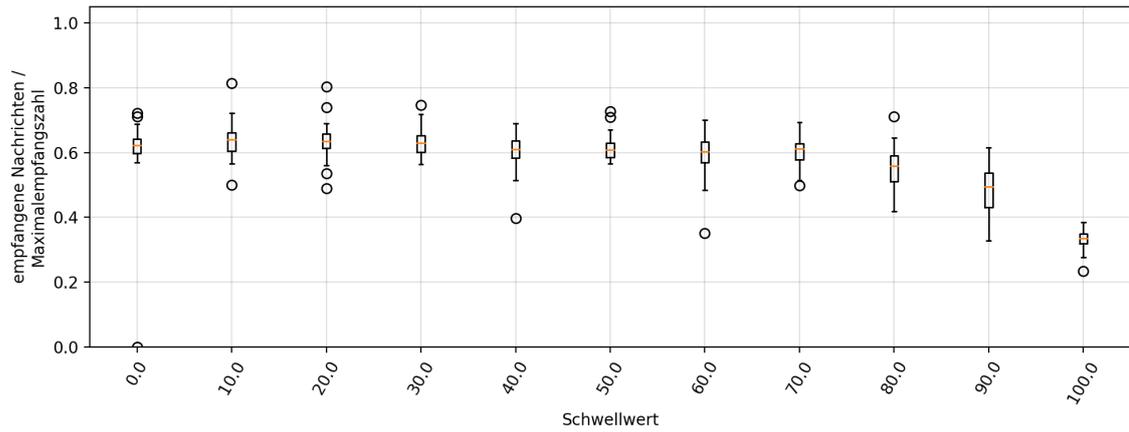


b) Güte

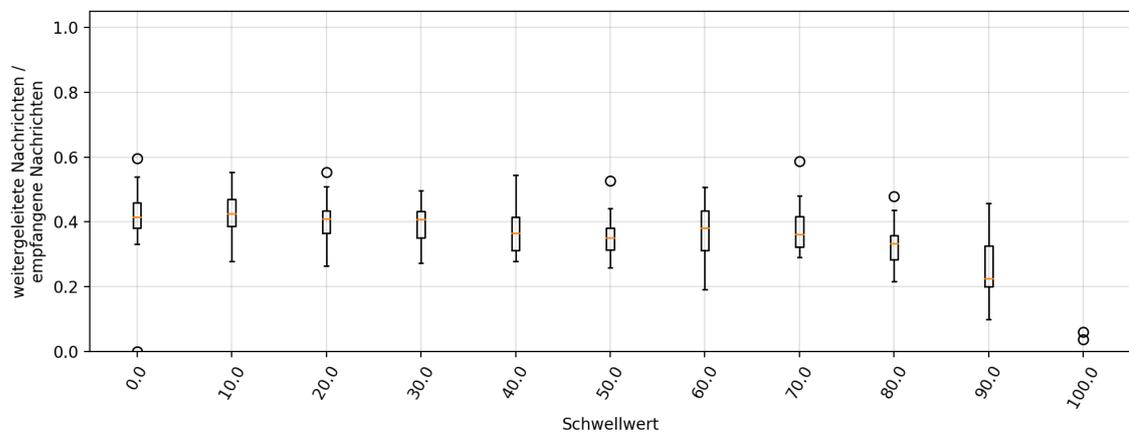


c) Aufwand

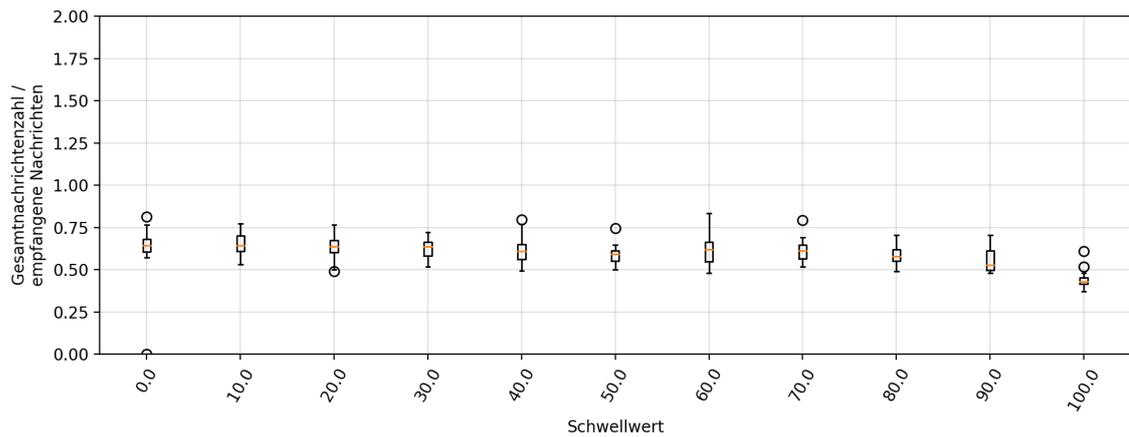
Abbildung A.17: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 8 Knoten bei 0 dBm Sendeleistung und eingestellter Nachbarschaftsschwelle



a) Versorgung

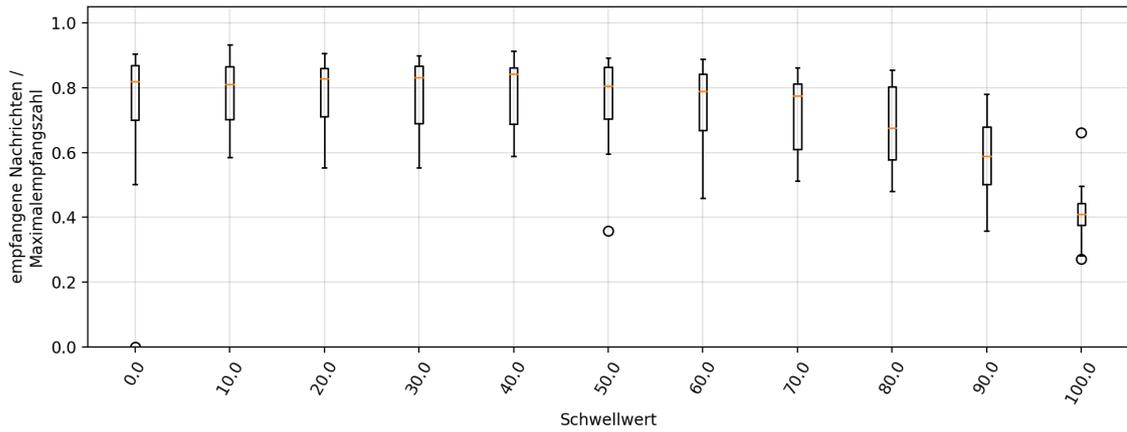


b) Güte

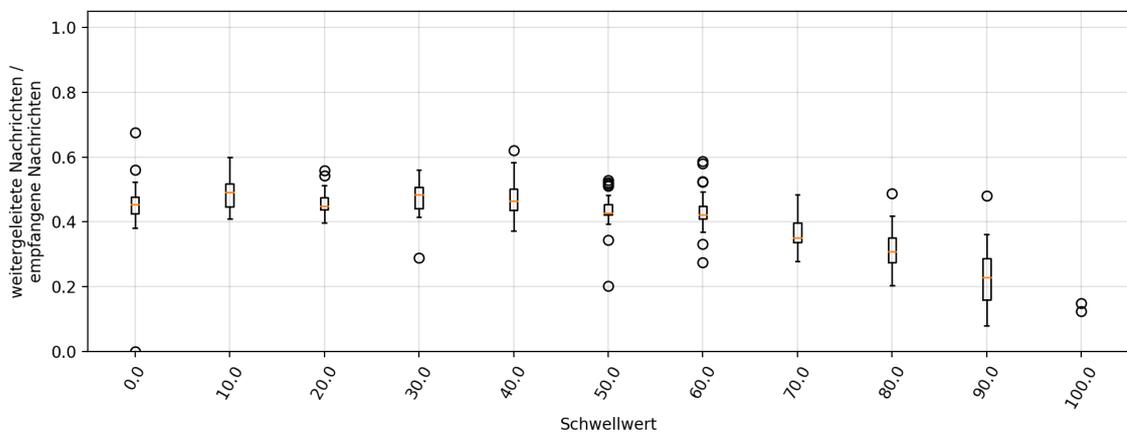


c) Aufwand

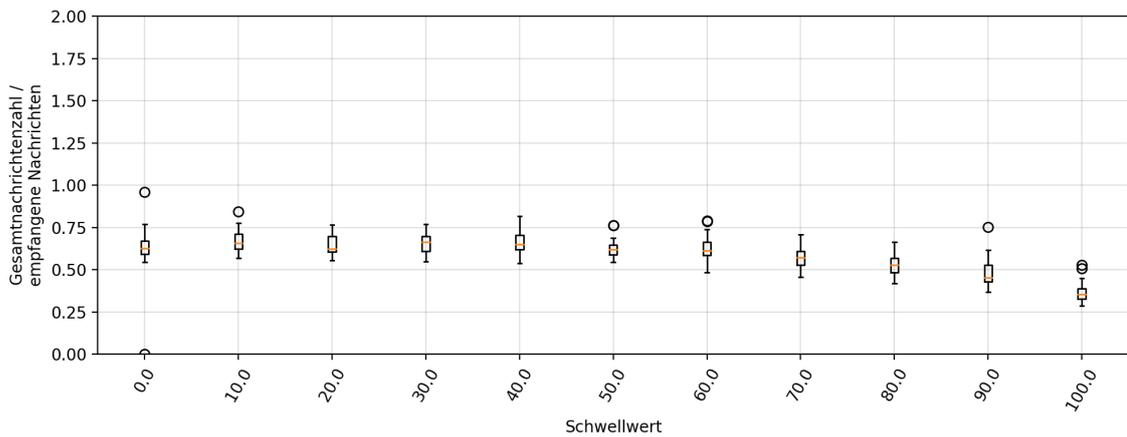
Abbildung A.18: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 8 Knoten bei -15 dBm Sendeleistung und eingestellter Nachbarschaftsschwelle



a) Versorgung



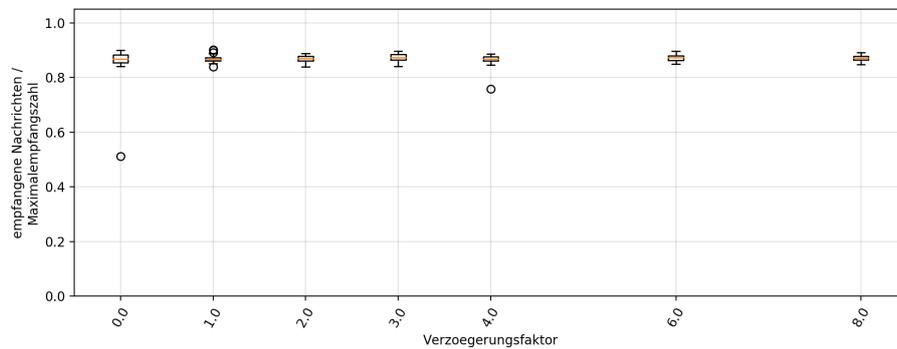
b) Güte



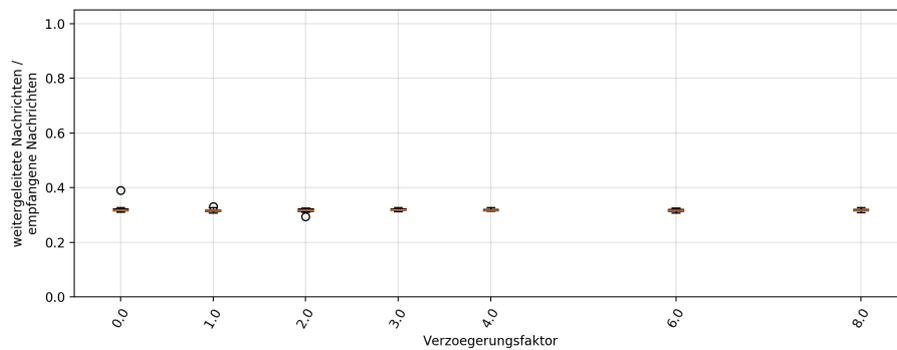
c) Aufwand

Abbildung A.19: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 8 Knoten bei -15 dBm Sendeleistung und eingestellter Nachbarschaftsschwelle

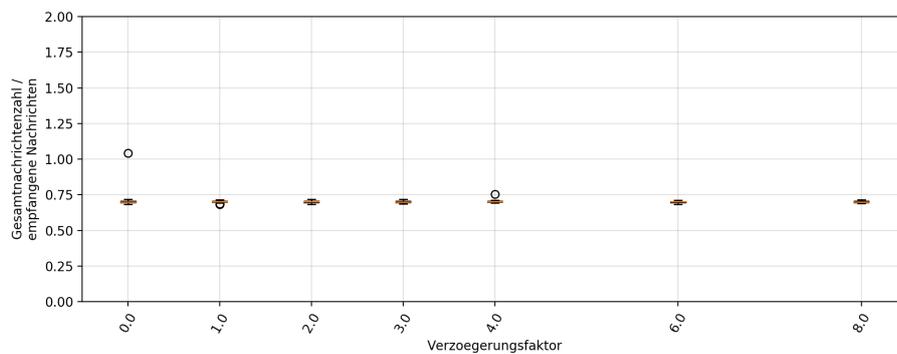
A.5.4 Verbindungsqualitätsabhängiges Timeout mit 4 Knoten



a) Versorgung

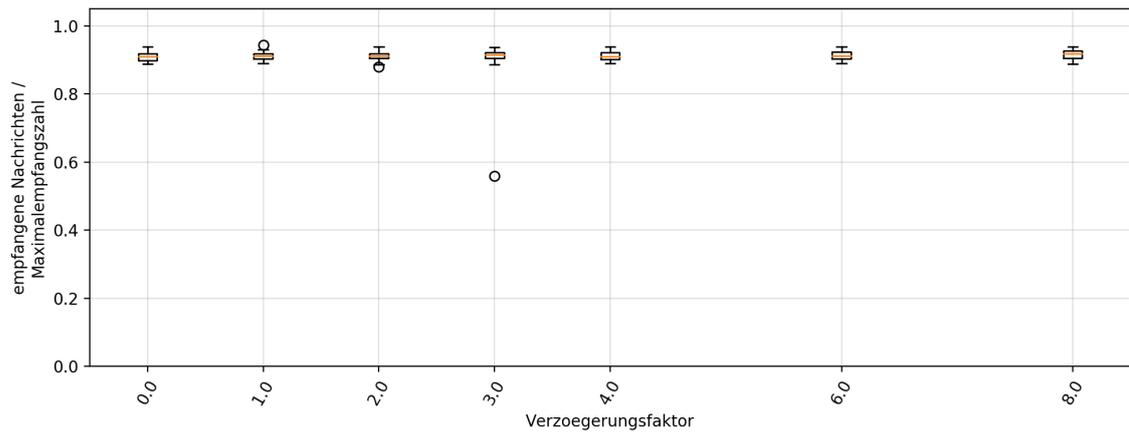


b) Güte

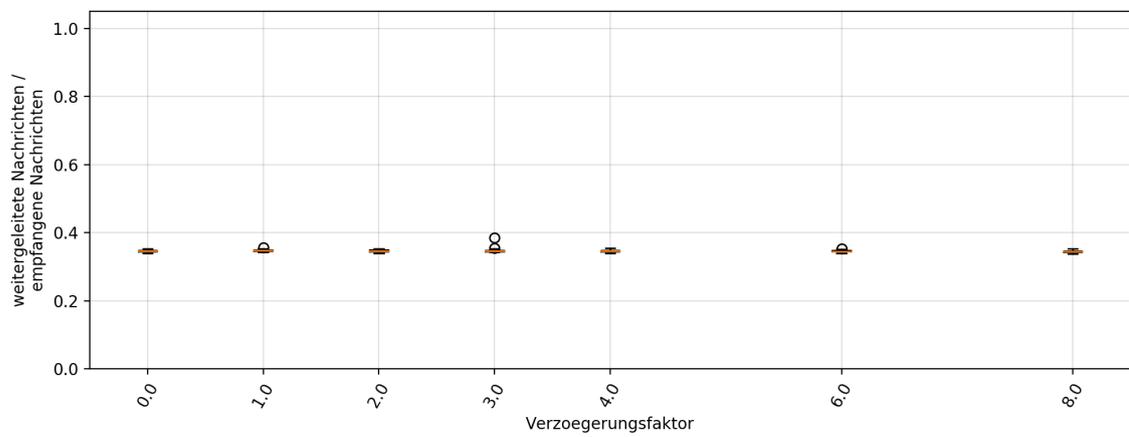


c) Aufwand

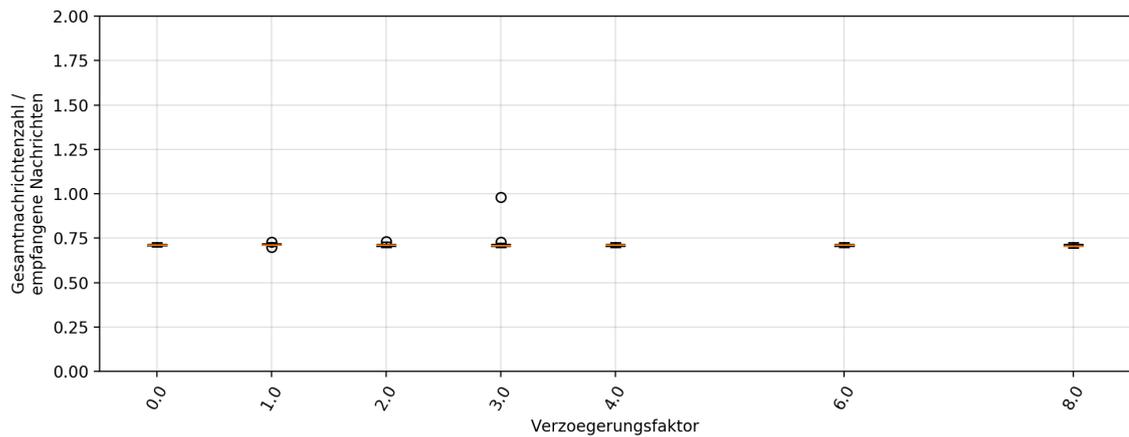
Abbildung A.20: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = sNABB, Topologie = 4 Knoten bei -10 dBm Sendeleistung und eingestelltem Verbindungsqualitätsabhängigen Timeouts



a) Versorgung



b) Güte



c) Aufwand

Abbildung A.21: Die Ergebnisse der Experimente mit der Konfiguration: Protokoll = dNABB, Topologie = 4 Knoten bei -10 dBm Sendeleistung und eingestelltem Verbindungsqualitätsabhängigen Timeouts

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit mit dem Titel *Experimentelle Evaluation des NABB-Protokolls im MIoT-Lab* selbstständig verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommenen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

Magdeburg, 22. Juli 2021

(Jonas Rebbelmund)