

Wirkungsanalyse Selbst- Steuerung

Report

Author(s):

Genser, Alexander ; Neuenschwander, Marco; Kouvelas, Anastasios 

Publication date:

2020-10

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000456701>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme
Institute for Transport Planning and Systems



Forschungsbericht

Wirkungsanalyse Selbst-Steuerung

Autoren:

Alexander Genser

Marco Neuenschwander

Dr. Anastasios Kouvelas

Forschungsgruppe Strassenverkehrstechnik (SVT)
Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme
(IVT)

ETH Zürich

Oktober 2020

Inhaltsverzeichnis

Tabellensverzeichnis	14
Zusammenfassung.....	17
1 Einleitung	18
1.1 Projektmotivation und Ziele	18
1.2 Inhalt der Arbeit	19
2 Literaturüberblick	21
3 Untersuchungsgebiet	22
4 Datengrundlage und Aufbereitung	27
4.1 Detektorenanalyse Knoten SLU120	29
4.2 Detektorenanalyse Knoten SLU121.....	32
5 Auswertemethodik	34
5.1 Bestimmung der Verkehrsnachfrage	35
5.2 Bestimmung der Auswertegrößen für den FussgängerInnenverkehr	35
5.3 Bestimmung der Auswertegrößen für den öffentlichen Verkehr	36
5.4 Bestimmung der Auswertegrößen für den motorisierten Individualverkehr	37
5.5 Bestimmung der Auswertegrößen für den Veloverkehr.....	39
6 Ergebnisse der Verkehrsnachfrage.....	40
6.1 Knoten SLU120	40
6.2 Knoten SLU121.....	42
7 Ergebnisse der Auswertegrößen für den FussgängerInnenverkehr	44
7.1 Knoten SLU120	44
7.2 Knoten SLU121.....	52
8 Ergebnisse der Auswertegrößen für den öffentlichen Verkehr	61
8.1 Knoten SLU120	61
8.2 Knoten SLU121.....	68
9 Ergebnisse der Auswertegrößen für den motorisierten Individualverkehr.....	75
9.1 Knoten SLU120	75
9.2 Knoten SLU121.....	87
10 Resultate für das gesamte Untersuchungsgebiet	101

10.1	FussgängerInnenverkehr	101
10.2	Öffentlicher Verkehr	102
10.3	Motorisierter Individualverkehr	102
11	Zusammenfassung und Ausblick	105
12	Referenzen	107
13	Anhang	108

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Umgebungskarte mit dem Untersuchungsgebiet markiert in Rot. Die analysierten Knoten sind mit roten Punkten gekennzeichnet (Open Street Map, 2020).....	22
Abbildung 2:	Luftbild des Knotens SLU120 im Untersuchungsgebiet (Geoportal LU, 2020).....	23
Abbildung 3:	Installierte Signal- und Detektorgeräte am Knoten SLU120.	24
Abbildung 4:	Zusätzlich installierte Detektorgeräte für die LSA-Steuerung des Knotens SLU120.....	24
Abbildung 5:	Luftbild des Knotens SLU121 im Untersuchungsgebiet (Geoportal LU, 2020).	25
Abbildung 6:	Installierte Signal- und Detektorgeräte am Knoten SLU121.	26
Abbildung 7:	Kumulierte Detektorbelegungen am Knoten SLU120 für die Geräte V 1-0, V 1-4, D 1-8 und D 2-0.	30
Abbildung 8:	Kumulierte Detektorbelegungen am Knoten SLU120 für die Geräte V 2-4, D 3-0, D 3-4 und V 4-0.	31
Abbildung 9:	Kumulierte Detektorbelegungen am Knoten SLU120 für die Geräte V 4-4, V 5-0, V 5-4, V 22-0.....	31
Abbildung 10:	Kumulierte Detektorbelegungen am Knoten SLU120 für V 22-4, V 23-0, D 23-4, V 24-0.	32
Abbildung 11:	Kumulierte Detektorbelegungen am Knoten SLU121 für D 1-0, D 1-4, D 1-8, D 2-0.....	33
Abbildung 12:	Kumulierte Detektorbelegungen am Knoten SLU121 für D 5-8, D 6-0, D 6-4, D 6-8.....	33
Abbildung 13:	Stundenwerte des Verkehrsflusses [veh/h] über den gesamten Betrachtungszeitraum am SLU120. Die Selbst-Steuerung ist ab dem 19.01.2020, 22:07 aktiv.	40
Abbildung 14:	Gegenüberstellung der Verkehrsflüsse in [veh/h] der Zählschlaufen am SLU120. Die Datenpunkte in blau, orange und gelb geben den Zusammenhang mit der korrespondierenden Regressionsgerade für D24, D25 und D50 an. Das Bestimmtheitsmass kann jeweils mit 0.99, 0.95 und 0.96 angegeben werden. Die Regressionskoeffizienten β_1 sind jeweils mit 1.00 abgebildet.	41
Abbildung 15:	Stundenwerte des Verkehrsflusses [veh/h] über den gesamten Betrachtungszeitraum am SLU121. Die Selbst-Steuerung ist ab dem 19.01.2020, 22:07 aktiv.	42

Abbildung 16: Gegenüberstellung der Verkehrsflüsse in [veh/h] der Zählschlaufen am SLU121. Die blauen, orangen und gelben Datenpunkte geben den Zusammenhang mit der korrespondierenden Regressionsgerade für D37, D38 und D39 an. Das Bestimmtheitsmass kann jeweils mit 0.99 angegeben werden. Die Regressionskoeffizienten β_1 sind mit 1.00 definiert.	43
Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Montag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	45
Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Dienstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	46
Abbildung 19: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Samstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	46
Abbildung 20: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV der Morgenspitze am Dienstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	47
Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV im Mittagsverkehr am Dienstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	47
Abbildung 22: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV der Abendspitze am Dienstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	48
Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	49
Abbildung 24: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Montag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	53
Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Dienstag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	54
Abbildung 26: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Samstag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	54
Abbildung 27: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV in der dienstags Morgenspitze, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	55
Abbildung 28: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV im Mittagsverkehr des Dienstages, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	56
Abbildung 29: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV in der dienstags Abendspitze, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	56
Abbildung 30: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	57
Abbildung 31: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Montag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	62

Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Dienstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	62
Abbildung 33: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Samstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	63
Abbildung 34: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV in der dienstags Morgenspitze, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	63
Abbildung 35: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV im Mittagsverkehr des Dienstages, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	64
Abbildung 36: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV in der dienstags Abendspitze, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	64
Abbildung 37: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	65
Abbildung 38: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Montag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	68
Abbildung 39: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Dienstag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	69
Abbildung 40: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Samstag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	69
Abbildung 41: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV in der dienstags Morgenspitze, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	70
Abbildung 42: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV im Mittagsverkehr des Dienstages, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet....	71
Abbildung 43: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV in der dienstags Abendspitze, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	72
Abbildung 44: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV über den gesamten Messzeitraum, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet...	73
Abbildung 45: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Montag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	75
Abbildung 46: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Dienstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	76
Abbildung 47: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Samstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	77
Abbildung 48: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	78

Abbildung 49: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV im Mittagsverkehr des Dienstages, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	78
Abbildung 50: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	79
Abbildung 51: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV über den gesamten Messzeitraum, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	79
Abbildung 52: Belegungszeiten der Langschlaufendetektoren am Knoten SLU120 aggregiert über den gesamten Messzeitraum. In Grau die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS); Gelb die Selbst-Steuerung.	82
Abbildung 53: Belegungszeiten der Voranmeldedetektoren am Knoten SLU120 aggregiert über den gesamten Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	82
Abbildung 54: Belegungszeiten der Voranmeldedetektoren am Knoten SLU120 aggregiert auf eine Stunde Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	83
Abbildung 55: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Montag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	88
Abbildung 56: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Dienstag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	89
Abbildung 57: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Samstag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	89
Abbildung 58: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	90
Abbildung 59: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV des Mittagsverkehr dienstags, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	90
Abbildung 60: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	91
Abbildung 61: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV über den gesamten Messzeitraum, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	92
Abbildung 62: Belegungszeiten der Langschlaufendetektoren am Knoten SLU121 aggregiert über den gesamten Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	95
Abbildung 63: Belegungszeiten der Voranmeldedetektoren am Knoten SLU121 aggregiert über den gesamten Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	95

Abbildung 64: Belegungszeiten der Voranmeldedetektoren am Knoten SLU121 aggregiert auf eine Stunde Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	96
Abbildung 65: Aggregierte Wartezeiten für den FV am Knoten SLU120 und SLU121 über den gesamten Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	101
Abbildung 66: Aggregierte Wartezeiten für den ÖV am Knoten SLU120 und SLU121 über den gesamten Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	102
Abbildung 67: Aggregierte Wartezeiten für den MIV am Knoten SLU120 und SLU121 über den gesamten Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	103
Abbildung 68: Längste Belegungszeiten (Grenzwert 60 Minuten) für das gesamte Untersuchungsgebiet.	103
Abbildung 69: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV, mittwochs am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	111
Abbildung 70: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV, donnerstags am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	111
Abbildung 71: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV, freitags am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	112
Abbildung 72: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 8 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	112
Abbildung 73: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 9 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	113
Abbildung 74: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 12 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	113
Abbildung 75: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 13 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	114
Abbildung 76: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 8 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	114

Abbildung 77: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 9 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	115
Abbildung 78: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 12 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	115
Abbildung 79: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 13 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	116
Abbildung 80: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 8 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	116
Abbildung 81: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 9 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	117
Abbildung 82: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 12 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	117
Abbildung 83: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 13 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	118
Abbildung 84: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV, mittwochs am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	118
Abbildung 85: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV, donnerstags am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	119
Abbildung 86: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV, freitags am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	119
Abbildung 87: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 9 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	120
Abbildung 88: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 10 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	120

Abbildung 89: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 13 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	121
Abbildung 90: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 14 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	121
Abbildung 91: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 17 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	122
Abbildung 92: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 18 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	122
Abbildung 93: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 9 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	123
Abbildung 94: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 10 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	123
Abbildung 95: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 13 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	124
Abbildung 96: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 14 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	124
Abbildung 97: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 17 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	125
Abbildung 98: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 18 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	125
Abbildung 99: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 9 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	126
Abbildung 100: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 10 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	126

Abbildung 101: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 14 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	127
Abbildung 102: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 17 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	127
Abbildung 103: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 18 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	128
Abbildung 104: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV, mittwochs am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	128
Abbildung 105: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV, donnerstags am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	129
Abbildung 106: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV, freitags am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	129
Abbildung 107: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 4 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	130
Abbildung 108: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 5 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	130
Abbildung 109: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 6 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	131
Abbildung 110: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 22,1 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	131
Abbildung 111: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 22,2 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	132
Abbildung 112: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 24 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	132

Abbildung 113: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 25 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	133
Abbildung 114: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 4 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	133
Abbildung 115: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 5 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	134
Abbildung 116: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 6 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	134
Abbildung 117: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 22,1 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	135
Abbildung 118: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 22,2 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	135
Abbildung 119: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 24 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	136
Abbildung 120: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 25 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	136
Abbildung 121: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 4 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	137
Abbildung 122: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 5 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	137
Abbildung 123: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 6 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	138
Abbildung 124: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 22,1 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	138

Abbildung 125: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 22,2 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	139
Abbildung 126: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 24 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	139
Abbildung 127: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 25 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	140
Abbildung 128: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV, mittwochs am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	140
Abbildung 129: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV, donnerstags am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	141
Abbildung 130: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV, freitags am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	141
Abbildung 131: : Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 1 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	142
Abbildung 132: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 5 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	142
Abbildung 133: : Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 1 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	143
Abbildung 134: : Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 5 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	143
Abbildung 135: : Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 1 am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	144
Abbildung 136: : Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 5 am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	144
Abbildung 137: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Mittwoch, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	145
Abbildung 138: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Donnerstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	145

Abbildung 139: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Freitag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.....	146
Abbildung 140: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 1, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	146
Abbildung 141: : Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 3, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	147
Abbildung 142: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 24, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	147
Abbildung 143: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 25, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	148
Abbildung 144: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 1, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	148
Abbildung 145: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 3, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	149
Abbildung 146: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 24, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	149
Abbildung 147: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 25, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	150
Abbildung 148: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV, Signalgeber 1, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	150
Abbildung 149: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV, Signalgeber 3, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	151
Abbildung 150: : Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV, Signalgeber 24, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	151
Abbildung 151: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV, Signalgeber 25, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	152

Abbildung 152: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 2, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	152
Abbildung 153: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 3, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	153
Abbildung 154: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 4, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	153
Abbildung 155: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 5, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	154
Abbildung 156: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 2, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	154
Abbildung 157: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 3, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	155
Abbildung 158: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 4, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	155
Abbildung 159: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 5, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	156
Abbildung 160: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV im gesamten Messzeitraum, Signalgeber 2, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	156
Abbildung 161: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV im gesamten Messzeitraum, Signalgeber 3, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	157
Abbildung 162: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV im gesamten Messzeitraum, Signalgeber 4, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	157
Abbildung 163: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV im gesamten Messzeitraum, Signalgeber 5, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	158

Abbildung 164: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Mittwoch, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	158
Abbildung 165: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Donnerstag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	159
Abbildung 166: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Freitag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.	159
Abbildung 167: Kumulierte Detektionen für die Detektoren V24-4, V25-0, D25-4 und So1 am Knoten SLU120.	160
Abbildung 168: Kumulierte Detektionen für die Detektoren So2, Zo1, Zo2 und Zo3 am Knoten SLU120.	160
Abbildung 169: Kumulierte Detektionen für die Detektoren Zo4, D3.8, D24.8, D25.8 und Zo5 am Knoten SLU120.	161
Abbildung 170: Kumulierte Detektionen für die Detektoren B15an, B28an1; B15an; B19an, B28an2; B19an und B28ab am Knoten SLU120.	161
Abbildung 171: Kumulierte Detektionen für die Detektoren B29an, B20an; B29an; B30an, B21an; B30an; B20ab; B21ab am Knoten SLU120.	162
Abbildung 172: Kumulierte Detektionen für die Detektoren So6, D 7-0, D7-4 und D308 am Knoten SLU121.	162
Abbildung 173: Kumulierte Detektionen für die Detektoren D48, Zo1, Zo2 und Zo3 am Knoten SLU121.	163
Abbildung 174: Kumulierte Detektionen für die Detektoren D 4-0, D 4-4, D 5-0 und D 5-4 am Knoten SLU121.	163
Abbildung 175: Kumulierte Detektionen für die Detektoren D 2-4, D 2-8, D 3-0 und D 3- am Knoten SLU121...	164

Tabellensverzeichnis

Tabelle 1: Auszug aus dem Datensatz SLU120, 17.01.2020.	27
Tabelle 2: Kodierung der Zustände für Detektoren und LSAs.	28
Tabelle 3: Modifizierte Kodierung für Detektoren.	28
Tabelle 4: Modifizierte Kodierung für LSA.	28
Tabelle 5: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für den FV am Knoten SLU120 der betrachteten Zeiträume.	50
Tabelle 6: Vergleich der Häufigkeit von Wartezeiten am SLU120, die einen Grenzwert von 60 Sekunden und 90 Sekunden überschreiten.	51
Tabelle 7: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für die einzelnen Signalgeber des FVs am Knoten SLU120 der Morgen- und Abendspitze des Dienstag und für den gesamten Messzeitraum.	52

Tabelle 8: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für den FV am Knoten SLU121 der betrachteten Zeiträume.....	58
Tabelle 9: Vergleich der Häufigkeit von Wartezeiten am SLU121, die einen Grenzwert von 60 Sekunden und 90 Sekunden überschreiten	59
Tabelle 10: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für die einzelnen Signalgeber des FVs am Knoten SLU121 der Morgen- und Abendspitze des Dienstages und für den gesamten Messzeitraum.	60
Tabelle 11: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für den ÖV am Knoten SLU120 der betrachteten Zeiträume.....	66
Tabelle 12: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für die einzelnen Signalgeber des ÖVs am Knoten SLU120 der Morgen- (MS) und Abendspitze (AS) des Dienstages und für den gesamten Messzeitraum.	67
Tabelle 13: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für den ÖV am Knoten SLU121 der betrachteten Zeiträume.....	74
Tabelle 14: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für die einzelnen Signalgeber des ÖVs am Knoten SLU121 der Morgen- (MS) und Abendspitze (AS) des Dienstages und für den gesamten Messzeitraum.....	74
Tabelle 15: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für den MIV am Knoten SLU120 der betrachteten Zeiträume.....	80
Tabelle 16: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für die einzelnen Signalgeber des MIVs am Knoten SLU120 der Morgen- (MS) und Abendspitze (AS) des Dienstages und für den gesamten Messzeitraum.	81
Tabelle 17: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Montagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.	84
Tabelle 18: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Dienstagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.....	84
Tabelle 19: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Mittwochen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.....	85
Tabelle 20: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Donnerstagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.....	85
Tabelle 21: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Freitagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.	85
Tabelle 22: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Samstagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.	86
Tabelle 23: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Morgenspitzen, dienstags, 7:00 Uhr – 9:30 Uhr.	86
Tabelle 24: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung im Mittagsverkehr, dienstags, 11:00 Uhr – 13:00 Uhr.....	86

Tabelle 25: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Abendspitzen, dienstags, 16:00 Uhr – 18:30 Uhr.....	87
Tabelle 26: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung der jeweiligen Messzeiträume von Montag bis Freitag.	87
Tabelle 27: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für den MIV am Knoten SLU121 der betrachteten Zeiträume.....	93
Tabelle 28: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für die einzelnen Signalgeber des MIVs am Knoten SLU121 der Morgen- (MS) und Abendspitze (AS) des Dienstages und für den gesamten Messzeitraum.....	94
Tabelle 29: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Montagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.....	97
Tabelle 30: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Dienstag, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.....	97
Tabelle 31: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Mittwochen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.....	98
Tabelle 32: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Donnerstagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.....	98
Tabelle 33: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Freitagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.	98
Tabelle 34: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Samstag, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.	99
Tabelle 35: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Morgenspitzen, dienstags, 7:00 Uhr – 9:30 Uhr.	99
Tabelle 36: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung im Mittagsverkehr, dienstags, 11:00 Uhr – 13:00 Uhr.....	99
Tabelle 37: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Abendspitzen, dienstags, 16:00 Uhr – 18:30 Uhr.....	100
Tabelle 38: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung der jeweiligen Messzeiträume von Montag bis Freitag.	100
Tabelle 39: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung der jeweiligen Messzeiträume für das gesamte Untersuchungsgebiet.....	104

Zusammenfassung

Im Zuge dieses Forschungsprojektes wurden zwei LSA-Steuerungen in einem Untersuchungsgebiet in der Stadt Luzern untersucht. Dabei wurde die bestehende Steuerung (VS-PLUS) mit der neuartigen Selbst-Steuerung für den FussgängerInnenverkehr (FV), den öffentlichen Verkehr (ÖV) und den motorisierten Individualverkehr (MIV) mit Analysen der Wartezeiten verglichen. Für den MIV wurden zusätzlich Belegungsauern von Detektoren und die Anzahl an harten Grünabbrüchen bestimmt. Basis der Analyse stellt ein Datensatz mit Detektor- und LSA-Daten von zwei Wochen dar. Die Datengrundlage wurde aufbereitet und auf fehlerhafte Zeitreihen von Messgeräten überprüft. Dabei wurden am Untersuchungsknoten SLU120 7 Detektoren und am SLU121 2 Detektoren von der Untersuchung ausgeschlossen. Folglich wurde die Verkehrsnachfrage analysiert, um die Vergleichbarkeit der Testwochen zu überprüfen. Es zeigt sich, dass der Zusammenhang der Verkehrsstundenwerte der zwei Testwochen nahezu linear ist, was auf eine sehr ähnliche Verkehrsnachfrage schliessen lässt. Die Ergebnisse der durchgeführten statistischen Tests unterstützten diese These.

Für den FV wurden die Wartezeiten für die einzelnen Wochentage, Signalgeber und die aggregierten Grössen für den gesamten Messzeitraum berechnet. Die mittleren Wartezeiten zeigen, dass durch den Einsatz der Selbst-Steuerung am SLU120 eine Reduktion von 31 Sekunden (mit VS-PLUS) auf 22 Sekunden (Selbst-Steuerung) erreicht werden kann. Am Knoten SLU121 ergibt sich im Mittel eine Reduktion von 1 Sekunde (VS-PLUS: 35 Sekunden; Selbst-Steuerung: 34 Sekunden). Im gesamten Untersuchungsgebiet kann somit durch die Selbst-Steuerung die Wartezeit von 35 Sekunden auf 30 Sekunden reduziert werden. Vor allem können durch die Selbst-Steuerung lange Wartezeiten für den FV (grösser als 60 Sekunden) vermieden werden.

Die Analyse für den ÖV ergab im gesamten Untersuchungsgebiet eine Reduktion von 6 Sekunden (VS-PLUS) auf 4 Sekunden (Selbst-Steuerung) der mittleren Wartezeit, was einer Reduktion von 2 Sekunden entspricht. Im Vergleich dazu ergab der separate Vergleich der Steuerungen am SLU120 und SLU121 eine Reduktion von 1 Sekunde und 6 Sekunden durch die Selbst-Steuerung. Es kann das bereits hohe Niveau von VS-PLUS gehalten und leicht verbessert werden.

Die Ergebnisse für den MIV zeigen ebenfalls ein positives Fazit für den Einsatz der Selbst-Steuerung. Es wurden die Wartezeiten untersucht aber auch Belegungsauern von Voranmeldeschlaufen (um Staubildungen aufzuzeigen) und harte Grünabbrüche (Fahrzeuge werden durch einen Grünabbruch hart gestoppt). Die Ergebnisse zeigen, dass die mittlere Wartezeit für den MIV sich im gesamten Untersuchungsgebiet von 35 Sekunden auf 27 Sekunden verringert (Reduktion von 8 Sekunden). Des Weiteren werden Belegungszeiten an der Voranmeldeschlaufe durch die Selbst-Steuerung reduziert (ein Indiz für weniger Staubildungen). Das Aggregieren der längsten Belegungszeiten zeigt eine Reduktion im Untersuchungsgebiet von 14 Sekunden bzw. 15,38%. Harte Grünabbrüche können signifikant verringert werden (Fahrzeuge werden effizient bedient und weniger häufig durch das Einleiten einer Rotphase hart gestoppt). Die Ereignisse reduzieren sich im gesamten Untersuchungsgebiet um 25,54%. Zusammenfassend kann für beide Knoten als auch für das gesamte Untersuchungsgebiet ein positives Fazit für die Selbst-Steuerung abgegeben werden. Die LSA-Steuerung verbessert die Verkehrsqualität für alle untersuchten Verkehrsmodi.

1 Einleitung

Das Projekt «Evaluierung Selbst-Steuerung» in Zusammenarbeit mit der Stadt Luzern behandelt die Beurteilung der Praxistauglichkeit einer neuartigen Methode zur Steuerung von Lichtsignalanlagen (LSA). Das System der Roland Müller Küsnacht AG wurde dabei in einem Untersuchungsgebiet der Stadt Luzern einem Praxistest unterzogen und die jeweiligen Detektor- und LSA-Daten aufgezeichnet. Das Gebiet mit den zwei Verkehrsknoten wurde vor allem deswegen gewählt, weil eine hohe Last des öffentlichen Verkehrs durch ein Busdepot der vbl – Verkehrsbetriebe Luzern AG vorherrscht. Folglich ist eine Priorisierung des ÖVs unabdinglich, aber gleichzeitig sollen die Wartezeiten der restlichen VerkehrsteilnehmerInnen ebenfalls niedrig gehalten werden. Zudem treten im Untersuchungsgebiet zu Zeiten der Morgen- und Abendspitze werktäglich Rückstaus auf. Um die Performance respektive auf die genannten gegensätzlichen Ziele der neuartigen LSA-Steuerung zu evaluieren, werden in diesem Projekt verkehrstechnisch relevante Performance-Metriken bestimmt und mit denen der bestehende LSA-Steuerung (VS-PLUS) verglichen. Folglich lässt sich ein Fazit über potenzielle Verbesserungen der Verkehrsqualität für den motorisierten Individualverkehr (MIV), öffentlichen Verkehr (ÖV) als auch FussgängerInnenverkehr (FV) abgeben. Der Veloverkehr (VV) wird in dieser Untersuchung nicht behandelt.

Das Projekt wurde gemäss der verfassten Offerte im Dezember 2019 von der Gruppe Strassenverkehrstechnik der ETH Zürich unter der Leitung von Dr. Anastasios Kouvelas bearbeitet. In den folgenden Unterkapiteln wird die Projektmotivation, Projektziele und der Inhalt dieses Berichtes behandelt.

1.1 Projektmotivation und Ziele

Mit steigender Mobilität in urbanen Gebieten ist eine effiziente und nachhaltige Abwicklung der Verkehrsnachfrage von höchster Priorität. Der Verkehrsdurchsatz wird dabei wesentlich von Knotenpunkten und deren LSAs beeinflusst. Forschungsarbeiten in dieser Domäne haben gezeigt, dass die Umsetzung von fixen Umlauf-, Rot- und Grünzeiten nicht zwingend zu minimalen Wartezeiten führt. Dennoch werden im Allgemeinen zahlreiche System mit diesem simplen Ansatz betrieben und datengetriebene Systeme finden nur langsam ihren Platz in der Praxis. Daher ist es wesentlich, neuartige Ansätze der LSA-Steuerungen nicht nur in der Wissenschaft voranzutreiben, sondern auch in der Praxis zu testen und einzusetzen. Das derzeit eingesetzte Steuerungsverfahren VS-PLUS im Stadtgebiet Luzern stellt ein Framework zur LSA-Steuerung dar, welches auf Verkehrsdaten basiert. Folglich werden verkehrsabhängige Grünzeiten und Phasenabfolgen auf Basis eines codierten Regelwerkes errechnet und angewendet. Dabei wird das Regelwerk (umgesetzt mit Wenn-Dann-Bedingungen) bei der Implementierung festgelegt, was einer Vorab-Analyse der Verkehrsnachfrage bedingt. Für die Kalibrierung des Systems wird dafür vom Hersteller ein Softwarepaket zur Verfügung gestellt, dass die Individualisierung auf einen vorliegenden Knoten ermöglicht [1].

Die Selbst-Steuerung stellt ebenfalls ein neuartiges System dar, das mit der Angabe von vorhandener Detektions- und Signalgeber-Infrastruktur und den zugehörigen Schutz- und Mindestzeiten eine Optimierung der jeweilig zu allozierenden Grün- und Rotzeiten vornimmt. Damit ist die LSA-Steuerung nachfrageabhängig und es soll eine Minimierung der Reise-, Wartezeiten und Stopps erfolgen. Zudem muss keine Vorab-Analyse der Verkehrsnachfrage und eine Kalibrierung des Systems (vor der Echtzeitanwendung) vorgenommen

werden. Die Errechnung der optimalen Lösungen für die Zielgrößen wird in Echtzeit durchgeführt und somit kann auch auf Sonderfälle (unübliche Verkehrsnachfrage, Staubildungen wegen eines Ereignisses im Verkehrssystem, etc.) reagiert werden. Es soll dabei sichergestellt werden, dass für alle VerkehrsteilnehmerInnen (MIV, ÖV, Veloverkehr (VV) und FV) die Verzögerungen reduziert werden und damit die Verkehrsqualität verbessert werden kann [2], [3].

Derzeit wird in der Stadt Luzern das Steuerungsverfahren VS-PLUS eingesetzt, was bereits Vorteile gegenüber einem System mit Fixzeiten bereitstellt. Um jedoch nachvollziehen zu können, ob die Selbst-Steuerung eine signifikante Verbesserung gegenüber der derzeitig implementierten Steuerung erzielen kann, ist eine Wirkungsanalyse mit einer Gegenüberstellung berechneter Performance-Metriken notwendig.

1.2 Inhalt der Arbeit

Ziel des Forschungsprojektes «Evaluierung Selbst-Steuerung» ist es basierend auf definierten Performance-Metriken ein Fazit über die Performance der Selbst-Steuerung gegenübergestellt mit dem bestehenden System VS-PLUS abgeben zu können. Es soll dabei zwischen den Verkehrsmodi unterschieden werden. Die Datengrundlage für die Auswertungen besteht aus Detektor- und LSA-Daten von einem vordefinierten Untersuchungsgebiet. Der Test der Selbst-Steuerung als auch das Bereitstellen der Datengrundlage wurde von der Stadt Luzern durchgeführt. Folglich wurde die Datengrundlage analysiert, eine Methodik zur Evaluierung ausgearbeitet und die Ergebnisse produziert. Der vorliegende Projektreport präsentiert und diskutiert die Ergebnisse und gibt ein Fazit über die Performanz der Selbst-Steuerung und deren Praxistauglichkeit ab.

Die Umsetzung des Projektes gliedert sich in die folgenden Arbeitspakete (AP):

- **AP 1: Datenmanagement und Datenaufbereitung**

In AP 1 wird sich mit der zur Verfügung gestellten Datengrundlage vertraut gemacht und der Datensatz in eine Form gebracht, die für automatisierte Auswertungen passend ist. Dabei wird vor allem Wert auf die Identifizierung von fehlerhafte Datenreihen bzw. Ausreisser gelegt, um diese aus dem Datensatz zu entfernen. Die Arbeiten werden durch Dokumentationsmaterial der Stadt Luzern als auch Informationen über potenzielle Einflüsse während des Aufzeichnungszeitraumes unterstützt.

- **AP 2: Entwicklung der Auswertemethodik**

Um die derzeit implementierte LSA-Steuerung und die Selbst-Steuerung objektiv vergleichen zu können, wird in AP 2 eine Auswertemethodik für die zu evaluierenden Verkehrsmodi entwickelt. Dabei wird separat für den MIV, den ÖV, als auch den FV eine passende Herangehensweise berücksichtigt. Die Methodik stützt sich auf die aufbereitete Datengrundlage von AP 1 und wird mittels der zur Verfügung gestellten LSA und Detektordaten entwickelt. Die Implementierung der Auswertung erfolgt dabei so generisch als möglich, um die entwickelten Skripte auch für zukünftige Evaluierungen dieser Form verwenden zu können. Zusätzlich soll eine Bestimmung der Zielgrößen aggregiert für die einzelnen Knoten, das Untersuchungsgebiet als auch für

einzelne Verkehrsströme möglich sein. Zudem wird die Verkehrsnachfrage in den zwei Testwochen evaluiert, um die Vergleichbarkeit dieser Datensätze objektiv nachweisen zu können.

- **AP 3: Evaluierung Ist-Zustand und Selbst-Steuerung**

Basierend auf der Methodik von AP 2 werden die Datensätze für die zwei Testzeiträume (ohne/mit Selbst-Steuerung) automatisiert ausgewertet und die Ergebnisse der Zielgrößen (in numerischer als auch grafischer Form) abgeleitet. Eine Evaluierung der Ansätze – für einzelne Verkehrsströme als auch für das gesamte Untersuchungsgebiet - kann durchgeführt werden. Des Weiteren wird in AP 3 die Verkehrsnachfrage der Testzeiträume bestimmt und evaluiert, um sicherstellen zu können, dass eine fundierte Grundlage für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben ist.

- **AP 4: Analyse der Ergebnisse und Fazit**

Die Ergebnisse von AP 3 werden diskutiert und ein finales Fazit über die Performanz der Selbst-Steuerung gegenüber des derzeitig eingesetzten Systems wird abgegeben.

Die folgenden Kapitel des Berichts strukturieren sich wie folgt: Kapitel 2 gibt einen Überblick der Literatur über neuartige LSA-Steuerungssysteme und setzt damit den Ansatz der Selbst-Steuerung in den passenden wissenschaftlichen Kontext. Das Untersuchungsgebiet wird mit Beschreibung der Lage, Verkehrssituation und verfügbaren LSAs und Detektoren in Kapitel 3 eingeführt. Kapitel 4 beschreibt die Datengrundlage und die Aufbereitung des Datensatzes, der für die Auswertung herangezogen wird. In Kapitel 5 wird die Methodik zur Auswertung eingeführt. Kapitel 6 bis 9 zeigen die Ergebnisse der Evaluierungsstudie auf, welche folglich in Kapitel 10 final zusammengefasst werden. Der Report schliesst mit einer Zusammenfassung und Ausblick in Kapitel 11. Nach Abschluss der Arbeiten werden die erarbeitete Theorie als auch die Ergebnisse der Evaluierungsstudie an die Stadt Luzern übermittelt.

2 Literaturüberblick

Um Konfliktpunkte von Verkehrsströmen sicher und effizient abzuwickeln, werden seit geraumer Zeit Lichtsignalanlagen verwendet, welche VerkehrsteilnehmerInnen signalisieren, wann eine Freigabe für einen Verkehrsstrom gegeben ist. Kommen solche Systeme zum Einsatz (was wesentlich von der Verkehrsnachfrage bzw. der Bedeutung des Knotens im Verkehrssystem abhängt), ist das Design der LSA-Steuerung ein kritischer Prozess, um gewährleisten zu können, dass ein Knoten a) die Verkehrsströme effizient bedient, i. a. W. die gegebene Kapazität ausschöpft und b) die Wartezeiten der VerkehrsteilnehmerInnen minimiert [4]. Häufig werden in der Praxis nach wie vor LSA-Steuerung mit fixen Umlaufzeiten bzw. Rot- und Grünzeiten implementiert. Dennoch finden sich in der Literatur verschiedene Ansätze, um mit datengetriebenen Optimierungsalgorithmen und Regelungssystemen die optimale Umlaufzeit als auch das optimale Verhältnis zwischen Rot- und Grünzeit zu bestimmen. Der interessierte Leser wird hier auf Literaturrecherchen wie z. B. [5] verwiesen. Um zu zeigen, ob eine LSA-Steuerung in der Lage ist Verkehrsströme effizienter zu bedienen müssen dementsprechende Performance-Metriken verwendet werden, um einen objektiven Vergleich möglich zu machen. Als Datengrundlage werden einerseits häufig Induktionsschleifen und Signaldaten verwendet [6]. Es finden sich aber auch Ansätze, die mit Fahrzeugtrajektorien oder Kameradaten arbeiten, um die relevanten Verkehrsgrößen abzuleiten [7], [8].

Für eine Auswertung der Steuerungsperformance haben sich diverse Metriken etabliert, welche sich für den Vergleich eignen und auch in dieser Studie herangezogen werden sollen. Zentral wird hier die Wartezeit (für einzelne Verkehrsströme, als auch aggregiert für einen Knoten) als eine massgebende Grösse für die Effizienz einer LSA-Steuerung betrachtet. Die Magnitude der Wartezeit gibt Aufschluss darüber, wie lange eine Verkehrsteilnehmerin an einem Knoten warten muss. Beispielhaft finden sich in [9]–[11] Ansätze, welche die Wartezeit als Metrik implementieren. Des Weiteren sind die Belegungsgrade von Detektoren relevant, um eine Aussage über eine potenzielle Staubildung als auch über die Entleerung einer Schlange abzuleiten. Dabei wird die binäre Aussage, ob ein Detektor belegt oder nicht belegt ist, mit der zeitlichen Komponente verschnitten, wie beispielsweise in [12] beschrieben. Die Auswahl der Detektoren hängt dabei jedenfalls von deren Position ab und sollte in Anbetracht der gewünschten Analyse fundiert gewählt werden. Es sei hier erwähnt, dass sich in der Literatur auch technisch aufwändigere Ansätze finden, welche beispielsweise auf Videodaten basieren [13], [14]. Detektordaten geben zudem Aufschluss über die Zeitlücken eines LSA-gesteuerten Verkehrsstromes. Eine Zeitlücke definiert dabei die Zeitdauer zwischen der Sperrung eines Verkehrsstromes und der ersten Belegung eines halteliniennahen Detektors nach der Sperrung. Folglich kann eine Aussage über die Qualität der Schlangenentleerung durch die LSA-Steuerung abgeleitet werden. Zudem ermöglicht die Methodik zur Ermittlung der Zeitlücken auch die Analyse der harten Grünabbrüche von Verkehrsströmen (i. a. W. die Anzahl der Ereignisse, wenn ein Verkehrsstrom durch die LSA-Steuerung hart gestoppt werden muss und daher keine Schlangenentleerung gegeben ist). Arbeiten, die sich dieser Größen ebenfalls bedienen, finden sich beispielsweise in [15] und [16].

Die beschriebenen Metriken werden in dieser Arbeit - auf Basis der gegebenen Literatur - angewendet, um die Performance des Steuerungsverfahrens VS-PLUS und der Selbst-Steuerung zu evaluieren.

3 Untersuchungsgebiet

Um die Evaluierung der beiden Testfälle, LSA-Steuerung mit VS-PLUS (in Folge auch als Nullfall bezeichnet) und LSA-Steuerung mit der Selbst-Steuerung (in Folge auch als Planfall bezeichnet), durchzuführen, wurde in der Stadt Luzern ein Untersuchungsgebiet festgelegt. Es handelt sich dabei um zwei nebeneinandergelegene Knotenpunkte in der Umgebung des Bahnhofes der Stadt Luzern. Eine Karte mit dem Untersuchungsgebiet und der Umgebung ist in Abbildung 1 dargestellt.

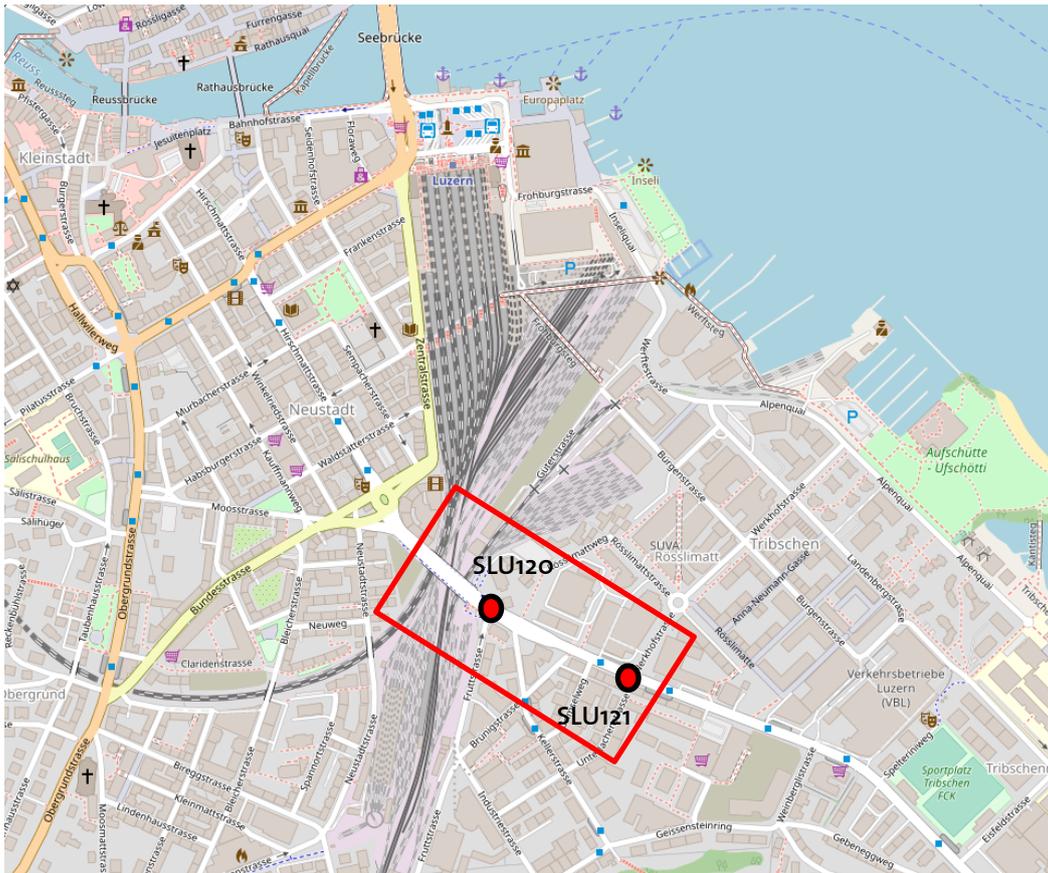


Abbildung 1: Umgebungskarte mit dem Untersuchungsgebiet markiert in Rot. Die analysierten Knoten sind mit roten Punkten gekennzeichnet (Open Street Map, 2020).

Der Knoten SLU120 stellt den Schnittpunkt der Verkehrsströme von der Langensandbrücke kommend in die Tribtschenstrasse (und vice versa) mit der Frutt- und Kellerstrasse dar und ist in Abbildung 2 dargestellt. Auf der Achse Langensandbrücke, Tribtschenstrasse wird sowohl MIV, ÖV, FV als auch VV geführt. Die Fruttstrasse stellt einen als Einbahn geführten Zubringer zu der genannten Achse dar. Der Veloverkehr wird auf einem Velostreifen zum Knotenpunkt geführt. Des Weiteren ist der VV gegen die Fahrtrichtung der Fruttstrasse erlaubt. Eine dementsprechende Infrastruktur für das Einbiegen des VV in die Fruttstrasse ist dafür bei der Mündung der Langensandbrücke in die Tribtschenstrasse vorgesehen. In der Kellerstrasse kann sowohl Verkehr zu als auch abfließen. Für den VV ist keine gesonderte Infrastruktur vorhanden.



Abbildung 2: Luftbild des Knotens SLU120 im Untersuchungsgebiet (Geoportal LU, 2020).

In der Fruttstrasse wird kein ÖV geführt. Der ÖV ist von West nach Ost mit dem MIV definiert und kann von der Kellerstrasse zu- als auch abfließen. In die Gegenrichtung von der Tribschenstrasse kommend auf die Langensandbrücke ist eine gesonderte Busspur vorhanden. Es sind keine Haltestellen im Knotenbereich vorhanden. Für den FV sind drei Querungen vorgesehen. Dabei stellt die Querung der Fruttstrasse einen direkten FV-Übergang dar. Die Querungen der Kellerstrasse als auch der Tribschenstrasse sind mit einer Schutzinsel in der Fahrbahnmitte ausgeführt. Alle genannten Querungen sind mittels LSA geregelt.

Abbildung 3 zeigt die installierten LSA- und Detektorgeräte am Knoten SLU120. Dieser umfasst einen Doppelknoten, der von einer LSA geregelt wird. Dabei sind die Signalgeber, die für den MIV, ÖV und VV gemeinsam genutzt werden, mit einer eingekreisten Nummer mit durchgehender Linie versehen. Signalgeber, die speziell für den ÖV implementiert sind, sind mit strichliert eingekreisten Nummern abgebildet. Die vergebene Nummerierung korrespondiert mit den skizzierten Signalgebern im Plan. In Summe sind 30 Signalgeber am Knoten verbaut. Die 48 Detektoren sind mit den rechteckigen Symbolen verortet. Hier muss zwischen Schräglaufschlaufen (direkt vor den Haltelinien), Langschlaufen (i. d. R. hinter der Schräglaufschleife und Haltelinie), Stauschlaufen (in Distanz zu den zuvor genannten Detektoren, um eine Staubildung zu detektieren) und Zählschleifen unterschieden werden. Zudem sind für den MIV Detektoren für eine Voranmeldung bzw. Verlängerung vorgesehen. Auch für den ÖV sind Detektoren für die An- und Abmeldung verbaut. Diese werden von anderen Verkehrsmitteln nicht aktiviert und erlauben somit eine eindeutige Identifizierung des ÖVs. An den Querungen für den FV sind Taster verbaut, die die Erkennung einer Grünzeitanforderung erlauben. Insgesamt sind am Knoten SLU120 9 Schräg- und Langschlaufen, 4 Detektoren zur Voranmeldung bzw. Verlängerung der Grünzeit, 2 Stauschlaufen und 5 Zählschlaufen verbaut. Zudem gibt es 11 Detektoren für die An- und Abmeldung des ÖVs sowie 8 Taster für den FV. Zu erwähnen ist, dass für den Veloverkehr zwar Signalgeber und Velo-Schutzblinker (als eigene Signalgruppe) vorhanden sind, diese aber nicht gesondert gesteuert werden. Zudem sind auch Detektoren – gesondert für den Veloverkehr- nicht

vorhanden. Deshalb können in den aufgezeichneten Daten Velos nicht von ÖV oder MIV unterschieden und auch nicht mit den LSA-Daten verschnitten werden.

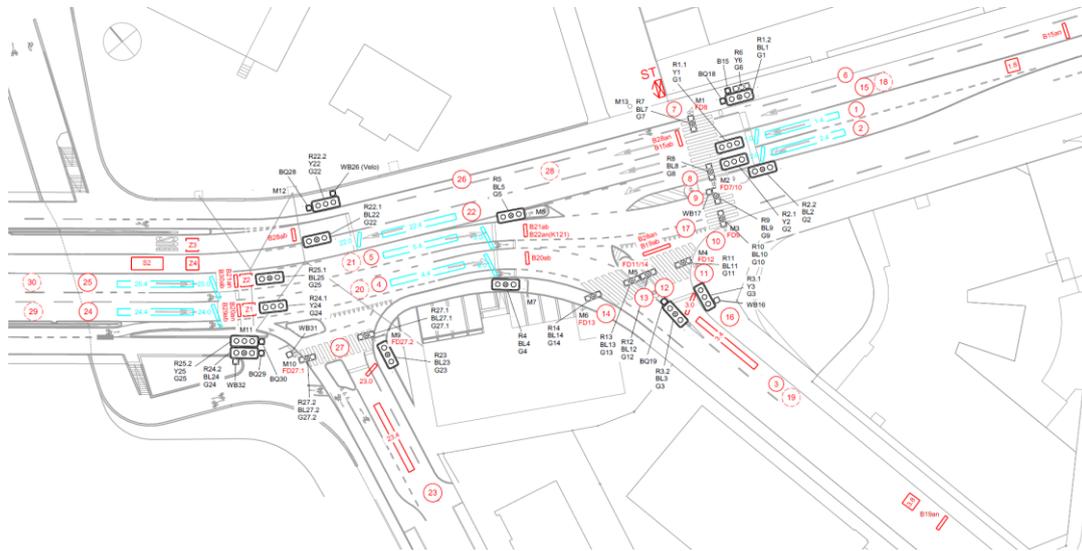


Abbildung 3: Installierte Signal- und Detektorgeräte am Knoten SLU120.

In Abbildung 4 sind die zusätzlich verbauten Detektoren auf der Langensandbrücke abgebildet, die ebenfalls für die Steuerung des Knotens SLU120 verwendet werden. Als Beispiel sieht man hier einen Detektor zur Anmeldung des ÖVs (B29an/B30an), eine Zählsehleife (Z5), zwei Detektoren für die Voranmeldung bzw. Verlängerung (24.8 und 25.8) und eine Stauschleife (S1). Eine grössere Darstellung des Knotenplans findet sich im Anhang des Berichtes.

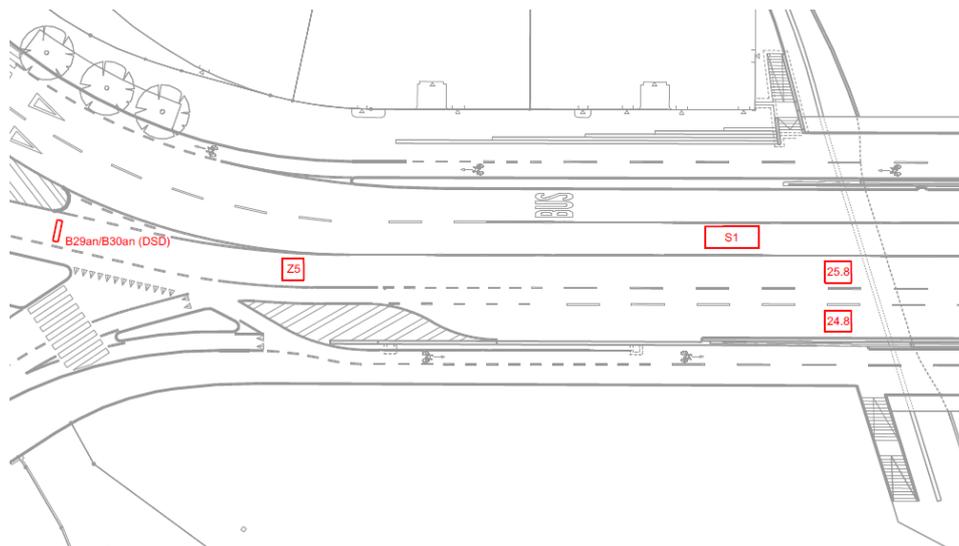


Abbildung 4: Zusätzlich installierte Detektorgeräte für die LSA-Steuerung des Knotens SLU120.

Der zweite Knoten des Untersuchungsgebietes ist die nächstgelegene Kreuzung Richtung Osten vom Knoten SLU120 (

Abbildung 5). Es handelt sich dabei um den Schnittpunkt der Verkehrsströme der Tribschenstrasse mit jenen der Werkhof- und Unterlachenstrasse. Auf der Tribschenstrasse wird der MIV mit dem ÖV und Veloverkehr (mit Velostreifen) gemeinsam geführt. Jedoch ist es dem ÖV erlaubt, die Fahrspur der Rechtsabbieger von der Tribschenstrasse in die Werkhofstrasse zu benützen, um die Haltestelle nach dem Knoten in der Tribschenstrasse zu erreichen. Folglich wird der ÖV von dort aus in einer Busspur weitergeführt. Die Unterlachenstrasse erlaubt das Zu- und Abfließen von Verkehr zum/vom Knoten. Es wird kein ÖV geführt und es ist keine gesonderte Veloinfrastruktur vorhanden. Die Werkhofstrasse fungiert ebenfalls als Zubringer und es kann auch Verkehr abfließen. Es wird kein ÖV geführt. Für den Veloverkehr ist ein Velostreifen vorgesehen, der VerkehrsteilnehmerInnen zu einem Velosack für den Geradeausverkehr führt. Der abfliessende Verkehrsstrom des Veloverkehrs in die Werkhofstrasse wird ebenfalls mit einem Velostreifen geführt. Für den FV sind vier Querungen vorgesehen und LSA-geregelt. Drei davon sind mit einer Schutzinsel implementiert.



Abbildung 5: Luftbild des Knotens SLU121 im Untersuchungsgebiet (Geoportal LU, 2020).

Abbildung 6 zeigt die verbauten Signalgeber und Detektoren am Knoten SLU121. Die Darstellung der jeweiligen Typen ist dabei analog zu dem Plan von Knoten SLU120. Es sind insgesamt 21 Signalgeber und 39 Detektoren verbaut. Davon sind 7 Schräg- und Langschlaufen, 6 Detektoren für die Voranmeldung bzw. Verlängerung der Grünzeit, 1 Stauschleife und 3 Zählschlaufen verbaut. Für den ÖV sind für die An- und Abmeldung 4 Detektoren vorgesehen. Der FV wird mit 11 Tastern gesteuert. Zu erwähnen ist wiederum das für den Veloverkehr keine gesonderten Signalgeber und auch Detektoren vorhanden sind. Eine grössere Darstellung des Knotenplans findet sich im Anhang des Berichtes.

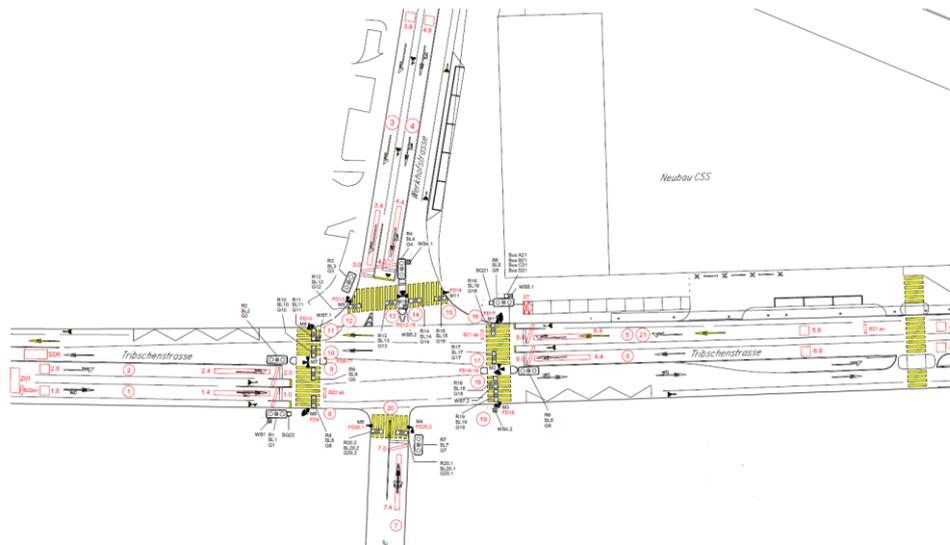


Abbildung 6: Installierte Signal- und Detektorgeräte am Knoten SLU121.

Die LSA- und Detektordaten des beschriebenen Untersuchungsgebietes stellen die Grundlage für die Evaluierung der LSA-Steuerungen dar. Die Datengrundlage und Aufbereitung der Datensätze mit der dazugehörigen Kodierung wird im nächsten Kapitel beschrieben.

4 Datengrundlage und Aufbereitung

Die bereitgestellte Datengrundlage ist in Form von strukturierten Textdaten für die Knoten SLU120 und SLU121 verfügbar. Die Daten beinhalten Einträge des jeweiligen Status der Signalgeber und Detektoren zu einem bestimmten Zeitstempel. Die Auflösung ist mit einer Sekunde festgelegt. Daher ist eine Aggregation der Daten nicht notwendig.

Der Untersuchungszeitraum ist vom 13.01.2020 bis zum 26.01.2020 definiert. Dabei wurde die Aufzeichnung des Planfalles mit der Selbst-Steuerung in den ersten 7 Tagen (13.01 – 19.01) durchgeführt. Danach wurde die bisherige LSA-Steuerung im Zeitraum vom 19.01 bis 26.01 verwendet. Der Zeitpunkt der Umstellung der LSA-Steuerung erfolgt dabei um 22:07 Uhr am 19.01. Der dabei aufgezeichnete Zeitraum wird mit 6:00 Uhr morgens bis 23:00 Uhr abends angegeben.

Der Datensatz enthält jeweils eine Kodierung für LSA und Detektoren. Es werden dabei für Signalgeber ausschliesslich Zeichen verwendet. Bei den Detektoren wird für eine Belegung die Identifikation «1» bis «9» verwendet. Dabei stellt der Wert, welcher in dem Intervall [1,9] definiert ist, die Frequenz der Belegung dar. Ein Detektor könnte somit öfters pro Zeitschritt belegt sein. Jedoch ist eine solche Frequenz unrealistisch und kommt in den Daten nur sehr spärlich vor. Es wurde sich mit der Expertise des Projektpartners bezüglich der Infrastruktur darauf geeinigt, dass Frequenzen von 2 bis 9 ignoriert werden können. Ist ein Detektor nicht belegt, wird dies mit einem «.» gekennzeichnet. Ein Ausschnitt aus den Daten ist in Tabelle 1 gelistet. Die Kodierung ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 1: Auszug aus dem Datensatz SLU120, 17.01.2020.

		SG	SG	SG	SG	SG	SG	...	D	D	D	D	D	D	D	D	
Datum	Zeit	1	2	3	4	5	6	...	1	2	3	4	5	6	7	8	9
17.01.2020	10:00:25	|	.	.	/	/	|	...	1	1	.	1	1	.	.	1	1
17.01.2020	10:00:26	|	.	.	/	/	|	...	.	1	.	1	1	.	.	1	1
17.01.2020	10:00:27	|	.	.	/	/	|	...	.	1	.	1	1	.	.	1	1
17.01.2020	10:00:28	|	=	.	.	.	|	...	1	.	.	1	1	.	.	1	1
17.01.2020	10:00:29	|	|	.	.	.	|	...	.	.	.	1	1	.	.	1	1
17.01.2020	10:00:30	/	|	.	.	.	|	...	.	.	.	1	1	.	.	1	1
17.01.2020	10:00:31	/	|	.	.	.	|	...	.	.	.	1	1	.	.	1	1
17.01.2020	10:00:32	/	|	.	.	.	|	...	1	.	.	.	1	.	.	1	1
17.01.2020	10:00:33	.	|	.	.	.	|	...	.	.	.	.	1	.	.	1	1
17.01.2020	10:00:34	.	|	.	.	.	|	...	.	.	.	1	.	.	.	1	1
17.01.2020	10:00:35	.	|	.	.	.	|	...	1	.	.	.	.	.	.	1	1

Zusätzlich sind Videodaten der zwei Testwochen verfügbar. Jedoch dienen diese nur zur Überprüfung der Plausibilität der Implementierungen, da nur eine Blickrichtung des Knotens SLU120 und ausgewählte Zeitabschnitte verfügbar sind. Wenn die Videodaten zur Überprüfung herangezogen worden sind, wird speziell darauf hingewiesen.

Tabelle 2: Kodierung der Zustände für Detektoren und LSAs.

Sensortyp	Zustand	Kodierung
Detektor	Belegt	1 ...9
Detektor	Nicht belegt	.
Signalgeber	Rot	.
Signalgeber	Rot-Gelb	=
Signalgeber	Grün	l
Signalgeber	Gelb	/

Da die Daten in kleineren Portionen als Textdateien zur Verfügung gestellt wurden, wird als erster Schritt ein zusammengefügter Datensatz für den Null- und Planfall generiert. Es werden dabei die einzelnen Dateien automatisiert eingelesen und aneinandergesetzt. Das ermöglicht eine flexible Analyse von einzelnen Elementen und Zeitintervallen. Zudem ist die festgelegte Kodierung für eine effiziente numerische Analyse suboptimal. Überprüfungen (vor allem in Schleifen) auf Konditionen, die aus Zeichenketten definiert werden, können die Rechenzeit erheblich erhöhen. Es wird die Kodierung daher neu definiert und mit numerischen Werten ersetzt. Da die Datenwerte der Detektoren der Frequenzen 2 bis 9 auf die Frequenz 1 gesetzt werden können, vereinfacht sich die Kodierung auf die in Tabelle 3 gelistete Konvention.

Tabelle 3: Modifizierte Kodierung für Detektoren.

Sensortyp	Zustand	Kodierung
Detektor	Belegt	1
Detektor	Nicht belegt	0

Für die LSA wird analog eine neue Kodierung festgelegt, um nicht mit Zeichenketten arbeiten zu müssen. Die neue Konvention ist in Tabelle 4 ausgeführt.

Tabelle 4: Modifizierte Kodierung für LSA.

Sensortyp	Zustand	Kodierung
Signalgeber	Rot	3
Signalgeber	Rot-Gelb	4
Signalgeber	Grün	5
Signalgeber	Gelb	6

Die neue Kodierung für die Detektoren und LSAs wird in den zusammengefügten Datensätzen automatisiert ersetzt. Zudem wird bei diesem Schritt überprüft, ob Kodierungszeichen im Datensatz vorhanden sind, die nicht der Spezifizierung entsprechen. Die Analyse hat jedoch gezeigt, dass das nicht vorkommt.

Um die Qualität des Datensatzes zu eruieren, wurde zuerst der Aufzeichnungszeitraum überprüft. Hier zeigt sich, dass die Aufzeichnung für den Knoten SLU120 am 13.01.2020 um 5:53 Uhr startet und am 26.01.2020 um 18:49 Uhr endet. Damit sind am letzten Tag der Aufzeichnungen 4 Stunden und 11 Minuten weniger Datenmaterial vorhanden. Dazwischen ist die Zeitreihe jedoch kontinuierlich und weist auf keine Probleme hin. Die Zeitreihe des Knotens SLU121 zeigt, dass die Aufzeichnung am 13.01.2020 um 13:47 Uhr startet und jeden Tag um 20:30 endet, was nicht dem angegebenen Zeitraum von 6:00 Uhr bis 23:00 Uhr entspricht. Des

Weiteren weist die Zeitreihe an einem Tag pro Woche einen anderen Messzeitraum auf. Die Daten sind an diesen beiden Tagen nur von 7:30 Uhr bis 16:30 Uhr verfügbar. Da die Abweichungen aber in beiden Wochen identisch sind, stellt dies für die Bestimmung der Verkehrsnachfrage als auch für die Untersuchung der Untersuchungsgrößen keine Einschränkung dar.

Um die Validität der Detektoren- und LSA-Daten zu überprüfen, wurde die Abfolge der Signale (i. a. W., für einen Signalgeber, rot; rot-gelb; grün, gelb, rot) überprüft. Bei den Detektoren wurde die Belegungszeit analysiert, um unrealistisch lange Belegungszeiten (welche oft auf einen Defekt hinweisen) detektieren zu können. Der Datensatz zeigt dahingehend keine Auffälligkeiten der LSA-Daten. Die Detektordaten werden jedoch in Kapitel 4.1 und 4.2 genauer untersucht.

Es zeigte sich auch, dass die Taster FD27-1 und FD27-2 am Knoten SLU120 und FD20-1 und FD20-2 am Knoten SLU121 des FVs keinen Signalwechsel aufweisen. Der Grund dafür ist, dass diese Geräte nicht in Betrieb sind und die korrespondierenden Signalgruppe mit dem MIV mitgeschaltet wurden (i. a. W., wenn für den MIV eine Grünphase eingeleitet wird, wird diese auch dem FV zugeteilt). Die Signale der FD-Detektoren zeigen sonst keine Auffälligkeiten. Des Weiteren zeigen auch die Detektoren D1-o und D6-o am Knoten SLU121 keine Signalwechsel. Diese sind als defekt zu deklarieren und werden in der Analyse nicht berücksichtigt. Die Daten der Detektoren D5-o und D5-4 sind zudem vertauscht – das wurde bereinigt und berücksichtigt. Aufgrund dieses Umstandes werden einzelnen Detektoren für den MIV als auch den ÖV hier nochmals analysiert und diskutiert, um eine korrekte Funktionsweise nachweisen zu können.

4.1 Detektorenanalyse Knoten SLU120

Um die korrekte Funktionsweise eines verbauten Detektors am Knoten SLU120 nachweisen zu können, werden die Zeitreihen der Detektionen analysiert. Dabei werden hier die kumulierten Detektionen dargestellt. Das ermöglicht Dauerbelegungen oder Ausfälle zu detektieren. Man beachte, dass die Analyse hier qualitativ durchgeführt wird und auf Basis der Zeitreihen eines Tages entschieden wird, welche Geräte aus der Analyse ausgeschlossen werden. Vorab wird eine Menge an funktionstüchtigen Detektoren diskutiert, welche in Abbildung 7 dargestellt sind.

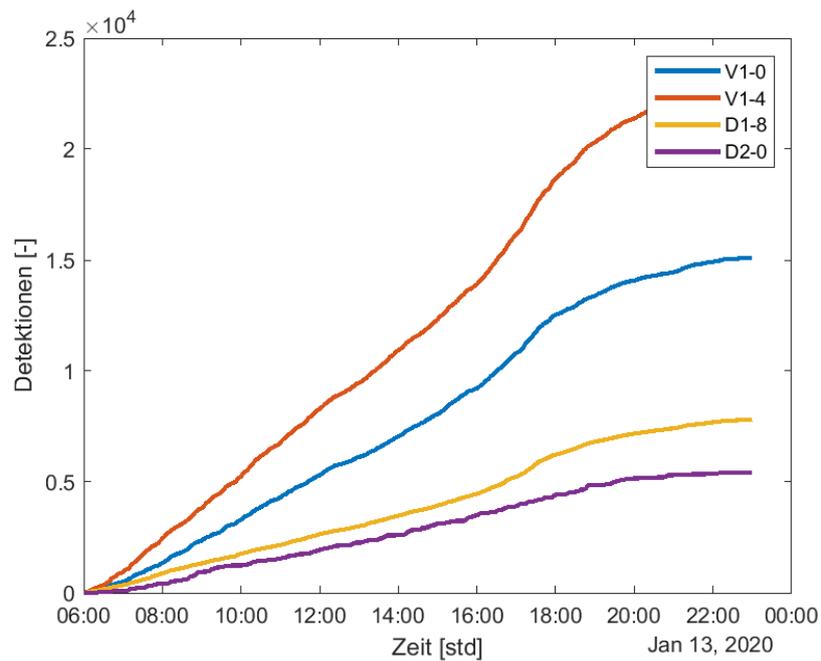


Abbildung 7: Kumulierte Detektorbelegungen am Knoten SLU120 für die Geräte V 1-0, V 1-4, D 1-8 und D 2-0.

Es zeigt sich, dass alle dargestellten Geräte eine kontinuierliche Zeitreihe ohne Ausfälle oder Dauerbelegungen darstellen. Es kann daraus geschlossen werden, dass diese Detektoren ohne weiter notwendige Schritte in die Analyse miteinbezogen werden können. Alle weiteren Abbildungen von korrekt-arbeitenden Geräten finden sich im Anhang. In Folge werden die defekten Geräte diskutiert und folglich aus der Analyse ausgeschlossen.

In Abbildung 8 zeigt sich, dass die Detektoren V 2-4, D 3-0 und D 3-4 korrekt funktionieren. Der Detektor V 4-0 zeigt jedoch einen linearen Anstieg von 12:30 Uhr bis 17:15 Uhr. Dieses Verhalten deutet auf eine Dauerbelegung in diesem Zeitraum hin. Es wird dieser Detektor daher für alle weiteren Analyse nicht verwendet.

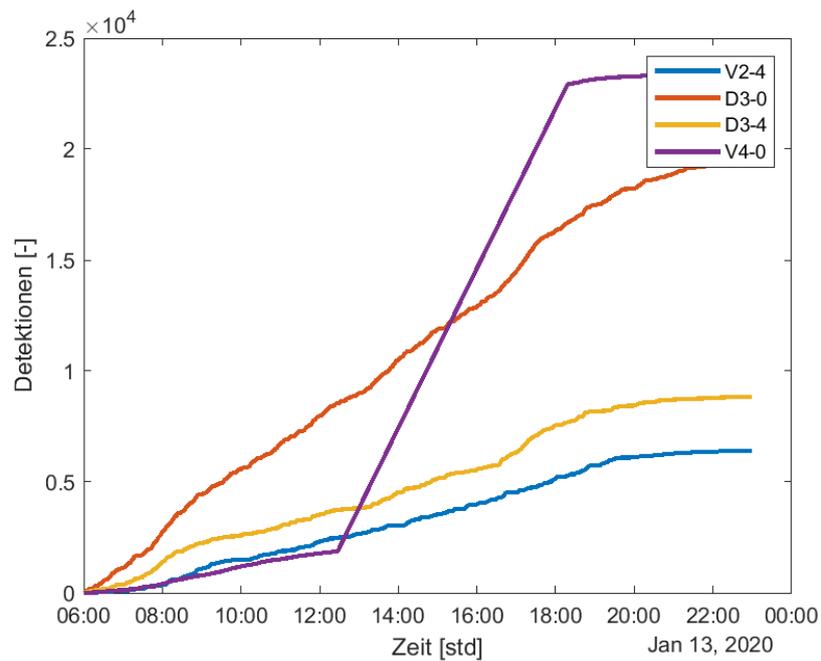


Abbildung 8: Kumulierte Detektorbelegungen am Knoten SLU120 für die Geräte V 2-4, D 3-0, D 3-4 und V 4-0.

Abbildung 9 zeigt die Zeitreihen für die Detektoren V 4-4, V 5-0, V 5-4 und V 22-0. Hier weisen die Zeitreihen aller Geräte auf stattfindende Dauerbelegungen hin und V 4-4, V 5-0 und V 5-4 werden daher von der Analyse ausgeschlossen. Es zeigen sich beim Detektor V 22-0 zwar nur kürzere Ausfälle, dennoch soll für einen fairen Vergleich der LSA-Steuerungen gesorgt werden. Daher wird auch dieser Detektor ausgeschlossen.

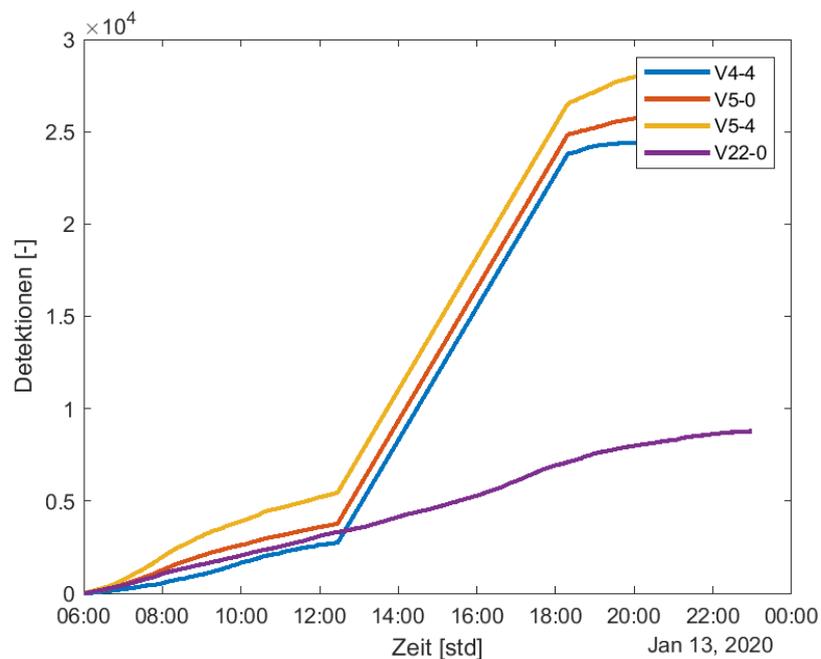


Abbildung 9: Kumulierte Detektorbelegungen am Knoten SLU120 für die Geräte V 4-4, V 5-0, V 5-4, V 22-0.

In Abbildung 10 zeigt nur der Detektor V 22-4 Anzeichen von Dauerbelegungen im Zeitbereich von 9:00 Uhr bis 12:00 Uhr. Dieses Gerät wird ebenfalls nicht in die Analyse miteinbezogen.

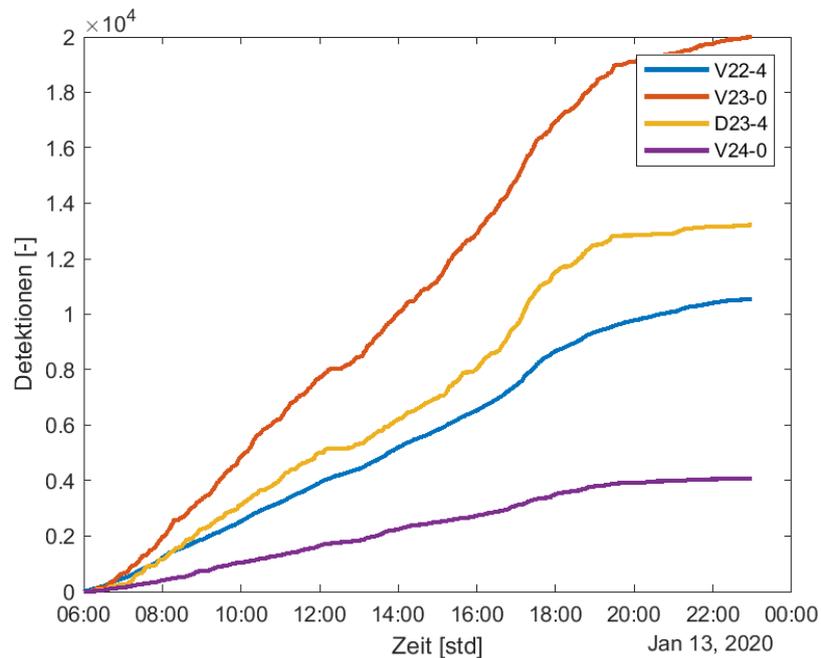


Abbildung 10: Kumulierte Detektorbelegungen am Knoten SLU120 für V 22-4, V 23-0, D 23-4, V 24-0.

Alle anderen Detektoren funktionieren auf Basis dieser Beurteilung korrekt und werden für die Analyse berücksichtigt. Die Abbildungen finden sich im Anhang.

4.2 Detektorenanalyse Knoten SLU121

Am Knoten SLU121 wird dieselbe Analyse der Detektor-Zeitreihen durchgeführt, um defekte Detektoren identifizieren zu können. Es werden hier nur die fehlerhaften Detektoren diskutiert; die restlichen Zeitreihen finden sich im Anhang.

Am Knoten SLU121 zeigen die Zeitreihen auf, dass die Detektoren D 1-0 und D 6-0 keine Daten liefern und somit als defekt zu bezeichnen sind. Folglich werden diese Geräte aus der Analyse ausgeschlossen. Alle anderen Zeitreihen wurden als positiv beurteilt und die Geräte werden folglich in der Analyse berücksichtigt.

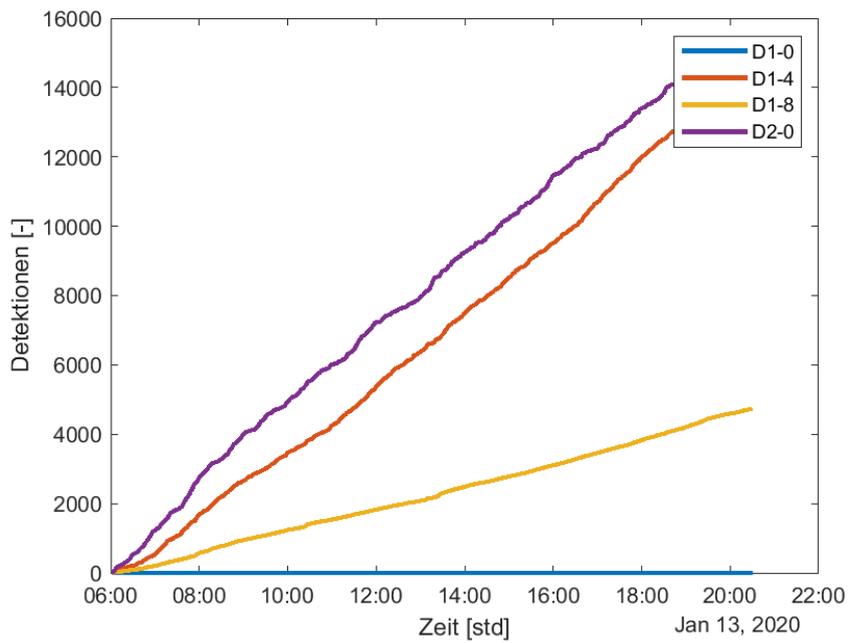


Abbildung 11: Kumulierte Detektorbelegungen am Knoten SLU121 für D 1-o, D 1-4, D 1-8, D 2-o.

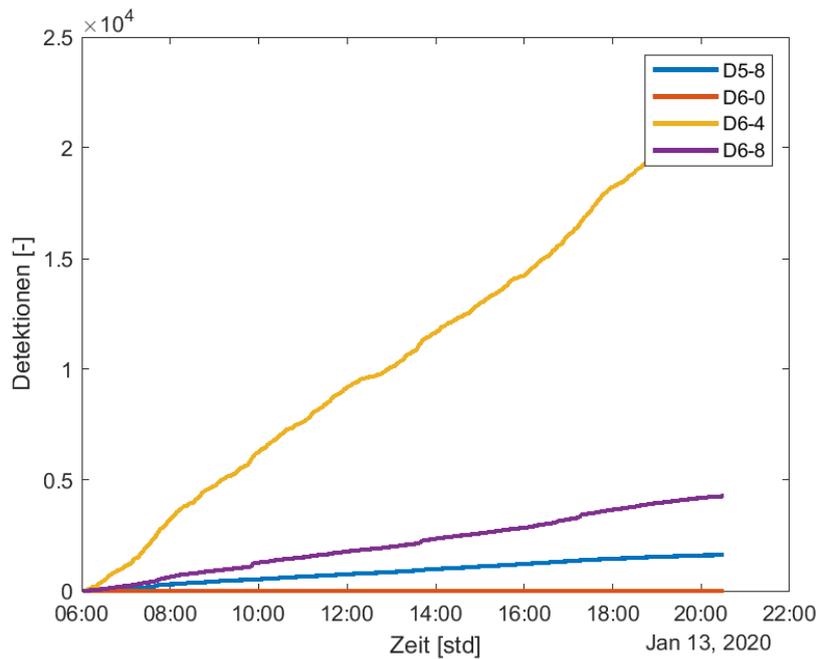


Abbildung 12: Kumulierte Detektorbelegungen am Knoten SLU121 für D 5-8, D 6-o, D 6-4, D 6-8.

Im nächsten Kapitel werden die Auswertemethodiken für die Verkehrsnachfrage und die Untersuchungsgrößen zur Evaluierung der LSA-Steuerungen vorgestellt.

5 Auswertemethodik

In diesem Kapitel wird die Methodik der einzelnen Auswertungen beschrieben. Um die Einheitlichkeit und Unterscheidbarkeit der einzelnen Analysen zu gewährleisten, werden die bestimmten Grössen hier vorab definiert. Es wird sich in der Folge auf die Bestimmung der Verkehrsnachfrage, der Reisezeiten, der Wartezeiten, Belegungszeiten eines Voranmeldedetektors, der Zeitlücken der Langschlaufendetektoren und der harten Grünabbrüche konzentriert. Eine Auflistung der Definitionen kann wie folgt gegeben werden:

- Reisezeit: definiert als die Zeit, die sich ein Fahrzeug des MIVs oder ÖVs im System befindet.
- Wartezeit: gibt die Zeitgrösse an, während der ein Fahrzeug oder Fussgängerin im System eine Verzögerung durch Rotzeit (oder bei Staubildung allenfalls zusätzliche Signalphasen) an einem Signalgeber erfährt.
- Belegungsgrad/-zeit eines Voranmeldedetektors: Die Belegungszeit gibt an, wie lange ein Fahrzeug einen Voranmeldedetektor belegt. Der Belegungsgrad ist somit der Anteil der Belegungszeit des spezifischen Detektors im Verhältnis zur gesamten Messzeit und stellt ein Mass für eine potenzielle Staubildung dar.
- Zeitlücke: Eine Zeitlücke definiert sich durch die verstrichene Zeit zwischen zwei Ereignissen (z. B. das Passieren von zwei Fahrzeugen) an einem spezifischen Punkt im Raum. Hier ist diese als die verstrichene Zeit zwischen dem Zeitpunkt der Sperrung eines Verkehrsstromes und der ersten Neubelegung des korrespondierenden Langschlaufendetektors vor der Haltelinie definiert.
- Harter Grünabbruch: Verkehrsströme sollten möglichst effizient durch Grünphasen bedient werden und nicht häufig durch ein Enden einer Grünphase geschnitten werden. Um eine Quantifizierung dessen zu ermöglichen, wird mit der Zeitspanne nach der Sperrung eines Verkehrsstromes (i. a. W. wenn das Signal auf Rot geschaltet wird) und der ersten Belegung der Langschlaufe ein harter Grünabbruch definiert. Ist diese Zeitspanne (zwischen Sperrung und erster Belegung der Langschlaufe) kleiner als 2 Sekunden, so ist ein harter Grünabbruch erfolgt. Ist die Zeitspanne jedoch grösser, können Fahrzeuge sich mit genügend zeitlichem Vorlauf an die Haltelinie annähern.

Des Weiteren werden die folgenden Abkürzungen für Variablen verwendet:

- *A*: Anmeldung eines Fahrzeuges oder Fussgängerin.
- *AB*: Abmeldung eines Fahrzeuges oder Fussgängerin.
- *G*: Signalphase Grün.
- *R*: Signalphase Rot.
- *BG*: Beginn einer Grünphase.
- *BR*: Beginn einer Rotphase.
- *i*: Index für einen Verkehrsstrom oder definiertes System.

- j : Index des Signalgebers.
- DT : Index eines Detektors.
- BL : Belegung einer Langschlaufe
- BLS : Erste Belegung einer Langschlaufe bei Einleitung einer Rotphase.
- k : Diskreter Zeitschritt der Bestimmung der Untersuchungsgrößen.
- T : Definierter Messezeitraum.
- N : Anzahl der Beobachtungen für einen definierten Messzeitraum.

5.1 Bestimmung der Verkehrsnachfrage

Um die zwei Zeiträume der Aufzeichnung miteinander vergleichen zu können, muss eine Verkehrsnachfrage in ähnlicher Größenordnung vorgefunden werden. Daher wird der Verkehrsfluss für die einzelnen Zubringer ermittelt, wo Zählschleifen vorhanden sind. Folglich werden anhand des Untersuchungszeitraumes Stundenwerte des Verkehrsflusses q_h bestimmt, wobei $h \in \mathcal{H}$ und \mathcal{H} die Menge aller Stunden des Zeitraumes definiert. Um q_h zu berechnen, werden die Belegungen $o_{DT}(k)$ der Zählschleifen aufsummiert. o_{DT} repräsentiert somit eine positive Flanke eines Detektorsignales und k stellt die fortlaufende Zeit in Sekunden da (gemäß der Datenaufösung).

$$q_h = \sum_{k=1}^h o_{DT}(k)$$

Dabei stellt eine positive Flanke des Detektorsignales (i. a. W. der Detektor ist belegt und das Signal wechselt von 0 auf 1) ein Fahrzeug dar. Dennoch kann es vorkommen, dass Detektoren für mehr als eine Sekunde belegt werden (Fahrzeuge mit einem sehr geringen Abstand, Lastkraftfahrzeuge). Dieser Fall ist nicht eindeutig differenzierbar und es wird somit angenommen, dass eine Flanke ein Fahrzeug repräsentiert.

Die bestimmten Stundenwerte q_h können folglich über die Zeit dargestellt und miteinander verglichen werden. Um ein quantitatives Mass zur Verfügung zu stellen, wird sich einer Linearen Regression zwischen den Datenpunkten des Verkehrsflusses ohne und mit Selbst-Steuerung bedient. Die Qualität des Zusammenhanges wird mit der Steigung $\beta_1 = 1$ getestet und mit dem Bestimmtheitsmass R^2 quantifiziert.

5.2 Bestimmung der Auswertegrößen für den FussgängerInnenverkehr

Die Auswertungen für den FV fokussiert sich auf die Wartezeit, die an den Querungen der beiden Knoten auftreten kann. Dabei werden die Daten der Taster, die eine Anmeldung des FVs im System erlauben, herangezogen. Die Variable $t_{A,DT}(k)$ stellt dabei den Zeitstempel der Anmeldung einer Fussgängerin bei einem Taster mit der Identifikationsnummer DT dar. k ist als diskreter Zeitschritt einer Wartezeitbestimmung definiert. Die Wartezeit kann folglich als Zeitdifferenz des Zeitstempels der Anmeldung und des Zeitstempels des Eintretens der nächsten Grünphase an der korrespondierenden Querung definiert werden. Mit der

Definition von $t_{BG,j}$ also dem Zeitstempel der nächsten Grünphase des Signales j , kann die Wartezeit $WZ_{FV,DT}(k)$ wie folgt bestimmt werden:

$$WZ_{FV,DT}(k) = t_{BG,j}(k) - t_{A,DT}(k). [s]$$

Mittels dieser Definition kann jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, ob der gesamte FV-Strom die Überquerung in der Grünphase durchführen kann. Es wird daher angenommen, dass in einer Grünphase die Verkehrsnachfrage bedient werden kann. Zudem werden für die Berechnung der Wartezeit nur die erste Detektion herangezogen, wo es sich um eine Anforderung für einen gesperrten Verkehrsstrom handelt. Alle anderen Detektionen stellen entweder eine potenzielle Anforderung während einer Grünphase dar oder eine wiederholte Anmeldung.

Um einen finalen Vergleich der Veränderung der Wartezeiten des FVs bestimmen zu können, werden die Grössen von $WZ_{FV,DT}(k)$ als Häufigkeitsverteilung pro Knoten dargestellt und eine durchschnittliche Wartezeit mittels

$$WZ_{FV} = \frac{\sum_k^T WZ_{FV,DT}(k)}{N}, [s]$$

bestimmt, wobei N die Anzahl der Beobachtungen im definierten Messzeitraum darstellt. Auch Querungen mit einer Schutzinsel werden mit dieser Methodik berechnet, da die Steuerungen sicherstellen, dass eine Überquerung beider Signale (Anmeldung zu Schutzinsel, und folglich Schutzinsel zum anderen Fahrbahnrand) möglich ist.

Eine Bestimmung der Belegungsgrade von Detektoren oder Zeitlücken ist mit den vorhandenen Daten nicht möglich und wird für den FV daher auch nicht weiterverfolgt.

5.3 Bestimmung der Auswertegrössen für den öffentlichen Verkehr

Für die Bestimmung der Reise- und Wartezeit des ÖVs, werden die gesonderten Bus-Detektoren im Untersuchungsgebiet verwendet. Für die Bestimmung der Reisezeit wird der jeweilig platzierte Detektor der Anmeldung vor der Lichtsignalanlage und jener nach der Lichtsignalanlage für die Abmeldung herangezogen. Daraus können folglich wiederum die korrespondierenden Zeitstempel abgeleitet werden, $t_{A,DT}$ und $t_{AB,DT}$. Für die Bestimmung der Reisezeit kann somit folgende Gleichung definiert werden:

$$RZ_{\text{ÖV},i}(k) = t_{AB,DT}(k) - t_{A,DT}(k), [s]$$

wobei $RZ_{\text{ÖV},i}$ die Reisezeit für den ÖV in Sekunden für einen Verkehrsstrom i darstellt. Es muss nicht zwingend eine An- und/oder Abmeldung eines ÖV-Fahrzeuges detektiert werden. Sind keine An- und Abmeldung vorhanden, kann das Fahrzeug auch nicht vom MIV unterschieden werden. Wird nur eine An- oder Abmeldung detektiert, resultiert dies in unrealistischen Reisezeiten, die anhand der statistischen Verteilung mit einem Grenzwert von 90 Sekunden eliminiert werden können. Um des Weiteren eine korrekte Zuordnung von An- und Abmeldungen vorzunehmen, werden die Zeitstempel sequenziell abgearbeitet. Es werden die zwei Vektoren $t_{A,DT}$ (die Einfahrtszeiten am Anmeldedetektor) und $t_{AB,DT}$ (die Ausfahrtszeiten am

Abmeldedetektor) für die Analyse berücksichtigt. Man selektiert das k -te Anmelde-Sample und überprüft, welche Ausfahrtszeiten grösser als dieses Sample sind. Das erste Resultat von $t_{AB,DT}$ stellt somit das zweite Glied (die Abmeldung) des Zeitpaares dar. Allerdings muss hier noch beachtet werden: Wenn zwei oder potentiell mehrere Busse im System vorhanden sind (mehrere Anmeldungen, aber noch keine Abmeldung), würden diese potenziell dieselbe Ausfahrzeit zugewiesen bekommen. Das wird gesondert überprüft, sodass die Paare richtig zugeordnet werden. Eine Elimination von fehlenden An- oder Abmeldungen wird folglich bei der Zuordnung von korrekten An- und Abmeldungen für die Berechnung der Reisezeit berücksichtigt. Zudem wird auch der Sonderfall am Beginn bzw. Ende der Messezeit berücksichtigt (ein ÖV-Fahrzeug meldet sich an, die Messung endet jedoch für diesen Tag und die Anmeldung würde fälschlicherweise mit jener des nächsten Messtages gepaart werden).

Um die Wartezeit bestimmen zu können und auch eine Aggregation der bestimmten Grössen zu ermöglichen, muss von $RZ_{\text{öV},i}$ die minimale Reisezeit des Verkehrsstromes i subtrahiert werden. Der Grund liegt in der unterschiedlichen Platzierung der Detektoren im Feld, i. a. W. die Distanzen zwischen An- und Abmeldedetektoren sind nicht konstant und eine Aggregation bzw. Vergleich der Reisezeiten ist folglich nicht zulässig. Um die minimale Reisezeit zu bestimmen, wurde die Geschwindigkeit des freien Flusses im Untersuchungsgebiet von der Reisezeitverteilung mit den 5%-Quantil pro definierten System abgeleitet. Basierend auf den Distanzen der An- und Abmeldedetektoren (pro Verkehrsstrom), kann die minimale Reisezeit $RZ_{\text{öV},min,i}$ bestimmt werden. Um die Annahme zu überprüfen, werden die ermittelten Werte mit der errechneten Verteilung der Reisezeit abgeglichen. Final kann also die minimale Reisezeit von der ermittelten Reisezeit $RZ_{\text{öV},i}(k)$ subtrahiert werden und somit die Wartezeit bestimmt werden:

$$WZ_{\text{öV},i} = RZ_{\text{öV},i}(k) - RZ_{\text{öV},min,i} \cdot [s]$$

Final werden die aggregierten Reise- und Wartezeiten für SLU120 und SLU121 mit den folgenden Gleichungen bestimmt:

$$RZ_{\text{öV}} = \frac{\sum_i^T RZ_{\text{öV},i}(k)}{N}, [s]$$

$$WZ_{\text{öV}} = \frac{\sum_i^T WZ_{\text{öV},i}(k)}{N}. [s]$$

Da der ÖV nur an den An- und Abmeldedetektoren identifiziert werden kann, wird hier auf eine Bestimmung des Belegungsgrades und Zeitlücken verzichtet. Wichtig ist abschliessend zu unterstreichen, dass die Reisezeiten nur ein Zwischenergebnis für die Ermittlung der Wartezeiten darstellen und nicht zur Aggregation bzw. zur finalen Evaluierung der Systeme herangezogen werden.

5.4 Bestimmung der Auswertegrössen für den motorisierten Individualverkehr

Zur Auswertung der Wartezeit des MIVs wird eine Verschneidung der Detektor- und Signaldaten vorgenommen. Dabei wird hier vorerst die Reise- und Wartezeit mit einem Einfluss-Ausfluss-System bestimmt. Um abzuleiten, ob sich Fahrzeuge vor der Signalanlage befinden, wird der Bereich vor der Lichtsignalanlage als ein System mit Einfluss und Ausfluss betrachtet. Eine Annahme über die Anzahl der Fahrzeuge, die in das System einfliessen, wird mit den Schleifen zur Voranmeldung getroffen. Subtrahiert man

die Anzahl der detektierten Fahrzeuge an der Schrägschleife von jener der Voranmeldungsschleife, kann folgendes System definiert werden:

$$N_I = n_v - n_q [Fzg],$$

wobei N_I die Anzahl der Fahrzeuge im betrachteten System I , n_q die Anzahl der Fahrzeuge, welche an der Querschleife detektiert worden sind (der Ausfluss) und n_v die Anzahl der Fahrzeuge an der Voranmeldungsschleife (der Einfluss) darstellen. Da die Detektoren nur bedingt eine Aussage über die Anzahl der Fahrzeuge ableiten lassen, muss ein exogenes Feedback für das definierte System vorhanden sein. Bewegt sich beispielsweise ein LKW über die Schleife zur Voranmeldung, bleibt der Detektor potenziell für ein paar Sekunden belegt. Zugleich könnte es sich hier aber auch um zwei Fahrzeuge mit geringem Fahrzeugabstand handeln. Folglich wird die Grösse N_I einen Zählfehler aufweisen, der sich über die Zeit kumuliert.

Um diesem Verhalten entgegenzuwirken, wurde das Feedback als $N_I = 0$, also als leeres System definiert. Um ableiten zu können, wann ein System tatsächlich leer ist, wurden die Videodaten analysiert und aus diesen ein sinnvoller Zeitgrenzwert bestimmt, in dem die beiden Detektoren nicht belegt sind. Tritt dieser Zustand ein, kann davon ausgegangen werden, dass das System leer ist und die Anzahl der Fahrzeuge N_I wird rückgesetzt. Die Implementierung wurde stichprobenartig mit den Videodaten abgeglichen und dieser Ansatz erwies sich als sinnvoll mit hinreichender Genauigkeit.

Die Grösse N_I kann nun verwendet werden, um die Wartezeit zu bestimmen. Dafür wird wiederum die Reisezeit bestimmt, welche aus dem Zeitstempel der Einfahrt in das System und dem korrespondierenden Zeitstempel der Ausfahrt bestimmt werden kann. Daher definiert sich die Reisezeit mit

$$RZ_{MIV,i}(k) = t_{AB,i}(k) - t_{A,i}(k) [s].$$

Möchte man von der errechneten Reisezeit wiederum die Wartezeit ableiten, muss die minimale Reisezeit für den jeweiligen Verkehrsstrom subtrahiert werden. Dafür wurde die Geschwindigkeit des freien Verkehrsflusses aus der Reisezeitverteilung mit der Bestimmung des 5%-Quantils bestimmt und somit die minimalen Reisezeiten $RZ_{MIV,min,i}$ errechnet. Die Wartezeit kann somit wie folgt errechnet werden:

$$WZ_{MIV,i} = RZ_{\bar{v},i}(k) - RZ_{MIV,min,i} \cdot [s]$$

Um eine Aussage über die Schlangenleerung treffen zu können, wird zusätzlich die Zeitdifferenz zwischen der Einleitung der Rotphase und der nächsten Belegung der Langschleife an der Haltelinie analysiert. Ist diese Zeitlücke «gross», ist auf eine saubere Schlangenleerung zu schliessen und eine Aussage über die Qualität ableitbar. Diese Zeitlücke kann wie folgt definiert werden:

$$ZL_{MIV,i}(k) = t_{BLS,i}(k) - t_{BR,S_i}(k) [s],$$

wobei $ZL_{MIV,i}(k)$ die Schlangenentleerung im System i , $t_{BLS,i}(k)$ den Zeitstempel der ersten Belegung der Langschleife (Belegungszeit grösser als eine Sekunde) und $t_{BR,S_i}(k)$ den Zeitstempel des Beginns der Rotphase repräsentiert. Es sei hier angemerkt, dass bewusst die Langschleife und nicht die Querschleife für die Bestimmung der Zeit der ersten Detektion verwendet wird. Es kann nämlich vorkommen, dass Fahrzeuge nicht ganz zur Haltelinie auffahren und somit von der Querschleife nicht erfasst werden.

Staubildungen im Knotenbereich sollten auch in Spitzenzeiten von der LSA-Steuerungen minimiert werden. Die Länge der Schlange nach einer Haltelinie kann daher eine Aussage über die Effizienz der eingesetzten Steuerung geben. Um Staubildungen beschreiben zu können, werden zusätzlich noch die Belegungszeiten $t_{BL,DT}$ der Voranmeldungsschlaufen analysiert. Dabei werden die längsten Belegungsdauern auf einen vordefinierten Zeitraum von einer Stunde aufsummiert. Die Verteilung dieser Grösse gibt in Folge Aufschluss über die Häufigkeit der vorkommenden Belegungsdauern und damit, mit welcher Qualität die Verkehrsströme von einer LSA-Steuerung bedient werden können. Diese Analyse wird an der Voranmeldeschleife durchgeführt. Damit nicht simpel alle Detektion für die Kumulation verwendet werden, werden Detektionen, die länger als 3 Sekunde präsent sind berücksichtigt. Dieser Grenzwert wurde als sinnvoll erachtet, da bei dieser Zeitspanne bereits von stockendem Verkehr ausgegangen werden kann.

Final werden die harten Grünabbrüche als Metrik herangezogen. Dabei muss zwischen herkömmlichen Grünabbrüchen und harten Grünabbrüchen unterschieden werden. Letztere werden mittels einer Zeitlücke, welche kleiner als ein Grenzwert von zwei Sekunden ist, angenähert. Somit wird mindestens ein Fahrzeug bzw. ein Pulk hart gestoppt.

Final werden auch hier wiederum aggregierte Grössen bestimmt, die wie folgt definiert werden können:

$$RZ_{MIV} = \frac{\sum_i^T RZ_{MIV,i}(k)}{N}, [s]$$

$$WZ_{MIV} = \frac{\sum_i^T WZ_{MIV,i}(k)}{N}, [s]$$

$$ZL_{MIV} = \frac{\sum_i^T ZL_{MIV,i}(k)}{N}, [s]$$

$$BG_{MIV} = \frac{\sum_i^T t_{BL,DT}(k)}{N}, [s]$$

wobei BG_{MIV} hier den Belegungsgrad repräsentiert.

5.5 Bestimmung der Auswertegrössen für den Veloverkehr

Für die Bestimmung der Auswertegrössen des VVs ist keine Datengrundlage vorhanden, da Velos nicht separat detektiert werden (spezifische Detektoren für Velos). Zudem sind nur in zwei Fällen explizite Lichtsignalanlagen für Velos installiert. Da aber trotzdem eine Ankunft (Detektion) von VV nicht von MIV zu unterscheiden ist, kann in diesem Fall nur eine Zusammenfassung von VV und MIV vorgeschlagen werden. In anderen Worten, die ermittelte Wartezeit des MIV gilt auch für den VV.

6 Ergebnisse der Verkehrsnachfrage

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, wurden für die Evaluierung der Verkehrsnachfrage, um die Vergleichbarkeit der Datensätze zu überprüfen, die Stundenwerte des Verkehrsflusses q_h bestimmt. Die Ergebnisse sind für die Knoten SLU120 und SLU121 in den folgenden Unterkapiteln angeführt.

6.1 Knoten SLU120

Am Knoten SLU120 sind 5 Zählerschleifen verbaut. Wie sich im Plan des Knotens allerdings zeigt, sind vor allem die Zählerschleifen Z4 und Z5 für den MIV maßgebend. Z1 und Z2 stellen die Verkehrsnachfrage von Z5 dar, mit dem Unterschied, dass sich der Verkehr hier auf den Strom in die Tribschenstrasse und die Kellerstrasse aufteilt. Die Zählerschleife Z3 stellt den Verkehrsfluss für den ÖV dar (es ist eine Busspur an der Verortung des Detektors vorhanden). Folglich werden die Detektoren Z3, Z4 und Z5 für die Analyse herangezogen. Man beachte, dass gemäß der Dokumentation, Detektoren in den Datensätzen andere Identifikationsnummern zugewiesen worden sind. Daher werden diese hier auch so angeführt. Folglich ist Z3 mit D24, Z4 mit D25 und Z5 mit D50 gelistet, wobei die Abkürzung D für Detektor steht.

In Abbildung 13 sind die Stundenwerte q_h über den gesamten Betrachtungszeitraum für SLU120 dargestellt. Man beachte, dass die Selbst-Steuerung ab dem 19.01.2020, 22:07 aktiv ist. Vergleicht man nun die Tagesganglinien der zwei Wochen, zeigt sich für alle drei Detektoren D24, D25 und D50 ein ähnlicher Verlauf, der auf eine ähnliche Verkehrsnachfrage schliessen lässt.

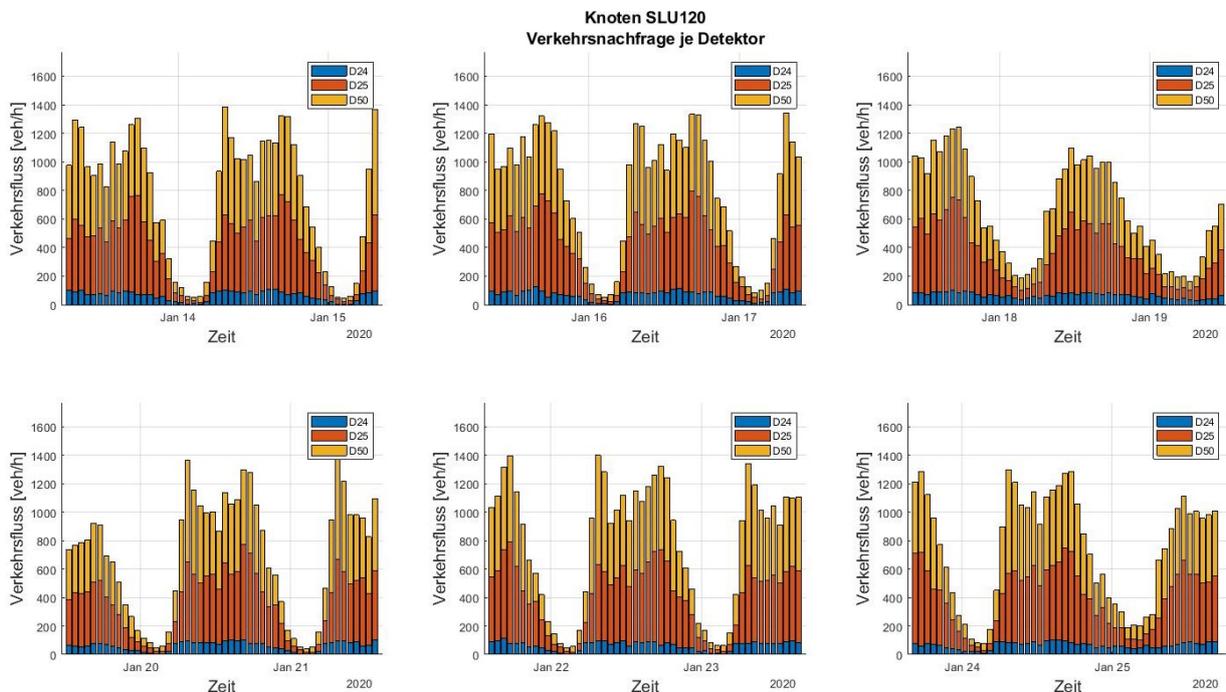


Abbildung 13: Stundenwerte des Verkehrsflusses [veh/h] über den gesamten Betrachtungszeitraum am SLU120. Die Selbst-Steuerung ist ab dem 19.01.2020, 22:07 aktiv.

Es zeigt sich hier auch die hohe Buslast am Knoten SLU120, welche im Mittel über den Untersuchungszeitraum hinweg mit 63 Bussen pro Stunde beziffert werden kann. In Spitzenzeiten kann die Anzahl an Bussen pro Stunde sogar bei 123 Fahrzeugen liegen. Diese Last wird einerseits durch die geführten Linien, aber eben auch durch das genannte Busdepot in der Umgebung hervorgerufen.

Um ein quantitatives Mass für die zwei Vergleichsgrößen angeben zu können, wird die Zeitreihe beim Wechsel der LSA-Steuerung getrennt und die jeweiligen Stundenwerte in Relation zueinander gesetzt. Ein lineares Modell mit der zugehörigen Steigung $\beta_1 = 1$ wird modelliert und das Bestimmtheitsmass R^2 wird bestimmt. Das lineare Modell gibt einen Zusammenhang zwischen den zwei Messwochen vor und kann mit dem Bestimmtheitsmass quantifiziert werden. Die Analyse ist in Abbildung 14 für die drei Zählschlaufen getrennt angeführt.

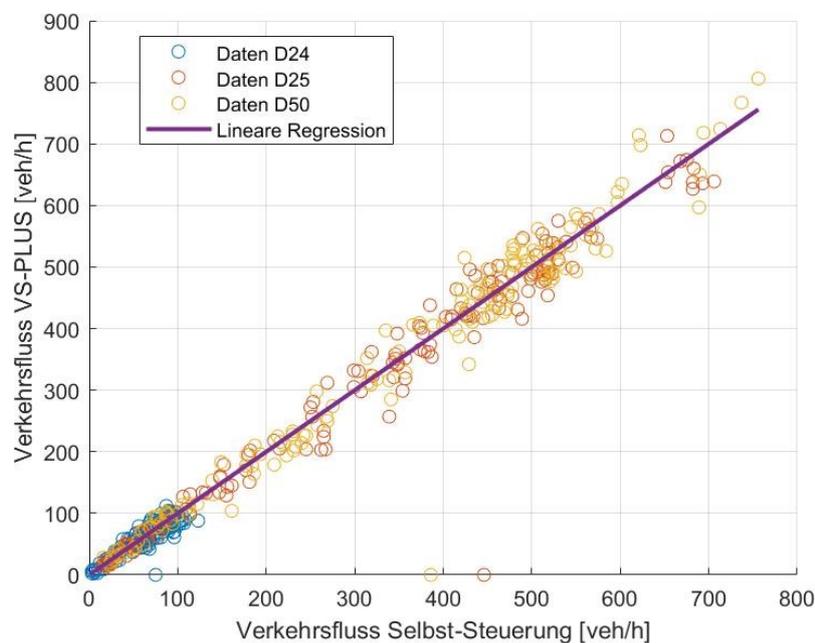


Abbildung 14: Gegenüberstellung der Verkehrsflüsse in [veh/h] der Zählschlaufen am SLU120. Die Datenpunkte in blau, orange und gelb geben den Zusammenhang mit der korrespondierenden Regressionsgerade für D24, D25 und D50 an. Das Bestimmtheitsmass kann jeweils mit 0.99, 0.95 und 0.96 angegeben werden. Die Regressionskoeffizienten β_1 sind jeweils mit 1.00 abgebildet.

Die Gegenüberstellung der Stundenwerte der Verkehrsflüsse aus beiden Testwochen zeigt auf, dass ein linearer Zusammenhang gegeben ist. In Abbildung 14 bildet sich mit den blauen Datenpunkten der lineare Trend mit einer leicht steigenden Varianz mit steigender Magnitude des Verkehrsflusses ab. Dieser Effekt kann durch die Eigenschaften des Poisson-Prozesses erklärt werden kann (Varianz eines Prozesses ist proportional zur Intensität - i. a. W. steigt der Verkehrsfluss erhöht sich auch dessen Varianz, da sich die Ankunft von Fahrzeugen einem Poisson-Prozess annähert). Das Bestimmtheitsmass kann mit 0.99 angegeben werden. Die orangen und gelben Datenpunkte (D38 und D39) zeigen dieselben Charakteristiken mit einer im Mittel konstanten Varianz. Die Bestimmtheitsmasse wurden mit 0.95 und 0.96 bestimmt.

Es kann daher von einer ähnlichen Verkehrsnachfrage für die beiden Testzeiträume ausgegangen werden, was die Grundlage für die Vergleichbarkeit aller folgenden Analysen darstellt.

6.2 Knoten SLU121

Am Knoten SLU121 sind 3 Zählerschleifen für die Bestimmung der Verkehrsnachfrage an der Hauptachse vorhanden. Die Zählerschleife Zo1 stellt die Grundlage für die Bestimmung der Nachfrage der Verkehrsströme vom Westen kommend dar. Hier muss wiederum erwähnt werden, dass Zo1 sowohl den Verkehrsfluss für den Verkehrsstrom geradeaus und rechtsabbiegend und den der Linksabbieger bestimmt. Des Weiteren werden Zo2 und Zo3 herangezogen, wobei Zo3 den Verkehrsstrom der Rechtsabbieger und des ÖVs bestimmt.

In Abbildung 15 sind wiederum die Stundenwerte q_h über den gesamten Betrachtungszeitraum für SLU121 dargestellt. Die Selbst-Steuerung ist ab dem 19.01.2020, 22:07 aktiv ist. Vergleicht man nun die Tagesganglinien der zwei Wochen, zeigt sich für alle drei Zählschlaufen eine ähnliche Ganglinie. Man beachte, dass die Identifikationsnummern für Zo1, Zo2 und Zo3 mit D37, D38 und D39 angegeben werden.

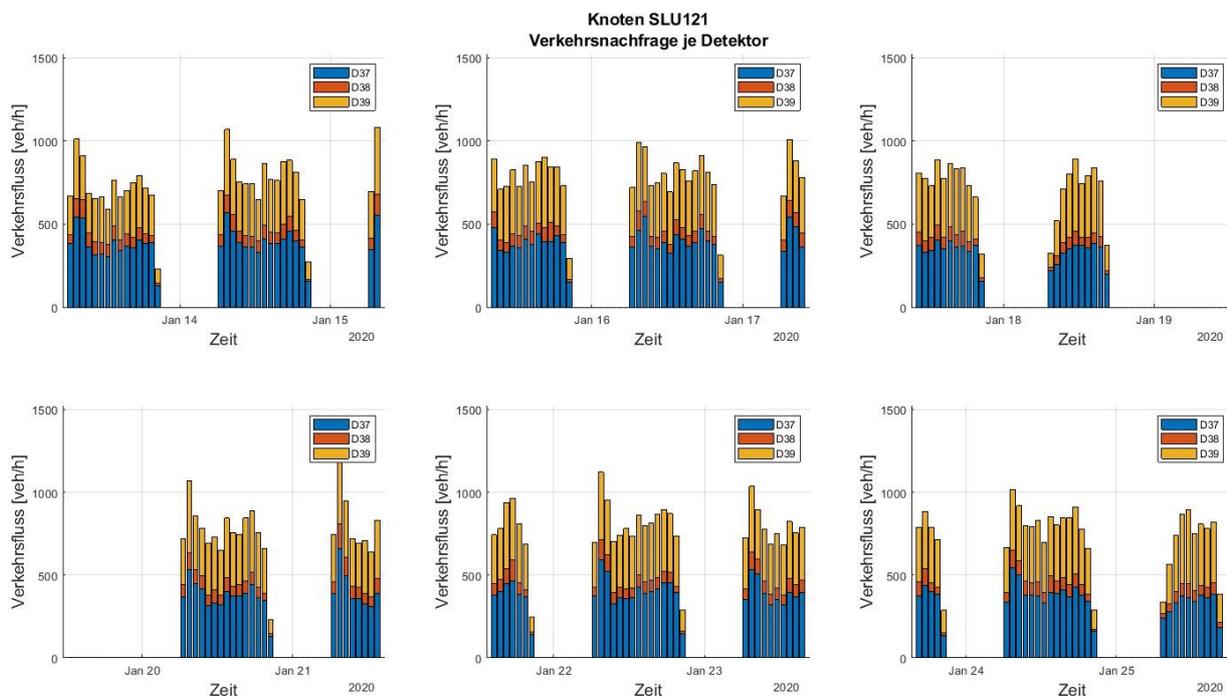


Abbildung 15: Stundenwerte des Verkehrsflusses [veh/h] über den gesamten Betrachtungszeitraum am SLU121. Die Selbst-Steuerung ist ab dem 19.01.2020, 22:07 aktiv.

Wie bereits in Kapitel 4 diskutiert, zeigen sich in der Zeitreihe Lücken, welche auf die fehlenden Messdaten zurückzuführen sind. Der Grund sind die Betriebszeiten der LSA von Mo-Fr (06-20:30), Sa (07:30-16:30) und So (Blinkbetrieb). Dennoch sind die Lücken in beiden Testwochen zu gleichen Anteilen und an denselben Zeitpunkten vorhanden, was somit die Vergleichbarkeit der Grössen nicht beeinflusst. Man beachte zudem, dass die Datenpunkte der letzten Stundenwerte pro Tag (16:00 bis 17:00) eine kleinere Nachfrage aufweisen.

Der Grund dafür ist, dass die Messdaten nur bis 16:30 vorhanden sind – es handelt sich somit um die Verkehrsnachfrage von 0,5 Stunden.

Um die Vergleichbarkeit der Testwochen nachzuweisen werden die Verkehrsflüsse der beiden Testwochen wiederum gegenübergestellt (für die Zählstationen D37, D38 und D39).

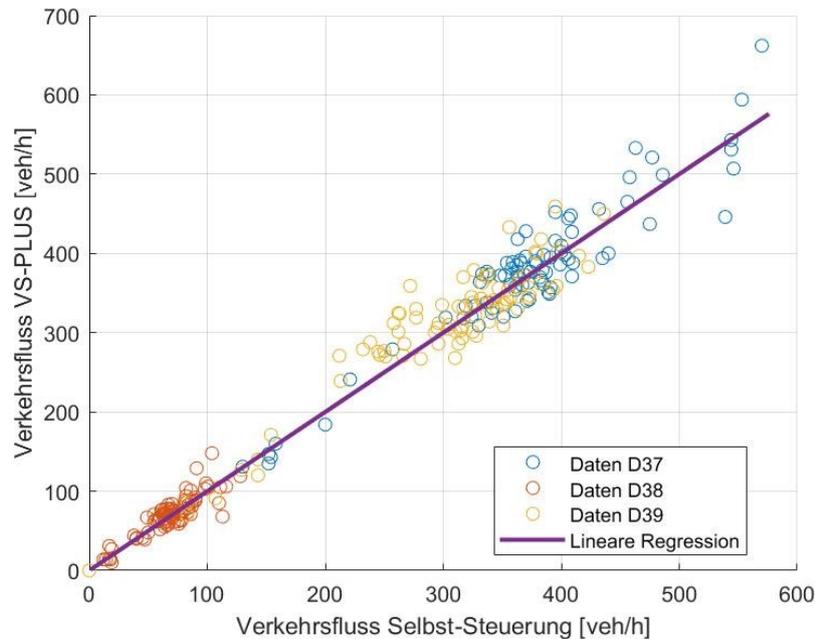


Abbildung 16: Gegenüberstellung der Verkehrsflüsse in [veh/h] der Zählstationen am SLU121. Die blauen, orangen und gelben Datenpunkte geben den Zusammenhang mit der korrespondierenden Regressionsgerade für D37, D38 und D39 an. Das Bestimmtheitsmass kann jeweils mit 0,99 angegeben werden. Die Regressionskoeffizienten β_1 sind mit 1,00 definiert.

Abbildung 16 zeigen sich die Zusammenhänge der bestimmten Stundenwerte für die zwei Testwochen und D37, D38 und D39. Es kann nachgewiesen werden, dass der Trend der blauen Datenpunkte (D37) dem linearen Zusammenhang mit einer gering höheren Varianz bei hohen Verkehrsflüssen ($q_h > 500$) folgt. Zudem zeigt sich ein Cluster der Datenpunkte bei $300 < q_h < 400$. Bei den Daten von D38 (orange Datenpunkte) ist eine höhere Varianz bei hohen Verkehrsflüssen zu beobachten, jedoch ist auch hier der Zusammenhang vorhanden. D39 zeigt wenige Datenpunkte bei geringen Verkehrsflüssen und eine konstante Varianz. Die Bestimmtheitsmasse können mit jeweils 0,99 bestimmt werden. Die Varianzeigenschaften können wiederum mit dem Poisson-Prozess erklärt werden.

Folglich kann auch hier die Vergleichbarkeit der Verkehrsnachfrage für die zwei Testwochen nachgewiesen werden, was die Grundlage für die weiteren Analysen darstellt.

7 Ergebnisse der Auswertegrößen für den FussgängerInnenverkehr

In diesem Kapitel werden die Wartezeiten für den FV am Knoten SLU120 und SLU121 bestimmt. Dabei wird die vorgestellte Methodik zur Berechnung von $WZ_{FV,DT}$ angewendet. Im Folgenden werden die Ergebnisse der beiden LSA-Steuerungen vorgestellt und verglichen. Um ein klares Bild von der Performance der Steuerungen zu erhalten, werden die Ergebnisse für den gesamten Zeitraum, für einzelne Wochentage (Montag bis Samstag) als auch für eine Morgenspitze, Mittagsverkehr und Abendspitze (7:00 Uhr – 9:30 Uhr, 11:00 Uhr – 13:00 Uhr und 16:00 Uhr – 18:30 Uhr, respektive) präsentiert. Zudem werden für diese Spitzenzeiten als auch für den gesamten Messzeitraum aggregiert die einzelnen Verkehrsströme getrennt analysiert.

7.1 Knoten SLU120

Es sind drei Querungsstellen für den FV am SLU120 vorgesehen. Somit sind 8 Taster als Detektoren für den FV verbaut. Wie bereits in Kapitel 4 erwähnt, sind die Taster FD27-1 und FD27-2 nicht aktiv und bekommen ein sogenanntes «Gratis-Grün» geschaltet. Eine Analyse dieses Umstandes mit dem Datensatz bestätigt diese Schaltung. Es werden folglich die Taster FD12 und FD13 für die Querung an der Kellerstrasse mit den Signaldaten der Signalgeber 12 und 13 verschnitten. FD12 und FD13 korrespondieren dabei mit den Identifikationsnummern D31 und D32 im Datensatz. Für die Querung der Tribschenstrasse wird FD7 – FD10 und Signalgeber 7 – Signalgeber 10 verwendet. Dabei wird der beschriebene Umstand, dass die Querung in einer Grünphase, ohne auf der Schutzinsel eine weitere Grünphase anfordern zu müssen, berücksichtigt. Die verwendeten Taster korrespondieren in den Daten mit D26, D27 und D28.

Für die Bestimmung der Wartezeiten wurde die in Kapitel 5.2 vorgestellte Methodik angewendet. Es werden zuerst die einzelnen Wochentage vorgestellt. Dabei wird sich hier auf die Wochentage Montag, Dienstag und Samstag beschränkt. Die Abbildungen der restlichen Wochentage finden sich im Anhang. Zudem sind die durchschnittlichen Wartezeiten in Tabelle 5 zusammengefasst. Abbildung 17 zeigt den Vergleich der ermittelten Wartezeiten für den FV montags.

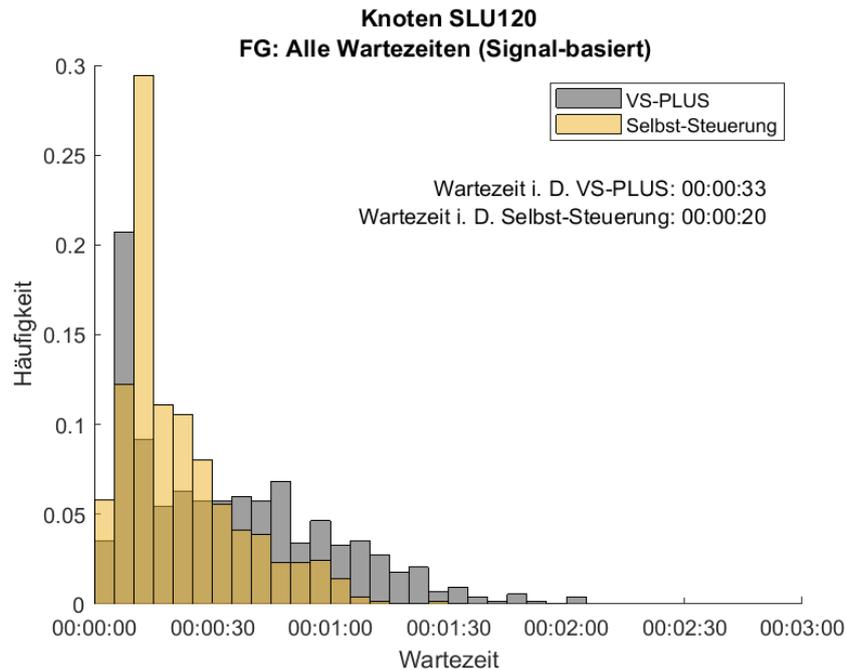


Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Montag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Es zeigt sich, dass durch die Selbst-Steuerung die durchschnittliche Wartezeit für den FV signifikant verringert werden kann. Die Häufigkeitsverteilung verschiebt sich dabei erheblich nach links, was in geringeren Wartezeiten resultiert. Im Falle einer Anwendung der Selbst-Steuerung treten Wartezeiten grösser als 1 Minute selten auf. Konträr dazu zeigt die Verteilung für die Steuerung VS-PLUS durchaus häufiger Wartezeiten mit 1 Minute und grösser auf. Die durchschnittliche Wartezeit verringert sich von 33 Sekunden (VS-PLUS) auf 20 Sekunden (Selbst-Steuerung). Betrachtet man die Gegenüberstellung für den Dienstag und Samstag, ergeben sich die Ergebnisse, welche in Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt sind. Auch an diesen Tagen zeigt sich eine ähnliche Verschiebung der Verteilung hinzu geringeren Wartezeiten, was auch die Durchschnittswerte aufzeigen. Zudem schafft es die Selbst-Steuerung auch dienstags und samstags, die Wartezeiten für den FV am SLU120 – bis auf eine geringe Anzahl an Fällen – unter 1 Minute zu halten. Die Durchschnittswerte für die Wartezeit ergeben sich mit 35 Sekunden (VS-PLUS) und 22 Sekunden (Selbst-Steuerung) für den Dienstag und mit 28 Sekunden (VS-PLUS) und 19 Sekunden (Selbst-Steuerung) für den Samstag. Die Ergebnisse für die Tage Mittwoch, Donnerstag und Freitag finden sich im Anhang und sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

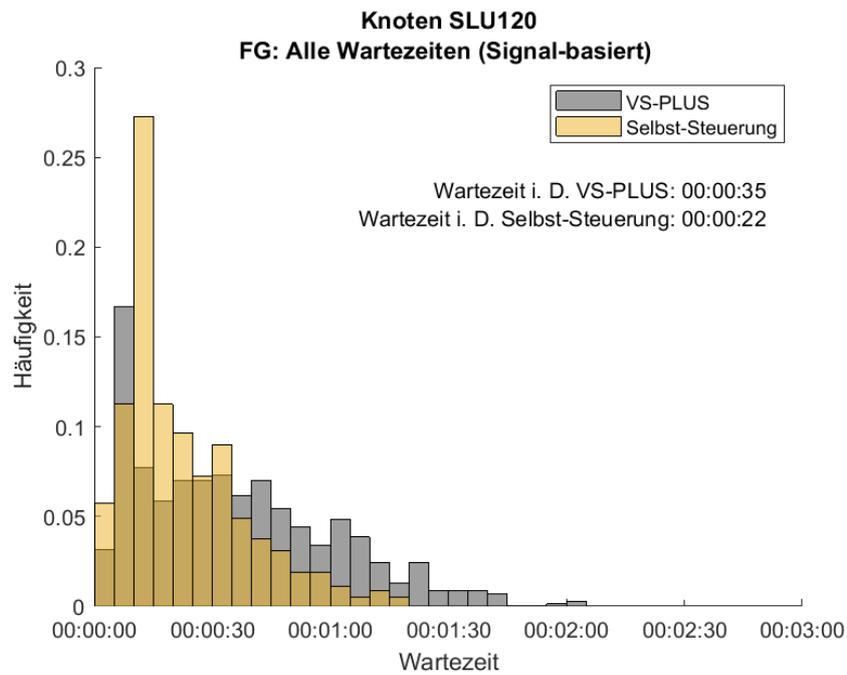


Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Dienstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

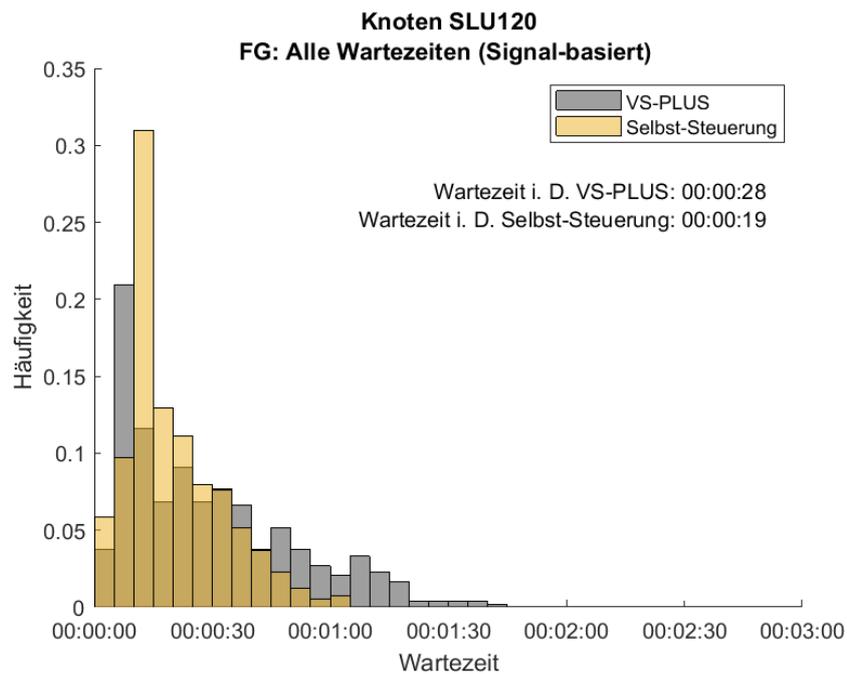


Abbildung 19: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Samstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Um einen fundierten Einblick in die Arbeitsweise der Steuerung bei vorherrschenden Verkehrsspitzen zu bekommen, wird folglich eine Morgenspitze (7:30 Uhr – 9:30 Uhr), der Mittagsverkehr (11:00 Uhr – 13:00 Uhr) und eine Abendspitze (16:00 Uhr bis 18:30 Uhr) analysiert (Abbildung 20 bis Abbildung 22

).

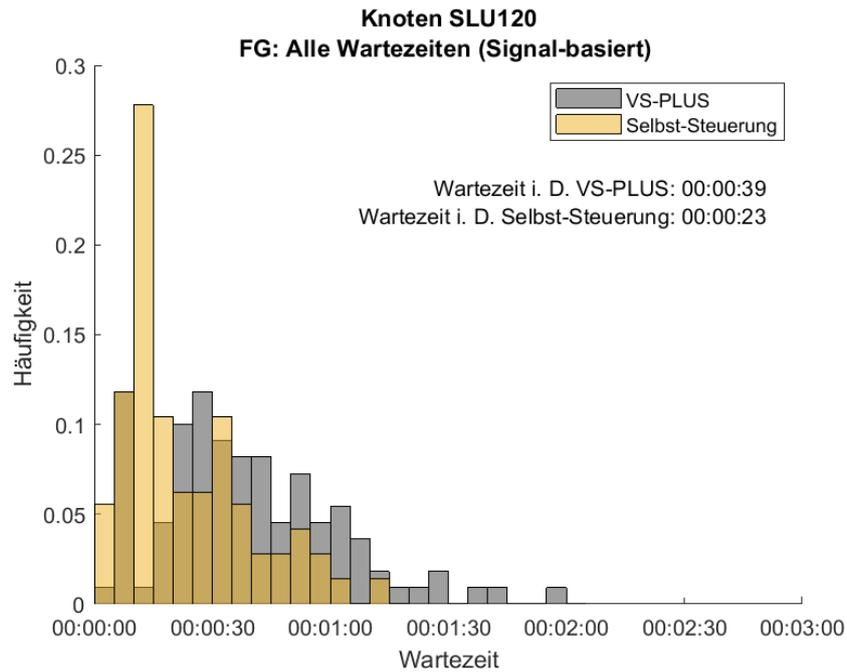


Abbildung 20: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV der Morgenspitze am Dienstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

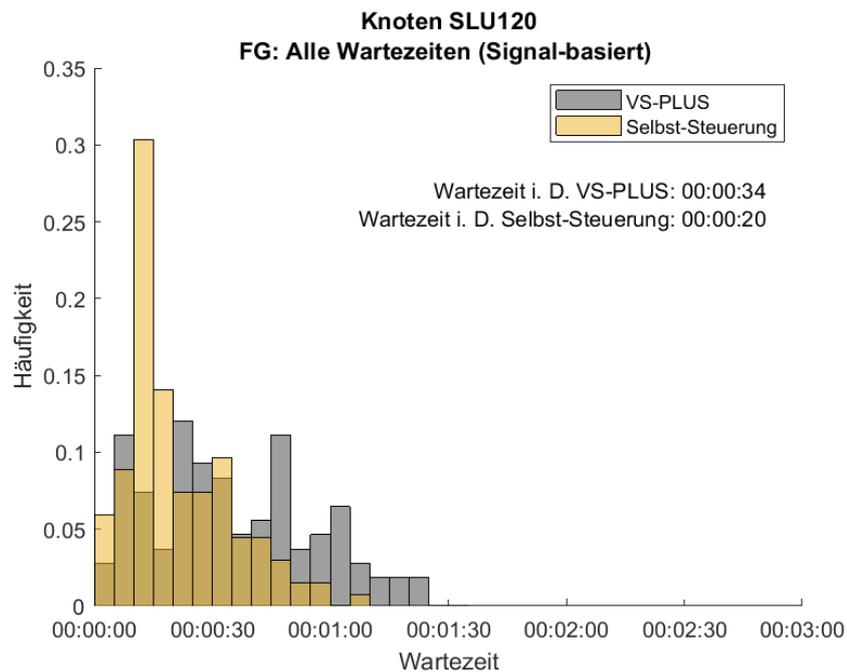


Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV im Mittagsverkehr am Dienstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

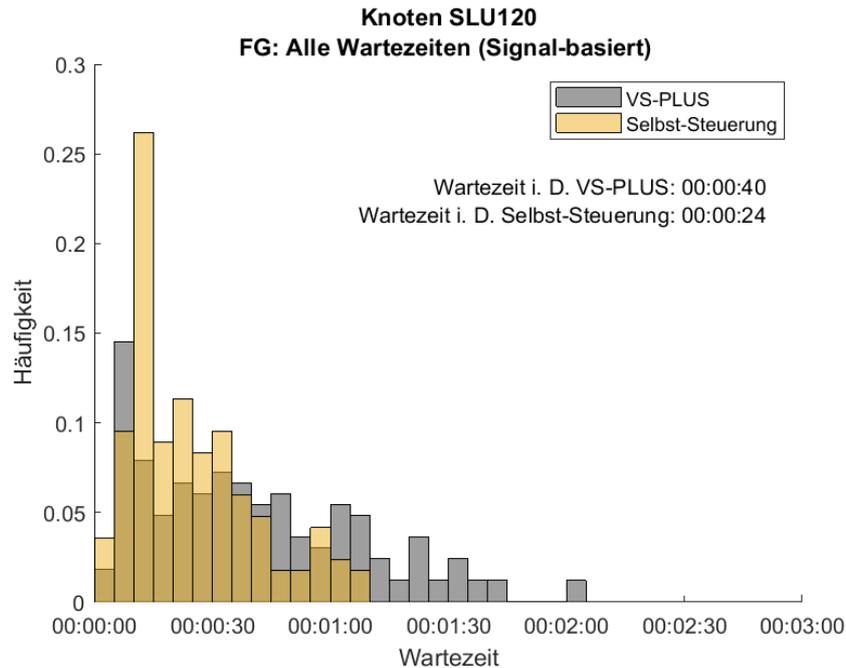


Abbildung 22: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV der Abendspitze am Dienstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Analysiert man die Verteilungen der Spitzen, zeigt sich auch hier eine erhebliche Verbesserung der Wartezeiten für den FV durch die Selbst-Steuerung. Der rechte Rand der Verteilungen mit Wartezeiten grösser als 1 Minute und 20 Sekunden kann vollständig eliminiert werden. Zudem zeigt sich generell, dass die Selbst-Steuerung es schafft, Wartezeiten im Bereich von 15 Sekunden mit einer hohen Häufigkeit herbeizuführen. Die durchschnittlichen Wartezeiten der Morgenspitze, Mittagsverkehr und Abendspitze verringern sich mit dem Einsatz von VS-PLUS und der Selbst-Steuerung jeweils wie folgt: Morgenspitze von 39 Sekunden auf 23 Sekunden; Mittagsverkehr von 34 Sekunden auf 20 Sekunden; Abendspitze von 40 Sekunden auf 24 Sekunden. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Tabelle 5 nochmals zusammengestellt.

Abbildung 23 zeigt die aggregierten Ergebnisse als Häufigkeitsverteilung für den gesamten Messzeitraum (eine Woche pro Steuerungsverfahren). Es kann gezeigt werden, dass die Selbst-Steuerung die Wartezeit des FVs erheblich verringert. Der rechte Teil der Verteilung, welcher hohe Wartezeiten im Bereich von 1 bis 2 Minuten darstellt, wird mit der Steuerung eliminiert und es sind weitaus mehr Wartezeiten im Bereich von 15 bis 30 Sekunden wahrscheinlich. Des Weiteren zeigt die Verteilung der Selbst-Steuerung eine hohe Häufigkeit bei einer Wartezeit von 15 Sekunden, was einer akzeptablen Zeitperiode für den FV entspricht. Die durchschnittliche Wartezeit kann für VS-PLUS mit 31 Sekunden bestimmt werden. Für die Selbst-Steuerung ergibt sich hier ein Wert von 22 Sekunden, was einer durchschnittlichen Verbesserung von 9 Sekunden bzw. 29.03% entspricht.

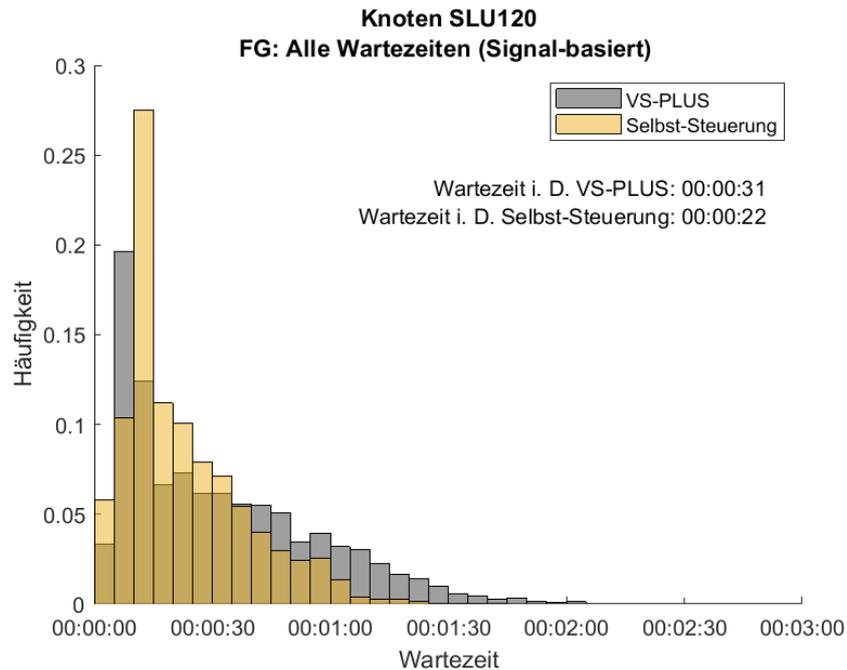


Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Die in Tabelle 5 zusammengestellten Ergebnisse zeigen die durchschnittlichen Wartezeiten für den FV im Vergleich. Es zeigt sich, dass die Selbst-Steuerung an den Wochentagen Montag – Samstag die Wartezeit signifikant reduzieren kann. Die Reduktionen bewegen sich in einem Bereich von 25.00% bis zu 39.39%. Für die Analyse der Verkehrsspitzen ergibt sich ebenfalls eine erhebliche Verbesserung. Die Resultate sind ähnlich mit einer Reduktion von 41.03%, 41.18% und 40.00%. Es kann daher gesagt werden, dass die Selbst-Steuerung auch in den Spitzenzeiten für den FV an diesem Knoten weitaus geringere Wartezeiten hervorruft. Betrachtet man die Wartezeiten aggregiert, ergibt sich final eine Reduktion von 31 Sekunden auf 22 Sekunden, was -29.03% ergibt. Auffällig ist bei diesem Ergebnis, dass die durchschnittliche Wartezeit über den gesamten Messzeitraum mit der Steuerung VS-PLUS von 31 Sekunden deutlich unter den Ergebnissen der einzelnen Tage liegt. Dieser Effekt kann dadurch erklärt werden, dass der gesamte Messzeitraum auch die Abendstunden berücksichtigt, wo die Wartezeiten an diesem Knoten deutlich tiefer liegen.

Tabelle 5: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für den FV am Knoten SLU120 der betrachteten Zeiträume.

Zeitraum	Wartezeit i. D. – VS-PLUS [s]	Wartezeit i. D. – Selbst-Steuerung [s]	Unterschied absolut [s]	Unterschied relativ [%]
Montag	33	20	-13	-39.39%
Dienstag	35	22	-13	-37.14%
Mittwoch	33	23	-10	-30.30%
Donnerstag	34	22	-12	-35.29%
Freitag	32	24	-8	-25.00%
Samstag	28	19	-9	-32.14%
Dienstag – Morgenspitze	39	23	-16	-41.03%
Dienstag – Mittagsverkehr	34	20	-14	-41.18%
Dienstag - Abendspitze	40	24	-16	-40.00%
Montag – Freitag	32	21	-11	-34.38%
Gesamt	31	22	-9	-29.03%

Betrachtet man in den vorgestellten Ergebnissen den rechten Teil der Verteilungen, so ist ersichtlich, dass die Selbst-Steuerung hohe Wartezeiten für den FV nahezu gänzlich eliminiert. Um dieses Ergebnis zu beleuchten, wurden die Ergebnisse auf Wartezeiten grösser 60 Sekunden und 90 Sekunden gefiltert. Die Ergebnisse für VS-PLUS als auch die Selbst-Steuerung finden sich in Tabelle 6. Es zeigt sich, dass mit der Selbst-Steuerung Wartezeiten grösser als 90 Sekunden von 97 Ereignissen auf 4 reduziert werden können (entspricht einer Reduktion von 95.88%). Betrachtet man im Weiteren die Wartezeiten mit Werten grösser als 60 Sekunden, kann mit der Selbst-Steuerung eine Reduktion von 682 Ereignissen auf 94 erreicht werden.

Tabelle 6: Vergleich der Häufigkeit von Wartezeiten am SLU120, die einen Grenzwert von 60 Sekunden und 90 Sekunden überschreiten

Grenzwerte	VS-PLUS Häufigkeit [-]	–	Selbst-Steuerung Häufigkeit [-]	–	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
<i>WZ > 90s</i>	97		4		-93	-95.88%
<i>WZ > 60s</i>	682		94		-588	-86.22%

Um zusätzlich noch einen Einblick zu gewähren, welche Unterschiede sich an den einzelnen Signalgebern des FVs für die zwei LSA-Steuerung ergeben, wurden die einzelnen Verkehrsströme für die Dienstag Morgen- und Abendspitze als auch für den gesamten Messzeitraum getrennt untersucht. Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Die Abbildungen zu den Zahlenwerten aus der Tabelle finden sich im Anhang.

Es zeigt sich, dass die Selbst-Steuerung für alle Signalgeber des FVs am Knoten SLU120 Verbesserungen herbeiführt. In der Morgenspitze bewegen sich die Reduktionen der Wartezeit an den Signalgebern 8 – 13 zwischen 16.13% und 47.06%. In der Abendspitze bewegen sich diese Ergebnisse im Bereich von 16.67% und 55.81%. Betrachtet man den gesamten Zeitraum, führt die Selbst-Steuerung an den Signalgebern 8 – 13 jeweils eine Reduktion der Wartezeit von 27.03%, 28.95%, 23.08% und 32.14% herbei.

Zusammenfassend kann das Fazit abgegeben werden, dass die Selbst-Steuerung in allen betrachteten Fällen die Wartezeit für den FV am Knoten SLU120 signifikant reduziert und ein Einsatz der Steuerung für diese Verkehrsströme hier positiv begutachtet werden kann.

Tabelle 7: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für die einzelnen Signalgeber des FVs am Knoten SLU120 der Morgen- und Abendspitze des Dienstages und für den gesamten Messzeitraum.

		Zeitraum		
		Dienstag Morgenspitze	Dienstag Abendspitze	Gesamt
Signalgeber	Steuerung	Wartezeit i. D. [s]	Wartezeit i. D. [s]	Wartezeit i. D. [s]
8	VS-PLUS	47	42	37
	Selbst-Steuerung	28	35	27
	Unterschied absolut [s]	-19	-7	-10
	Unterschied relativ [%]	-40.43%	-16.67%	-27.03%
9	VS-PLUS	51	47	38
	Selbst-Steuerung	35	29	27
	Unterschied absolut [s]	-16	-18	-11
	Unterschied relativ [%]	-31.37%	-38.30%	-28.95%
12	VS-PLUS	31	43	26
	Selbst-Steuerung	26	19	20
	Unterschied absolut [s]	-5	-24	-6
	Unterschied relativ [%]	-16.13%	-55.81%	-23.08%
13	VS-PLUS	34	37	28
	Selbst-Steuerung	18	21	19
	Unterschied absolut [s]	-16	-16	-9
	Unterschied relativ [%]	-47.06%	-43.24%	-32.14%

7.2 Knoten SLU121

Am Knoten SLU121 sind 4 Querungen für den FV vorgesehen. Davon sind 3 Querungen mit Schutzinseln implementiert, was eine gesamte Anzahl von 14 Detektoren ergibt. Da auch hier eine Querung der gesamten Fahrbahn in einer Grünphase sichergestellt ist, müssen die Taster der Schutzinsel nicht separat untersucht werden. Für die Querung der Werkhofstrasse werden die Taster FD13 und FD14 verwendet, welchen in den Daten mit den Identifikationsnummern D24 – D26 korrespondieren. Für die zwei Querungen der Tribschenstrasse werden die Taster FD9, FD10 und FD17, FD18 verwendet. In den Daten sind diese Detektoren mit D21, D22 und D27, D28 bezeichnet. Die Unterlachenstrasse stellt ebenfalls zwei Taster FD20.1 und FD20.2

zur Verfügung, welche aber keine Signalwechsel aufweisen. Diese werden wiederum mit einem «Gratis-Grün» bedient und werden daher in der Analyse nicht berücksichtigt.

Zur Bestimmung der Wartezeit wird wiederum die Methodik aus Kapitel 5.2 angewandt. Es werden zuerst die einzelnen Wochentage vorgestellt. Dabei wird sich hier auf die Wochentage Montag, Dienstag und Samstag beschränkt. Die Abbildungen der restlichen Wochentage finden sich im Anhang. Zudem sind die durchschnittlichen Wartezeiten in Tabelle 8 zusammengefasst. Abbildung 24 zeigt den Vergleich der ermittelten Wartezeiten für den FV montags.

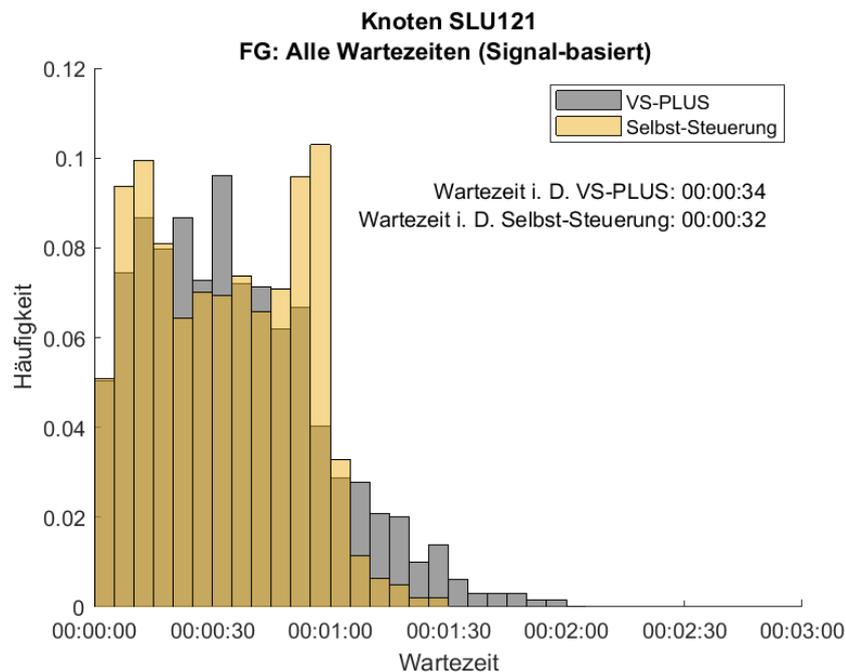


Abbildung 24: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Montag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Es zeigt sich wiederum eine Verschiebung der Verteilung nach links zu kürzeren Wartezeiten für den FV am Knoten SLU120 durch die Selbst-Steuerung. Wartezeiten grösser 1 Minute und 30 Sekunden können durch die Selbst-Steuerung verhindert werden und auch die Häufigkeit von Wartezeiten grösser 1 Minute sinken erheblich. Im Durchschnitt (i.D.) kann die Wartezeit montags von 34 Sekunden (VS-PLUS) auf 32 Sekunden (Selbst-Steuerung) verringert werden.

Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen Ergebnisse von Dienstag und Samstag. Betrachtet man den Dienstag, fällt auf, dass die Selbst-Steuerung hier eine leichte Verschlechterung der mittleren Wartezeit herbeiführt. Der errechnete Wert erhöht sich von 30 Sekunden (VS-PLUS) auf 33 Sekunden (Selbst-Steuerung). Auffällig ist hier jedenfalls, dass eine grössere Häufigkeit der Wartezeiten im Bereich von 1 Minute zu erkennen ist (das zeigt sich auch bei den anderen Wochentagen Montag und Samstag). Jedoch zeigt sich am Dienstag eine geringere Häufigkeit von Wartezeiten, die grösser als 1 Minute und 30 Sekunden sind. Gerade diese Fälle können jedoch von der Selbst-Steuerung gut vermieden werden. Betrachtet man den Samstag, zeigt sich ein ähnliches Bild

jedoch mit einer Verbesserung der mittleren Wartezeiten durch die Selbst-Steuerung von 37 Sekunden (VS-PLUS) auf 35 Sekunden (Selbst-Steuerung).

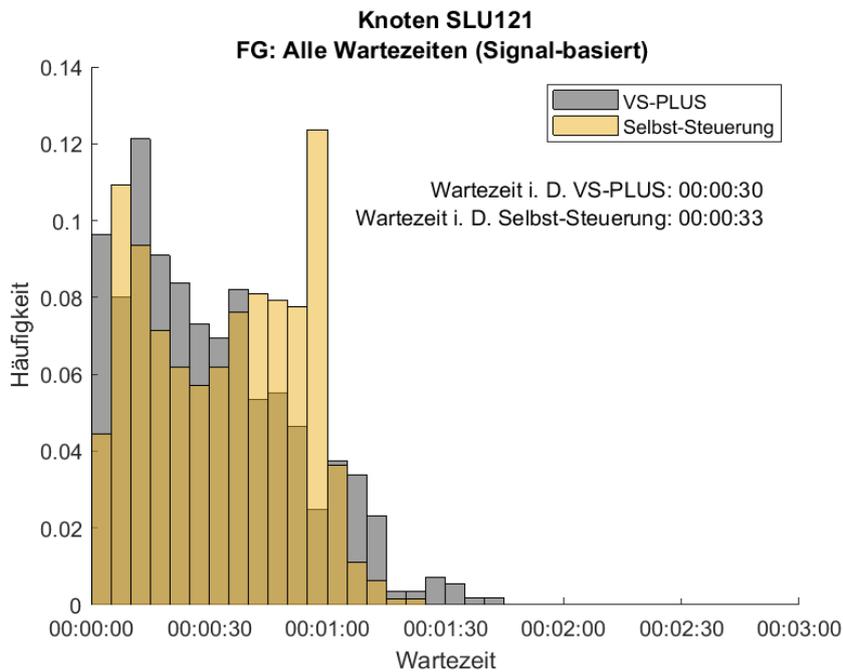


Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Dienstag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

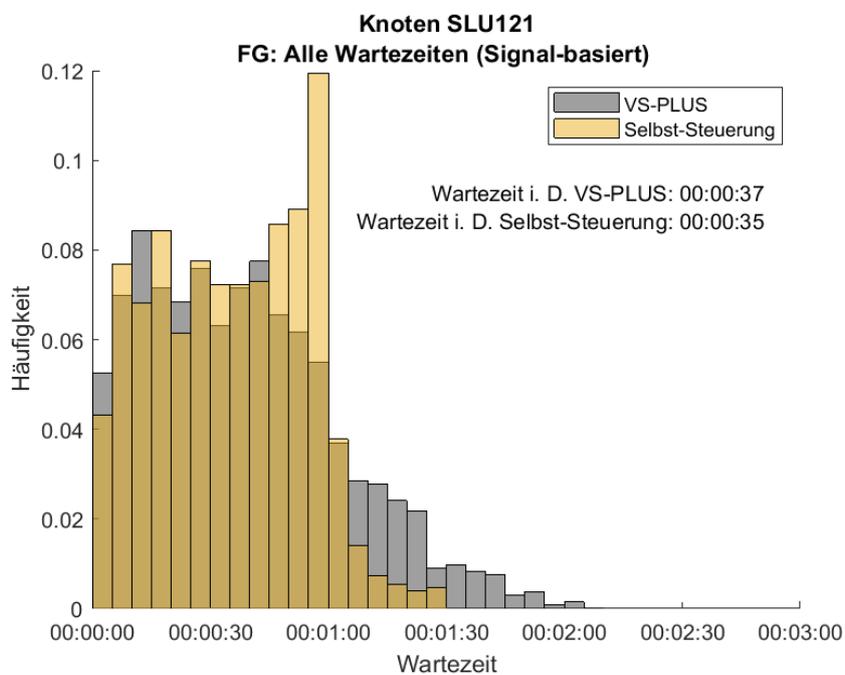


Abbildung 26: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Samstag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Untersucht man nun die Morgenspitze, Mittagsverkehr und Abendspitze des Dienstages am Knoten SLU121, zeigt sich, dass die Selbst-Steuerung vor allem in der Morgenspitze und Mittagsverkehr eine Verbesserung der Wartezeiten für den FV hervorrufen kann. Es können jeweils Reduktionen der mittleren Wartezeit von 45 Sekunden und 44 Sekunden (jeweils VS-PLUS) auf 37 Sekunden und 36 Sekunden (Selbst-Steuerung) erreicht werden. Dabei zeigt sich jeweils wiederum, dass der rechte Teil der Häufigkeitsverteilung eliminiert werden kann. Analysiert man die Daten der Abendspitze, zeigt sich nur ein geringer Unterschied der beiden LSA-Steuerungen. Die Selbst-Steuerung lässt keine Wartezeiten grösser als 1 Minute und 20 Sekunden zu, allerdings schafft es die Steuerung VS-PLUS grössere Häufigkeiten von Wartezeiten im Bereich von 0 – 20 Sekunden herbeizuführen. Die durchschnittlichen Wartezeiten ergeben eine leichte Verschlechterung durch die Selbst-Steuerung von 33 Sekunden (VS-PLUS) auf 34 Sekunden (Selbst-Steuerung).

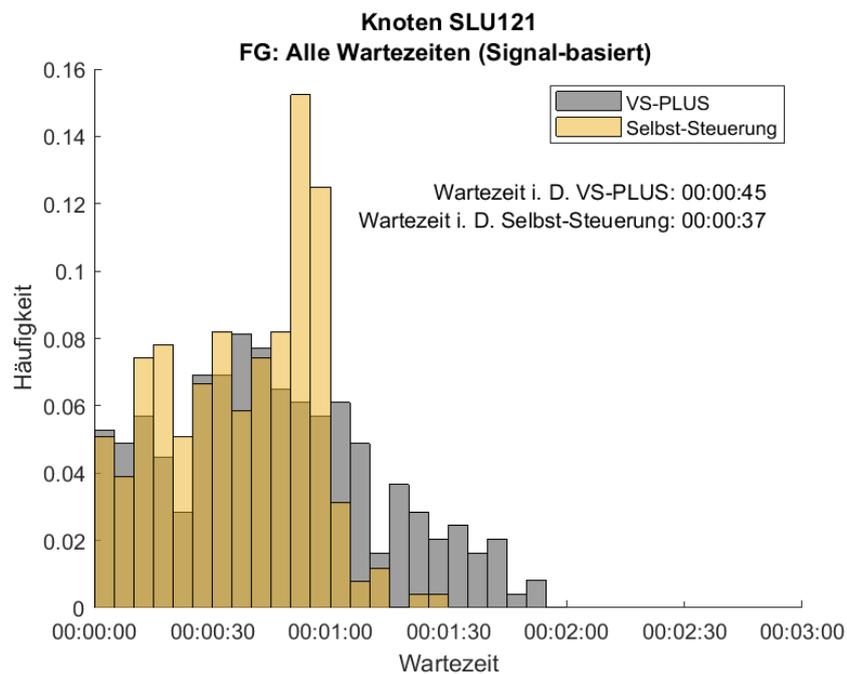


Abbildung 27: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV in der dienstags Morgenspitze, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

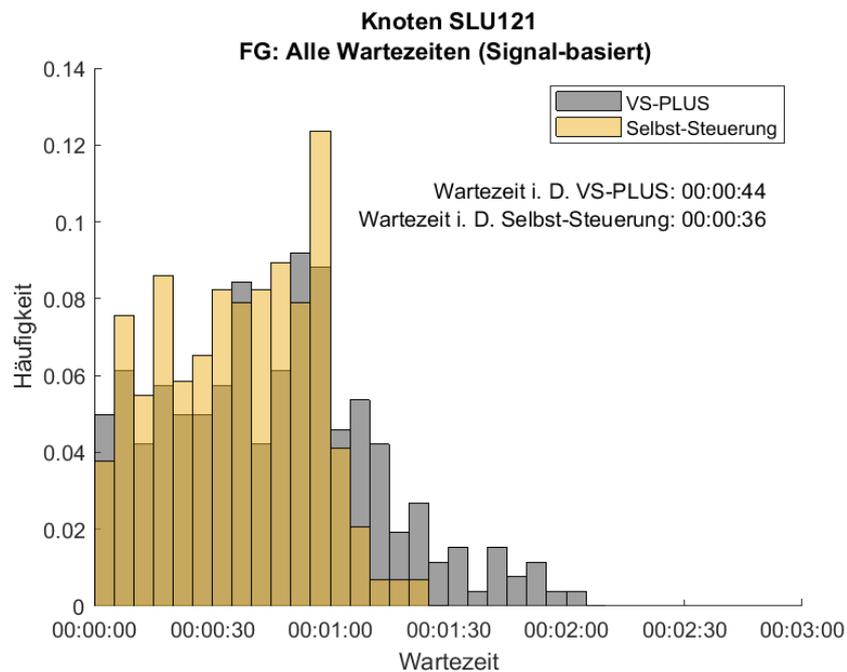


Abbildung 28: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV im Mittagsverkehr des Dienstages, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

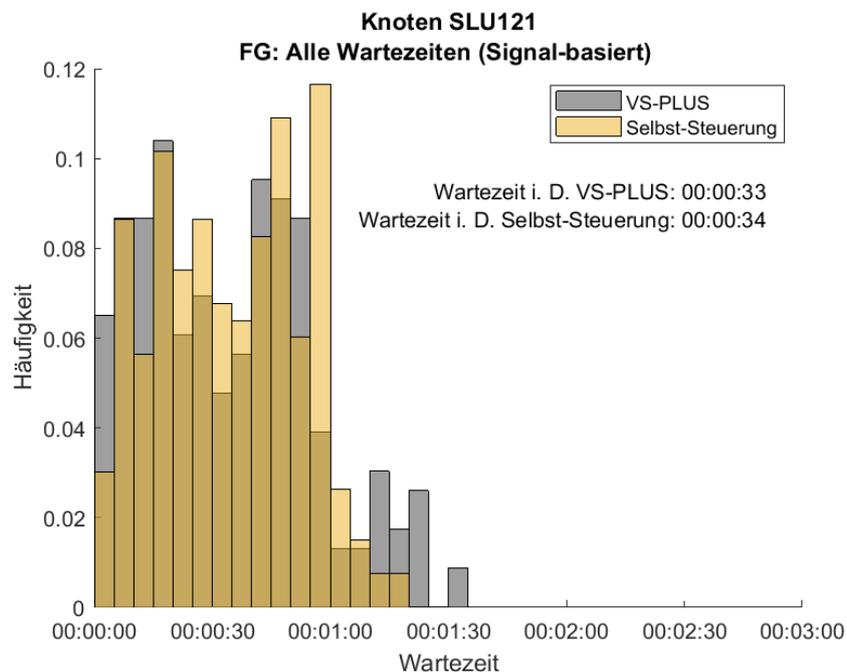


Abbildung 29: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV in der dienstags Abendspitze, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Abbildung 30 zeigt die aggregierten Ergebnisse als Häufigkeitsverteilung für den gesamten Messzeitraum.

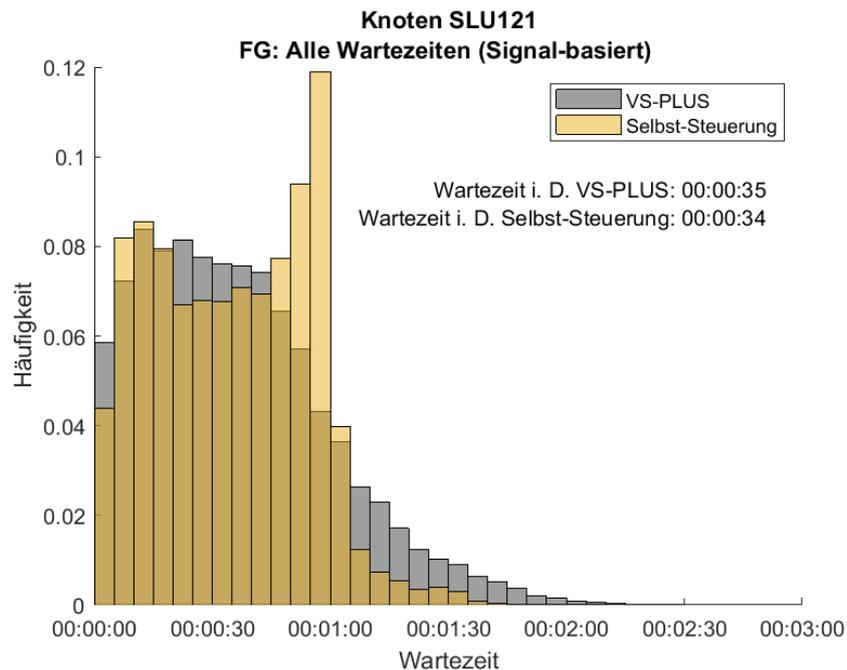


Abbildung 30: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Es zeigt sich, dass die Selbst-Steuerung den rechten Rand der Verteilung, welcher hohe Wartezeiten im Bereich von 1:10 Minuten bis 2 Minuten repräsentiert, wesentlich reduzieren kann. Es ist davon auszugehen, dass diese auftretenden Wartezeiten zu jenen im Bereich zwischen 50 Sekunden und 1 Minute reduziert werden. Zudem zeigt sich aber auch, dass die Selbst-Steuerung Wartezeiten von 5 Sekunden bis 45 Sekunden mit geringerer Häufigkeit herbeiführt (ausgenommen 10 Sekunden und 15 Sekunden, wo eine leichte Verbesserung zu erkennen ist). Daher ist folgerichtig die berechnete mittlere Wartezeit von VS-PLUS mit 35 Sekunden nicht signifikant unterschiedlich zu den ermittelten 34 Sekunden der Selbst-Steuerung (ein relativer Unterschied von 3%). Es kann somit nur von einer geringen Verbesserung für den FV am Knoten SLU121 ausgegangen werden. Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse der durchschnittlichen Wartezeiten für alle analysierten Wochentage und den korrespondierenden relativen Unterschied.

Es zeigt sich, dass an den Wochentagen Montag, Donnerstag und Samstag eine leichte Verbesserung durch die Selbst-Steuerung zu verzeichnen ist. Am Dienstag ist jedoch eine Verschlechterung von 10.00% der mittleren Wartezeit zu verzeichnen. Interessant ist hierbei, dass in der Dienstag-Morgenspitze und auch im Mittagsverkehr eigentlich eine Verbesserung zu verzeichnen ist. Es trägt also der zweite Teil des Tages zu der Verschlechterung von 10.00% bei, wie auch in der Abendspitze zu erkennen ist (Erhöhung der mittleren Wartezeit um 3.03%). Mittwochs zeigen die beiden Steuerungsverfahren im Mittel die gleiche Performance auf. Fokussiert man sich auf die aggregierten Wartezeiten über den gesamten Messzeitraum, so zeigt sich, dass die Selbst-Steuerung eine leichte Verbesserung von 35 Sekunden auf 34 Sekunden mittlere Wartezeit erreicht, was einer Verbesserung von 2.86% entspricht.

Tabelle 8: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für den FV am Knoten SLU121 der betrachteten Zeiträume.

Zeitraum	Wartezeit i. D. – VS-PLUS [s]	Wartezeit i. D. – Selbst-Steuerung [s]	Unterschied absolut [s]	Unterschied relativ [%]
Montag	34	32	-2	-5.88%
Dienstag	30	33	3	10.00%
Mittwoch	35	35	0	0.00%
Donnerstag	37	35	-2	-5.41%
Freitag	34	35	1	2.94%
Samstag	37	35	-2	-5.41%
Dienstag – Morgenspitze	45	37	-8	-17.78%
Dienstag – Mittagsverkehr	44	36	-8	-18.18%
Dienstag - Abendspitze	33	34	1	3.03%
Montag - Freitag	35	34	-1	-2.86%
Gesamt	35	34	-1	-2.86%

Analysiert man wiederum die Häufigkeiten von hohen Wartezeiten (grösser 60 bzw. 90 Sekunden), so zeigt sich auch am SLU121, dass durch die Selbst-Steuerung diese Ereignisse signifikant reduziert werden können. Wartezeiten grösser als 90 Sekunden werden mit der Steuerung VS-PLUS durch 201 und mit der Selbst-Steuerung durch 31 Ereignisse verzeichnet (Reduktion von 84.58%). Betrachtet man die Wartezeiten grösser als 60 Sekunden, so ergibt sich eine Reduktion von 61.42%.

Tabelle 9: Vergleich der Häufigkeit von Wartezeiten am SLU121, die einen Grenzwert von 60 Sekunden und 90 Sekunden überschreiten

Grenzwerte	VS-PLUS Häufigkeit [-]	–	Selbst-Steuerung Häufigkeit [-]	–	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
<i>WZ</i> > 90s	201		31		-170	-84.58%
<i>WZ</i> > 60s	1055		407		-648	-61.42%

Für die einzelnen Signalgeber des FV am Knoten SLU121 ergeben sich die mittleren Wartezeiten von Tabelle 10. Die Häufigkeitsverteilungen zu den errechneten Mittelwerten finden sich im Anhang.

Die Ergebnisse zeigen ein gemischtes Bild an den einzelnen Signalgebern. Als Beispiel zeigt der Signalgeber 9 eine Verschlechterung der Wartezeit um 6.98% in der Morgenspitze, jedoch eine Verbesserung von 6.38% in der Abendspitze. Über den gesamten Messzeitraum hinweg zeigt sich eine Verschlechterung der mittleren Wartezeit von 10.81%. Für die Signalgeber 10 zeigen sich in den Spitzenzeiten signifikante Verbesserung, über den gesamten Messzeitraum hinweg jedoch eine Verschlechterung von 7.89%. Interessanterweise zeigen die Signalgeber 13 und 18 in den Spitzenzeiten ebenfalls Verbesserungen durch die Selbst-Steuerung auf, aggregiert zeigt sich jedoch kein Vorteil gegenüber VS-PLUS.

Final kann also das Conclusio gezogen werden, dass es am Knoten SLU121 wesentlich darauf ankommt, welchen Signalgeber bzw. welchen Zeitraum man betrachtet, um eine Verbesserung durch die Selbst-Steuerung ableiten zu können. Massgebend ist jedenfalls die Morgenspitze und der Mittagsverkehr am Dienstag, wo die Selbst-Steuerung Verbesserungen gegenüber VS-PLUS für den FV aufzeigt. Über den gesamten Zeitraum aggregiert zeigt sich nur eine leichte Verbesserung von 2.86% (1 Sekunde mittlere Wartezeit für den FV).

Tabelle 10: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für die einzelnen Signalgeber des FVs am Knoten SLU121 der Morgen- und Abendspitze des Dienstages und für den gesamten Messzeitraum.

		Zeitraum		
		Dienstag Morgenspitze	Dienstag Abendspitze	Gesamt
Signalgeber	Steuerung	Wartezeit i. D. [s]	Wartezeit i. D. [s]	Wartezeit i. D. [s]
9	VS-PLUS	43	47	37
	Selbst-Steuerung	46	44	41
	Unterschied absolut [%]	3	-3	4
	Unterschied relativ [%]	6.98%	-6.38%	10.81%
10	VS-PLUS	52	48	38
	Selbst-Steuerung	39	45	41
	Unterschied absolut [%]	-13	-3	3
	Unterschied relativ [%]	-25.00%	-6.25%	7.89%
13	VS-PLUS	45	32	32
	Selbst-Steuerung	31	31	32
	Unterschied absolut [%]	-14	-1	0
	Unterschied relativ [%]	-31.11%	-3.13%	0.00%
14	VS-PLUS	43	49	36
	Selbst-Steuerung	36	28	27
	Unterschied absolut [%]	-7	-21	-9
	Unterschied relativ [%]	-16.28%	-42.86%	-25.00%
17	VS-PLUS	38	34	28
	Selbst-Steuerung	27	35	33
	Unterschied absolut [%]	-11	1	5
	Unterschied relativ [%]	-28.95%	2.94%	17.86%
18	VS-PLUS	46	45	35
	Selbst-Steuerung	35	33	35
	Unterschied absolut [%]	-11	-12	0
	Unterschied relativ [%]	-23.91%	-26.67%	0.00%

8 Ergebnisse der Auswertegrößen für den öffentlichen Verkehr

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für den ÖV präsentiert. Es wurde die Reisezeit für die beiden Untersuchungsknoten als auch die Wartezeit bestimmt. Für die Berechnung von $RZ_{\text{ÖV}}$ und $WZ_{\text{ÖV}}$ wurde die Methodik von Kapitel 5.3 angewandt. Um ein klares Bild von der Performance der Steuerungen zu erhalten, werden die Ergebnisse für den gesamten Zeitraum, für einzelne Wochentage (Montag bis Samstag) als auch für eine Morgenspitze, Mittagsverkehr und Abendspitze (7:00 Uhr – 9:30 Uhr, 11:00 Uhr – 13:00 Uhr und 16:00 Uhr – 18:30 Uhr, respektive) des Dienstages präsentiert. Zudem werden in den Spitzenzeiten und für den gesamten Messzeitraum die einzelnen Verkehrsströme getrennt analysiert.

8.1 Knoten SLU120

Am Knoten SLU120 sind insgesamt 7 Paare von Detektoren für die An- und Abmeldung des ÖVs vorgesehen. Auf der Langensandbrücke vor den Signalgebern 24 und 25 sind die Detektoren B29an, B30an und B29ab, B30ab vorhanden. Des Weiteren sind zwei Paare (B20an/ab und B21an/ab) für die Detektion von ÖV-Verkehr in die Tribschenstrasse und Kellerstrasse vorhanden. Das Paar B19an/ab deckt den ÖV aus der Kellerstrasse kommend ab. Von Osten kommend auf die Langensandbrücke sind die Paare B15an/ab und B28an/ab vorhanden. In den Daten korrespondieren diese Bezeichnungen zu den folgenden Identifikationsnummern: B29an/ab – D42/D41; B30an/ab – D44/D43; B20an/ab – D41/D45; B21an/ab – D43/D46; B19an/ab – D39/D38; B15an/ab – D37/D36 und B28an/ab – D38/D40.

Zuerst werden auch für den ÖV die Tagesergebnisse der Häufigkeitsverteilungen für die Wartezeit vorgestellt. Dabei finden sich in Abbildung 31 bis Abbildung 33 die Ergebnisse für die Tage Montag, Dienstag und Samstag. Die restliche Zusammenstellung der mittleren Wartezeiten finden sich in Tabelle 11 und die korrespondierenden Abbildungen im Anhang.

Montags zeigt sich eine durchschnittliche Wartezeit für den ÖV von 4 Sekunden (VS-PLUS) und verringert sich auf 3 Sekunden mit der Selbst-Steuerung. Diese Verbesserung zeigt sich in der Verteilung mit einer klaren Verschiebung der Verteilung nach links zu kürzeren Wartezeiten. Mit der Selbst-Steuerung ergeben sich Wartezeiten um die 5 – 10 Sekunden häufiger als mit VS-PLUS. Zudem zeigt die Wartezeiten-Verteilung der Steuerung VS-PLUS eine geringe Häufigkeit bei Wartezeiten grösser als 20 Sekunden. In Abbildung 32 und Abbildung 33 zeigt sich ein sehr ähnliches Bild. Für den Dienstag ergeben sich mittlere Wartezeiten von 4 Sekunden (VS-PLUS) und 3 Sekunden (Selbst-Steuerung) als am Montag. An einem Samstag ergeben sich 3 Sekunden für VS-PLUS und ebenfalls 3 Sekunden durch die Selbst-Steuerung. Es kann gezeigt werden, dass das bereits gute Niveau der Steuerung VS-PLUS durch die Selbst-Steuerung gehalten bzw. verbessert werden kann.

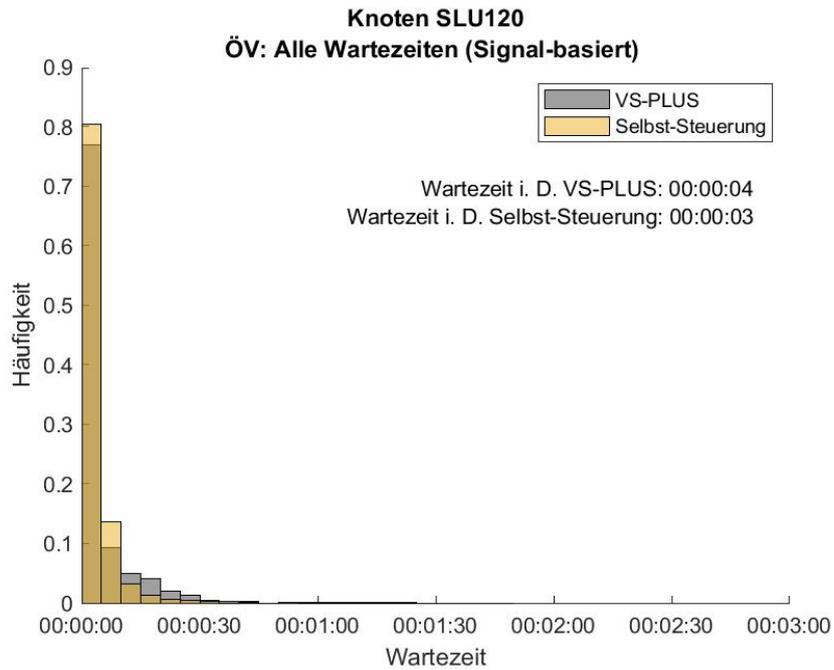


Abbildung 31: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Montag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

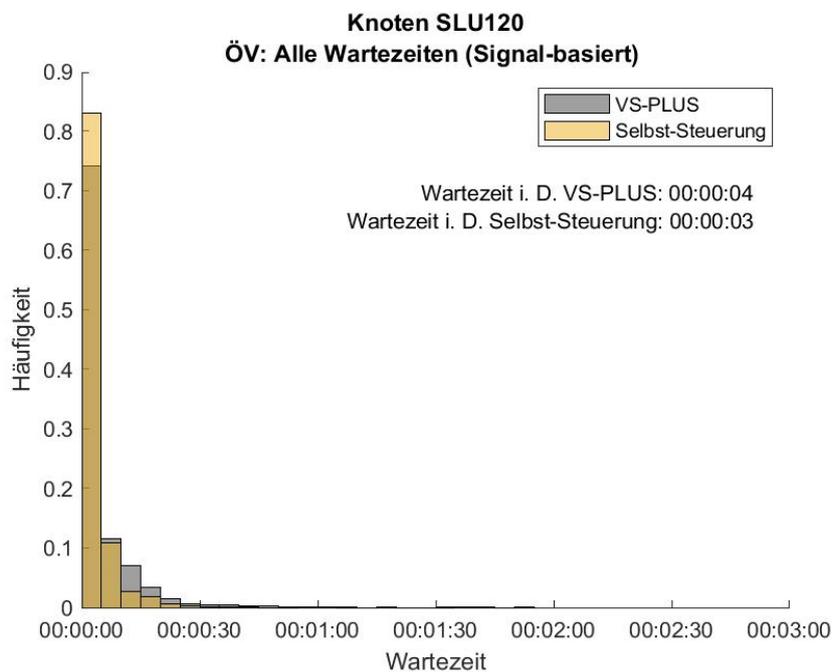


Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Dienstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

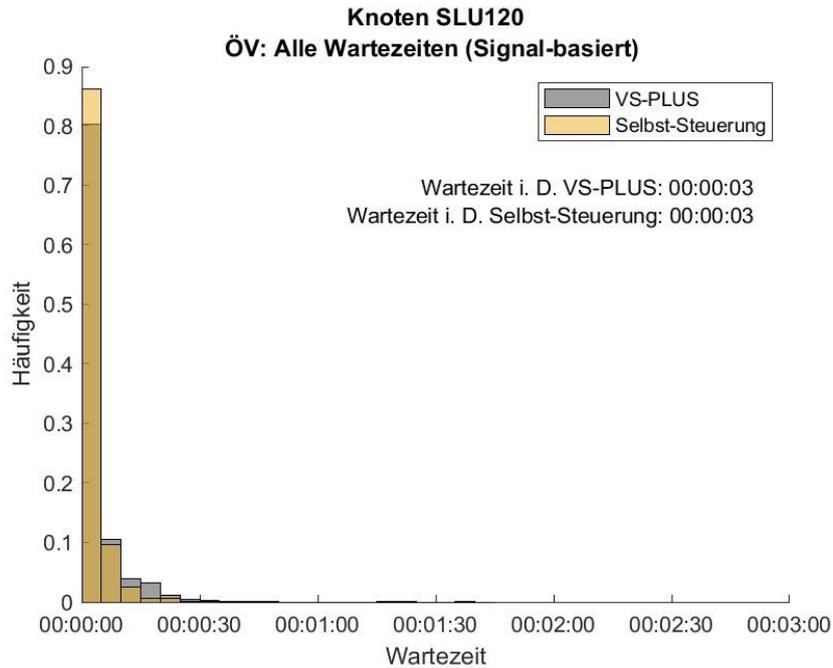


Abbildung 33: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Samstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Die Analyse der Morgenspitze, Mittagsverkehr und Abendspitze des ÖVs am Knoten SLU120 werden in Abbildung 34 bis Abbildung 36 dargestellt. Durch den Einsatz der Selbst-Steuerung kann die Wartezeit für den ÖV am Morgen von 5 Sekunden (VS-PLUS) auf 3 Sekunden (Selbst-Steuerung) gehalten werden. Betrachtet man den Mittagsverkehr als auch den Abendverkehr so ergeben sich für beide Steuerung ähnliche Werte und Verbesserungen (jeweils 3 Sekunden für VS-PLUS und 3 und 2 Sekunden für die Selbst-Steuerung).

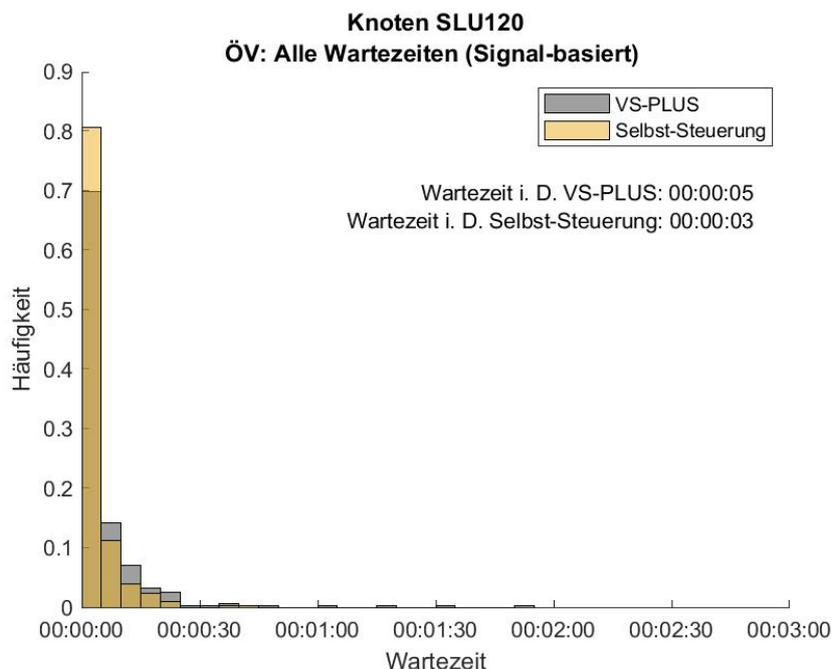


Abbildung 34: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV in der dienstags Morgenspitze, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

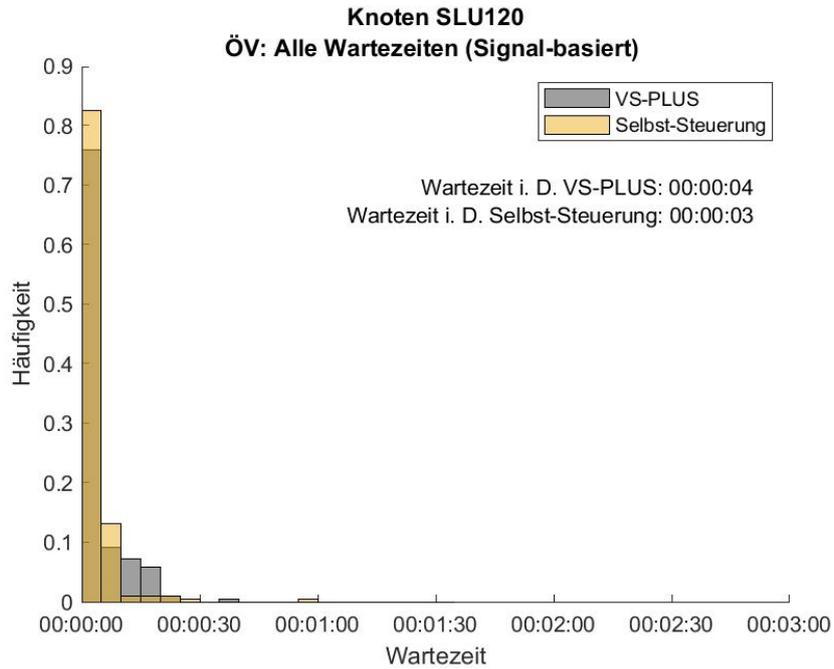


Abbildung 35: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV im Mittagsverkehr des Dienstages, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

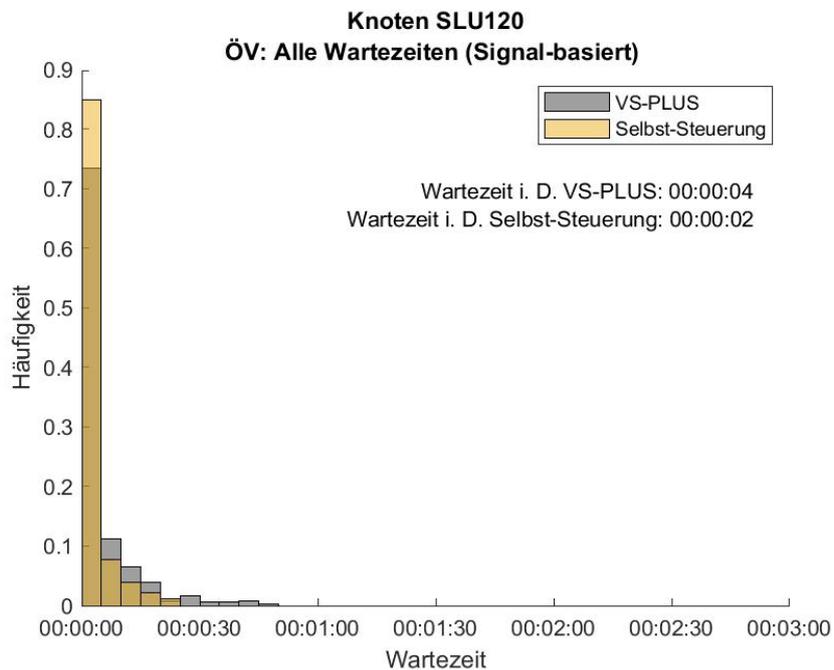


Abbildung 36: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV in der dienstags Abendspitze, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Das beste Ergebnis kann durch die Selbst-Steuerung in der Abendspitze herbeigeführt werden, wo sich die durchschnittliche Wartezeit von 4 Sekunden (VS-PLUS) auf 2 Sekunde reduziert.

Bestimmt man die Wartezeiten für SLU120 über den gesamten Messzeitraum hinweg, zeigt sich die in Abbildung 37 dargestellte Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten des ÖVs.

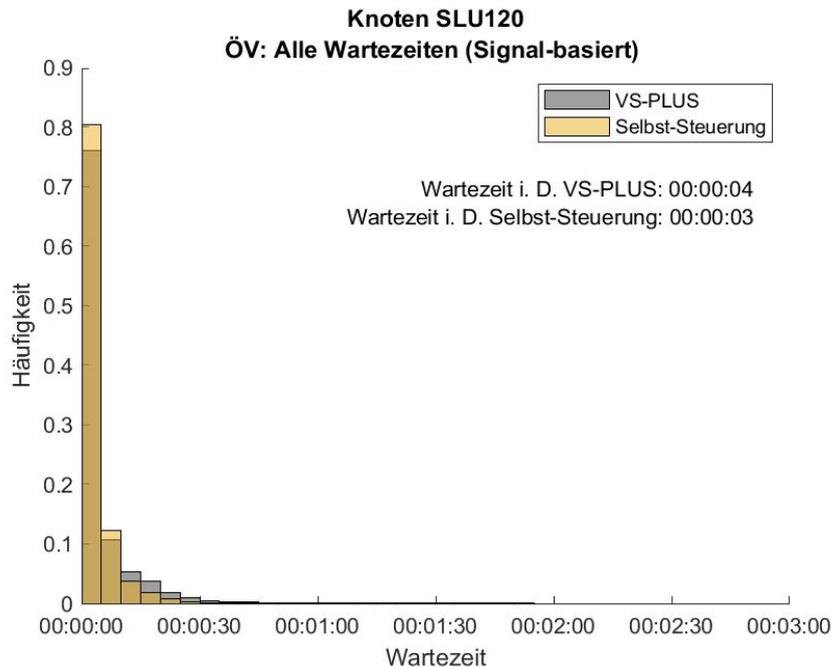


Abbildung 37: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Es zeigt sich, dass die Selbst-Steuerung den rechten Rand der Verteilung etwas nach links verschiebt, i. a. W., die maximal auftretenden Wartezeiten treten weniger häufig auf. Dagegen zeigt sich eine Erhöhung der Häufigkeiten von Wartezeiten im Bereich von 5 Sekunden bis 10 Sekunden. Generell ist zu vermerken, dass am Knoten SLU120 sehr geringe Wartezeiten für den ÖV auftreten. Im Durchschnitt, kann die Wartezeit um 1 Sekunde von 4 Sekunden (VS-PLUS) auf 3 Sekunden (Selbst-Steuerung) reduziert werden, was einer Reduktion von 25.00% entspricht.

Tabelle 8 stellt die bestimmten durchschnittlichen Wartezeiten die vorgestellten Messzeiträume mit dem prozentuellen Unterschied von VS-PLUS zu der Selbst-Steuerung nochmals zusammen. Es kann gezeigt werden, dass durch die Selbst-Steuerung an allen Untersuchungstagen (ausgenommen Freitag und Samstag, wo beide Steuerung die gleiche durchschnittliche Wartezeit liefern) eine Verbesserung von 25.00% erreicht werden kann. In der Abendspitze am Dienstag liegt die Verbesserung bei 50.00% (2 Sekunden), in der Morgenspitze bei 40.00% (2 Sekunden). Betrachtet man das aggregierte Ergebnis, ergibt sich eine Verbesserung durch die Selbst-Steuerung von 25.00% von einer Wartezeit von 4 Sekunden auf 3 Sekunden.

Tabelle 11: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für den ÖV am Knoten SLU120 der betrachteten Zeiträume.

Zeitraum	Wartezeit i. D. – VS-PLUS [s]	Wartezeit i. D. – Selbst-Steuerung [s]	Unterschied absolut [s]	Unterschied relativ [%]
Montag	4	3	-1	-25.00%
Dienstag	4	3	-1	-25.00%
Mittwoch	4	3	-1	-25.00%
Donnerstag	4	3	-1	-25.00%
Freitag	4	4	0	0.00%
Samstag	3	3	0	0.00%
Dienstag – Morgenspitze	5	3	-2	-40.00%
Dienstag – Mittagsverkehr	4	3	-1	-25.00%
Dienstag - Abendspitze	4	2	-2	-50.00%
Montag - Freitag	4	3	-1	-25.00%
Gesamt	4	3	-1	-25.00%

Final werden für den ÖV am Knoten SLU120 die einzelnen Verkehrsströme in der Morgen- und Abendspitze des Dienstag, als auch im gesamten Messzeitraum untersucht. Die Ergebnisse, wo wiederum beide LSA-Steuerungen gegenübergestellt werden, sind in Tabelle 12 mit den korrespondierenden Signalgebern gelistet.

Die Ergebnisse an den einzelnen Signalgebern zeigen i. d. R. in der Morgen- und Abendspitze bessere Ergebnisse für die Selbst-Steuerung als im Durchschnitt über den gesamten Messzeitraum. So kann an Signalgeber 4 für den ÖV eine Verbesserung von 50.00% in der Morgenspitze durch die Selbst-Steuerung hervorgerufen werden. Betrachtet man jedoch die Abendspitze und die gesamte Messzeit, so zeigt sich, dass beide Steuerungsverfahren im Mittel gleich gut funktionieren (1 Sekunden i. D.). Auch an den Signalgebern 6 und 25 zeigen sich Verbesserungen durch die Selbst-Steuerung in allen betrachteten Zeiträumen. Am Signalgeber 5 zeigt sich beispielsweise eine Verbesserung in der Morgen- und Abendspitze, im Mittel funktionieren die Steuerungen über den gesamten Messzeitraum hinweg jedoch gleich gut. Der grösste Vorteil kann am Signalgeber 25 mit einer Verbesserung von 3, 5 und 1 Sekunde in der Morgen- und Abendspitze und Gesamt gezeigt werden.

Tabelle 12: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für die einzelnen Signalgeber des ÖVs am Knoten SLU120 der Morgen- (MS) und Abendspitze (AS) des Dienstages und für den gesamten Messzeitraum.

Signalgeber	Steuerung	Dienstag - MS Wartezeit i. D. [s]	Dienstag - AS Wartezeit i. D. [s]	Gesamt Wartezeit i. D. [s]
4	VS-PLUS	6	1	1
	Selbst-Steuerung	3	1	1
	Unterschied absolut [%]	-3	0	0
	Unterschied relativ [%]	-50.00%	0.00%	0.00%
5	VS-PLUS	3	2	2
	Selbst-Steuerung	1	1	2
	Unterschied absolut [%]	-2	-1	0
	Unterschied relativ [%]	-66.67%	-50.00%	0.00%
6	VS-PLUS	6	5	5
	Selbst-Steuerung	3	4	4
	Unterschied absolut [%]	-3	-1	-1
	Unterschied relativ [%]	-50.00%	-20.00%	-20.00%
22,1	VS-PLUS	1	2	1
	Selbst-Steuerung	1	1	1
	Unterschied absolut [%]	0	-1	0
	Unterschied relativ [%]	0.00%	-50.00%	0.00%
22,2	VS-PLUS	1	1	5
	Selbst-Steuerung	3	1	5
	Unterschied absolut [%]	2	0	0
	Unterschied relativ [%]	200.00%	0.00%	0.00%
24	VS-PLUS	3	3	3
	Selbst-Steuerung	4	2	3
	Unterschied absolut [%]	1	-1	0
	Unterschied relativ [%]	33.33%	-33.33%	0.00%
25	VS-PLUS	8	9	6
	Selbst-Steuerung	5	4	5
	Unterschied absolut [%]	-3	-5	-1
	Unterschied relativ [%]	-37.50%	-55.56%	-16.67%

Final kann der Schluss gezogen werden, dass für den ÖV am Knoten SLU120 die bereits sehr niedrigen Wartezeiten durch VS-PLUS gehalten werden können und auch Verbesserung durch die Selbst-Steuerung zu erwarten sind. Es zeigt keine Untersuchungsgrösse eine Verschlechterung gegenüber der LSA-Steuerung VS-PLUS auf.

8.2 Knoten SLU121

Am Knoten SLU121 sind an der Hauptachse (Tribtschenstrasse) zwei Detektorpaare für die An- und Abmeldung des ÖVs verbaut. Von Westen nach Osten werden die Detektorpaare B22an/ab verwendet. In die Gegenrichtung wird das Paar B21an/ab verwendet. Diese korrespondieren zu den Identifikationsnummern D31/D32 und D33/D34.

Es werden wiederum vorerst die Ergebnisse der Wartezeit der Wochentage Montag, Dienstag und Samstag vorgestellt.

Abbildung 38 bis Abbildung 40 bilden die korrespondierenden Häufigkeitsverteilungen ab.

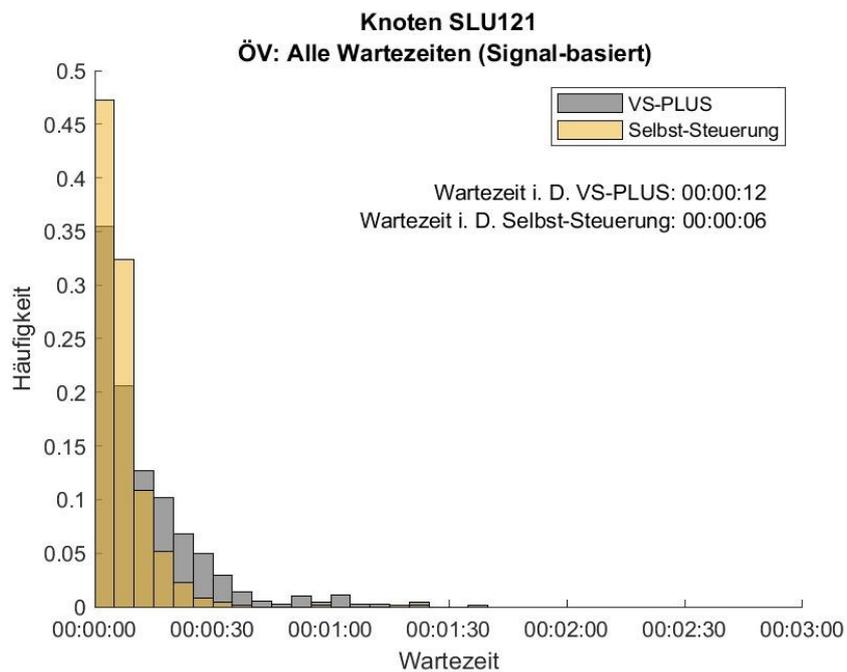


Abbildung 38: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Montag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

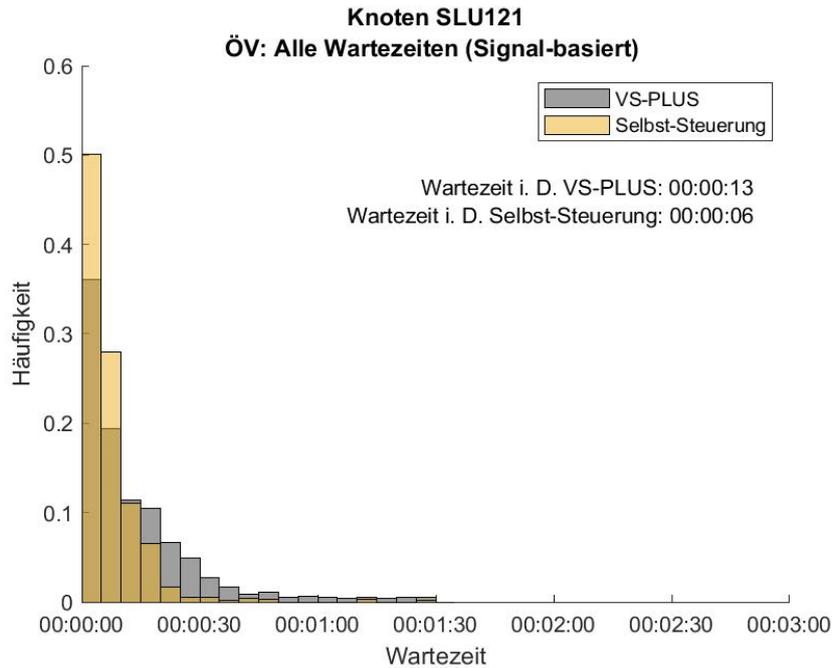


Abbildung 39: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Dienstag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

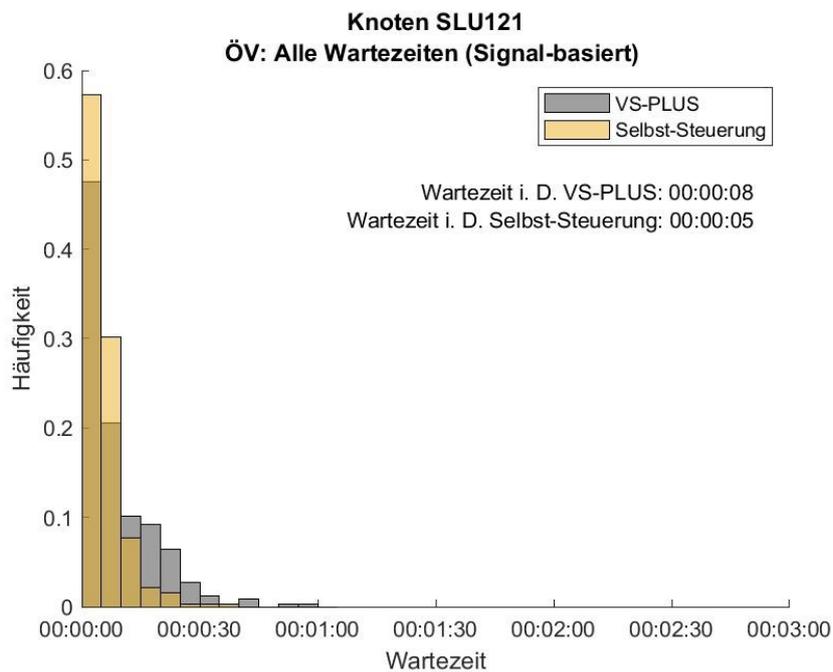


Abbildung 40: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Samstag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Es zeigt sich, dass an allen drei Wochentagen durch die Selbst-Steuerung eine erhebliche Verbesserung der Wartezeit für den ÖV bewirkt werden kann. Am Montag verringert sich die durchschnittliche Wartezeit von 12 Sekunden (VS-PLUS) auf 6 Sekunden (Selbst-Steuerung). Dabei zeigt Abbildung 38, dass die Selbst-Steuerung

Wartezeiten unter 10 Sekunden erheblich häufiger herbeiführt, stattdessen aber Wartezeiten grösser als 15 Sekunden weitaus weniger häufig vorkommen, als mit dem Einsatz der Steuerung VS-PLUS. Am Dienstag zeigt sich ein sehr ähnliches Bild. Die durchschnittliche Wartezeit verringert sich von 13 Sekunden (VS-PLUS) auf 6 Sekunden (Selbst-Steuerung). In Abbildung 40 zeigt den Samstag, wo ebenfalls Wartezeiten zwischen 5 und 10 Sekunden weitaus häufiger durch die Selbst-Steuerung hervorgerufen werden. Im Durchschnitt ergibt dies am Wochentag Samstag eine durchschnittliche Wartezeit für den ÖV von 8 Sekunden (VS-PLUS) und 5 Sekunden (Selbst-Steuerung).

Die restlichen Wochentage finden sich im Anhang und die durchschnittlichen Wartezeiten sind nochmals in Tabelle 13 zusammengestellt. Des Weiteren werden die Ergebnisse der Morgenspitze, Mittagsverkehr und Abendspitze des Dienstages für den ÖV am Knoten SLU121 vorgestellt. In Abbildung 41 ist der Vergleich in der Morgenspitze zwischen VS-PLUS und der Selbst-Steuerung abgebildet. Es zeigt sich, dass die Selbst-Steuerung Ereignisse mit einer Wartezeit zwischen 25 Sekunden und 50 Sekunden erheblich reduzieren kann. Das ist auch im Ergebnis der durchschnittlichen Wartezeit für diesen Zeitraum zu sehen, wo durch VS-PLUS 15 Sekunden an Wartezeit zu erwarten sind und mit der Selbst-Steuerung 6 Sekunden. Es treten jedoch mit der Selbst-Steuerung auch Ereignisse mit einer Wartezeit um 40 Sekunden auf.

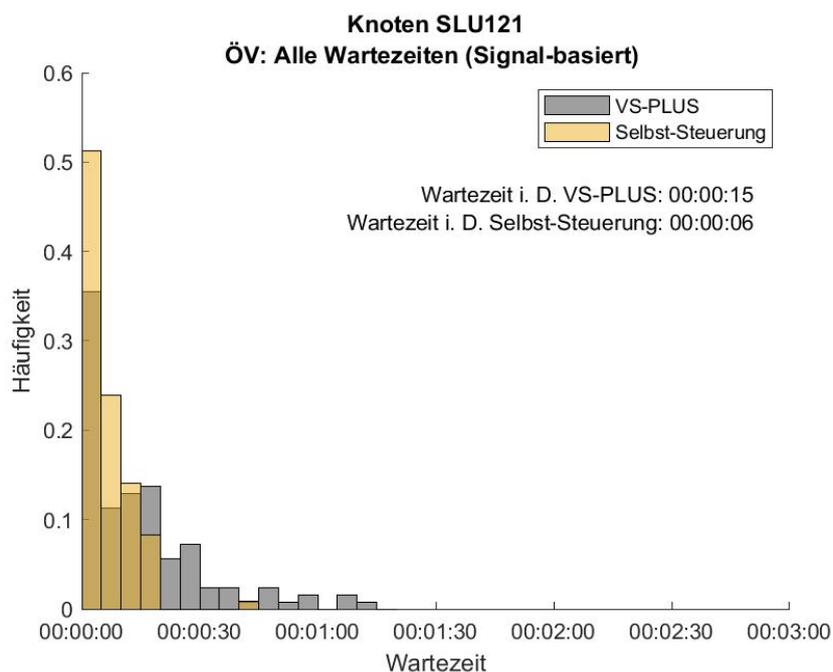


Abbildung 41: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV in der dienstags Morgenspitze, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

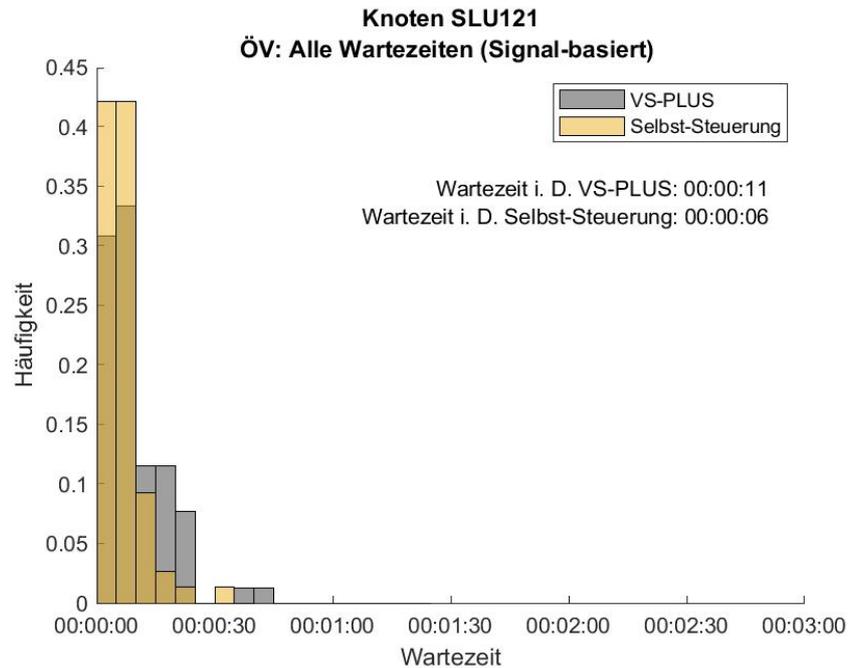


Abbildung 42: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV im Mittagsverkehr des Dienstag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Abbildung 42 zeigt den Mittagsverkehr des Dienstag. Die Häufigkeitsverteilung ähnelt der Morgenspitze und die durchschnittlichen Wartezeiten errechnen sich mit 11 Sekunden (VS-PLUS) und 6 Sekunden (Selbst-Steuerung).

Analysiert man die Abendspitze des Dienstag (Abbildung 43), so zeigt sich eine signifikante Verbesserung durch die Selbst-Steuerung. Ereignisse mit einer Wartezeit, die grösser als 30 Sekunden ist, werden von der Selbst-Steuerung vermieden. Die Verteilung der LSA-Steuerung VS-PLUS zeigt hier wesentlich grössere Häufigkeiten für Ereignisse mit grösserer Wartezeit. Die Wartezeit im Durchschnitt für diesen betrachteten Zeitraum ergibt sich mit 17 Sekunden (VS-PLUS) und 6 Sekunden (Selbst-Steuerung).

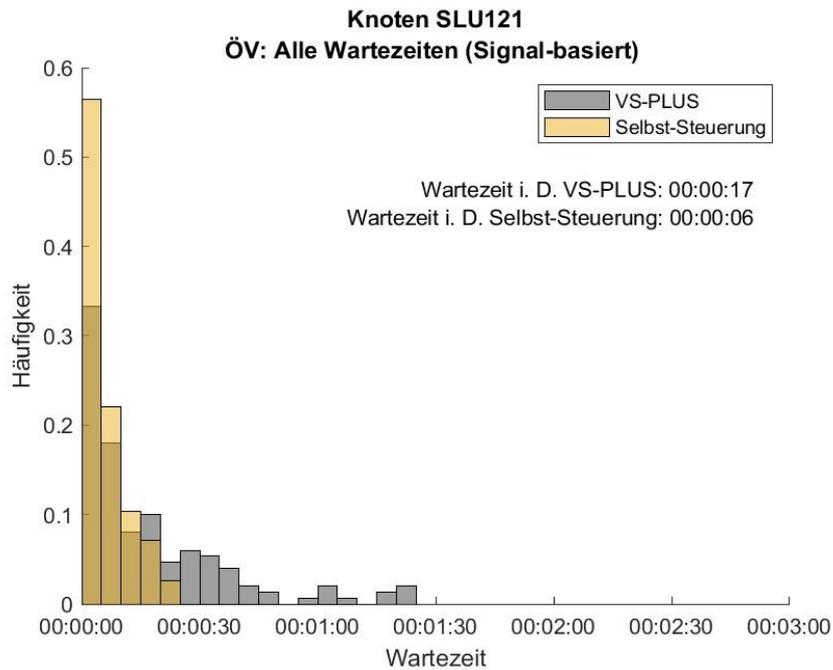


Abbildung 43: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV in der dienstags Abendspitze, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Final werden in Abbildung 44 die aggregierten Ergebnisse für den gesamten Messzeitraum vorgestellt. Dabei kann eine klare Verschiebung der Häufigkeitsverteilung nach links durch den Einsatz der LSA-Steuerung Selbst-Steuerung erkannt werden. Die durchschnittliche Wartezeit reduziert sich durch die Selbst-Steuerung von 12 Sekunden (VS-PLUS) auf 6 Sekunden. Alle ermittelten Wartezeiten und der prozentuelle Unterschied zwischen den beiden LSA-Steuerung ist nochmals in Tabelle 13 zusammengefasst.

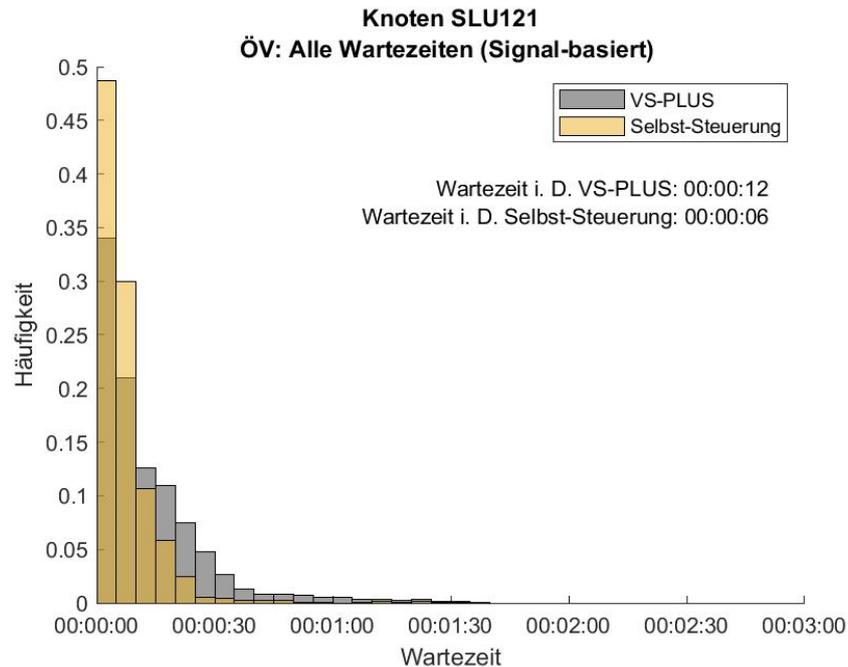


Abbildung 44: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV über den gesamten Messzeitraum, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Die Ergebnisse für den ÖV am Knoten SLU121 der einzelnen Zeiträume (Tabelle 13) zeigen den Vorteil der Selbst-Steuerung gegenüber VS-PLUS auf. An allen betrachteten Wochentagen kann eine Reduzierung der Wartezeit im Bereich von 37.50% bis zu 53.85% erzielt werden. Betrachtet man die Spitzenzeiten, so wird durch die Selbst-Steuerung die durchschnittliche Wartezeit für die Morgenspitze, Mittagsverkehr und Abendspitze um jeweils 60.00%, 45.45% und 64.71% verringert. Die aggregierten Ergebnisse für den ganzen Messzeitraum zeigen eine Verbesserung durch die Selbst-Steuerung von 50.00%, was einer Reduktion von 6 Sekunden entspricht.

Tabelle 14 zeigt zusätzlich die Ergebnisse der zwei massgebenden Signalgeber für den ÖV am Knoten SLU121. Die berechneten Unterschiede zeigen eine Verbesserung durch die Selbst-Steuerung auf (zwischen 27.27% und 53.85%). Am Signalgeber 1 kann in der Abendspitze sogar eine Verbesserung von 79.17% erreicht werden.

Tabelle 13: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für den ÖV am Knoten SLU121 der betrachteten Zeiträume.

Zeitraum	Wartezeit i. D. – VS-PLUS [s]	Wartezeit i. D. – Selbst-Steuerung [s]	Unterschied absolut [s]	Unterschied relativ [%]
Montag	12	6	-6	-50.00%
Dienstag	13	6	-7	-53.85%
Mittwoch	12	7	-5	-41.67%
Donnerstag	13	6	-7	-53.85%
Freitag	12	6	-6	-50.00%
Samstag	8	5	-3	-37.50%
Dienstag – Morgenspitze	15	6	-9	-60.00%
Dienstag – Mittagsverkehr	11	6	-5	-45.45%
Dienstag - Abendspitze	17	6	-11	-64.71%
Montag – Freitag	12	6	-6	-50.00%
Gesamt	12	6	-6	-50.00%

Tabelle 14: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für die einzelnen Signalgeber des ÖVs am Knoten SLU121 der Morgen- (MS) und Abendspitze (AS) des Dienstages und für den gesamten Messzeitraum.

		Dienstag - MS	Dienstag - AS	Gesamt
Signalgeber	Steuerung	Wartezeit i. D. [s]	Wartezeit i. D. [s]	Wartezeit i. D. [s]
1	VS-PLUS	13	24	11
	Selbst-Steuerung	6	5	6
	Unterschied absolut [s]	-7	-19	-5
	Unterschied relativ [%]	-53.85%	-79.17%	-45.45%
5	VS-PLUS	17	11	13
	Selbst-Steuerung	7	8	6
	Unterschied absolut [s]	-10	-3	-7
	Unterschied relativ [%]	-58.82%	-27.27%	-53.85%

9 Ergebnisse der Auswertegrößen für den motorisierten Individualverkehr

In diesem Kapitel werden die Resultate für den MIV vorgestellt. Dabei wird das in Kapitel 5.4 vorgestellte System angewendet und die Warte-, Belegungszeiten der Voranmeldungsschlaufen und Zeitlücken bestimmt. Um ein klares Bild von der Performance der Steuerungen zu erhalten, werden die Ergebnisse für den gesamten Zeitraum, für einzelne Wochentage (Montag bis Samstag) als auch für eine Morgenspitze, Mittagsverkehr und Abendspitze (7:00 Uhr – 9:30 Uhr, 11:00 Uhr – 13:00 Uhr und 16:00 Uhr – 18:30 Uhr, respektive) präsentiert. Zudem werden in den Spitzenzeiten (morgens und abends) als auch für den gesamten Messzeitraum die einzelnen Verkehrsströme getrennt analysiert.

9.1 Knoten SLU120

Für die Auswertung der Reisezeit wurden am Knoten SLU120 mittels der vorgestellten Methodik gemäss Plan die Einfluss-Ausfluss-Systeme definiert. Es werden dafür jeweils die vorhandenen Detektoren zur Voranmeldung (für den Einfluss) und die Querschlaufen (nach der Haltelinie befindend, für den Ausfluss) verwendet. Für die Fruttstrasse konnte kein System definiert werden, da kein Voranmeldedetektor vorhanden ist, der die Fahrzeuge beim Eintreffen in das System erfasst. Es werden vorab die aggregierten Ergebnisse für alle System am Knoten SLU120 für die Wochentage Montag, Dienstag und Samstag vorgestellt.

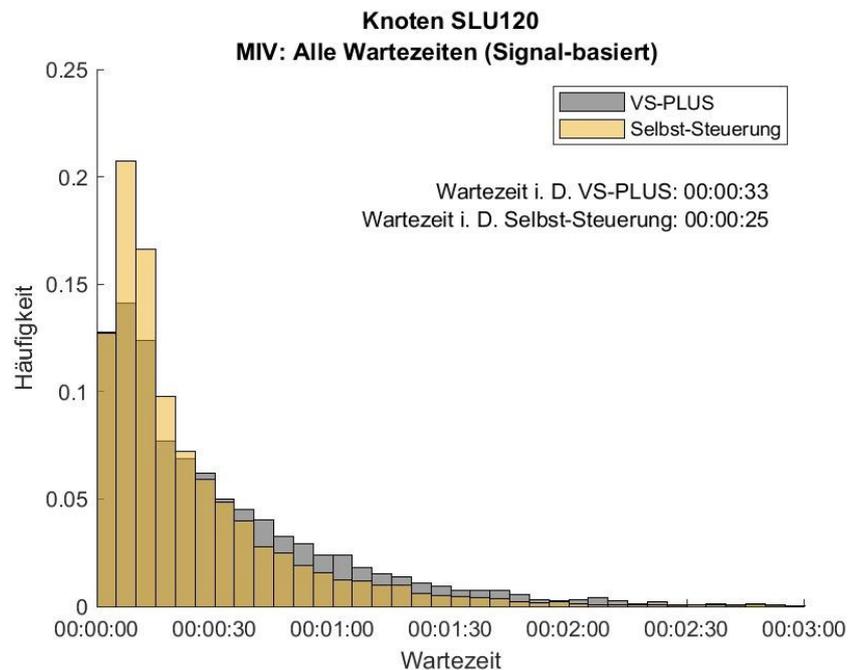


Abbildung 45: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Montag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Die Ergebnisse in Abbildung 45 zeigen, dass durch die Selbst-Steuerung die Wartezeiten montags wesentlich reduziert werden können. Vor allem die Häufigkeit von Wartezeiten zwischen 5 und 10 Sekunden erhöht sich signifikant durch den Einsatz der Selbst-Steuerung. Zudem zeigt sich, dass der rechte Teil der Häufigkeitsverteilung durch die Selbst-Steuerung reduziert werden kann. Die errechneten Durchschnittswerte der Steuerungen berufen sich auf 33 Sekunden (VS-PLUS) und 25 Sekunden (Selbst-Steuerung). Die Ergebnisse für Dienstag und Samstag finden sich in Abbildung 46 und Abbildung 47.

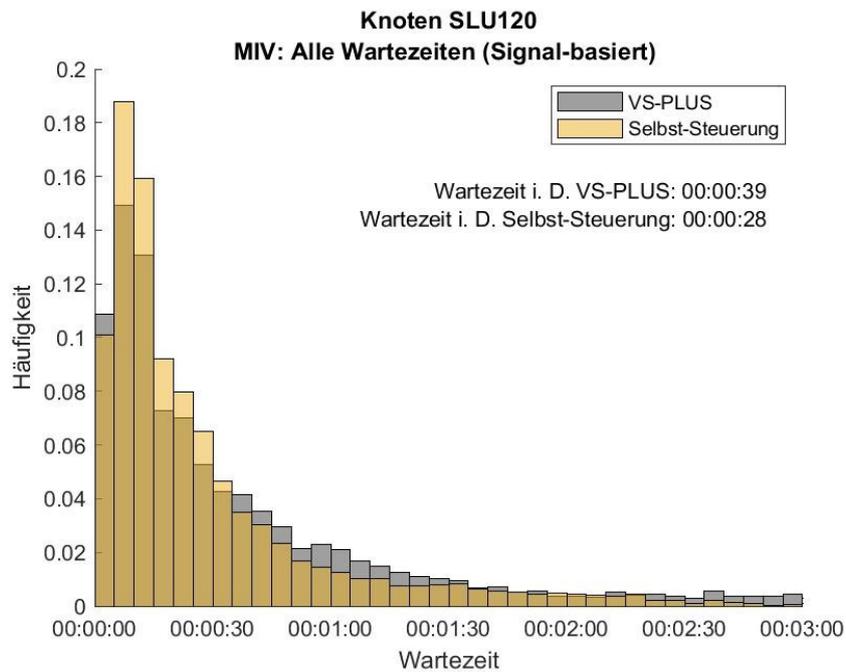


Abbildung 46: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Dienstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

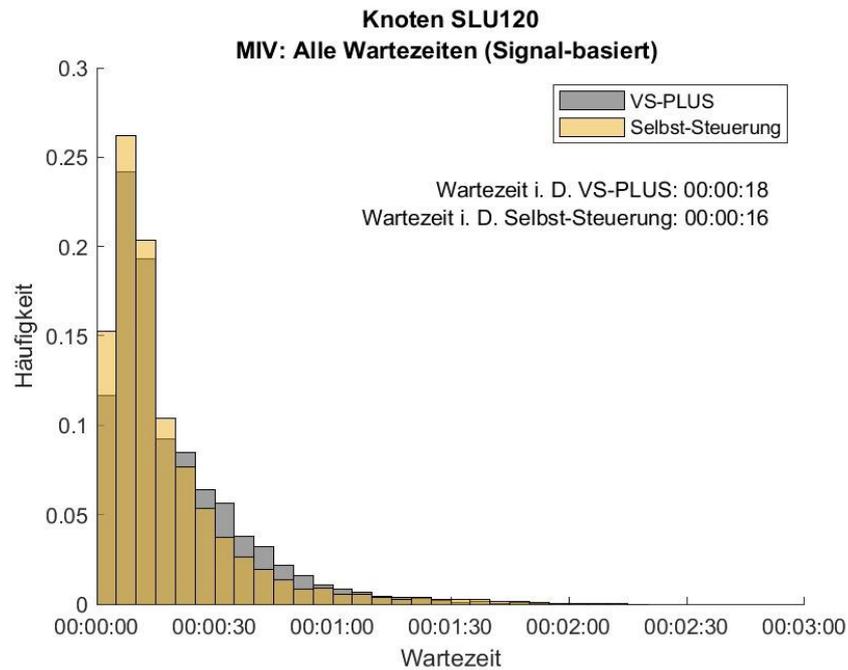


Abbildung 47: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Samstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Auch am Dienstag und Samstag zeigen sich eine signifikante Reduktion der Wartezeit für den MIV durch die Selbst-Steuerung. Im Durchschnitt verringert sich die Wartezeit am Dienstag von 39 Sekunden (VS-PLUS) auf 28 Sekunden (Selbst-Steuerung) und am Samstag von 18 Sekunden (VS-PLUS) auf 16 Sekunden (Selbst-Steuerung). Auffallend ist jedenfalls das die Verteilung des Wochentages Samstag weitaus geringere Häufigkeiten von hohen Wartezeiten aufweist, was wesentlich mit der geringeren Verkehrsnachfrage zusammenhängt.

Analysiert man die Morgenspitze, Mittagsverkehr und Abendspitze für die Wartezeiten des MIVs am Knoten SLU120, zeigen sich die in Abbildung 48, Abbildung 49 und Abbildung 50 abgebildeten Häufigkeitsverteilungen.

Es zeigt sich, dass die durchschnittlichen Wartezeiten in der Morgen- und Abendspitze wesentlich höher sind, als aggregiert für den gesamten Wochentag Dienstag, als auch für den Mittagsverkehr. Aufgrund der korrespondierenden Verkehrsnachfrage ist so ein Verhalten des Systems allerdings erwartet. Es zeigen sich in allen drei untersuchten Zeiträumen eine Verbesserung der durchschnittlichen Wartezeit durch die Selbst-Steuerung. In der Morgenspitze kann die durchschnittliche Wartezeit von 57 Sekunden (VS-PLUS) auf 27 Sekunden (Selbst-Steuerung) reduziert werden. Im Mittagsverkehr und der Abendspitze korrespondieren diese Werte mit 20 Sekunden (VS-PLUS), 15 Sekunden (Selbst-Steuerung) und 57 Sekunden (VS-PLUS), 40 Sekunden (Selbst-Steuerung). Auffällig sind in der Verteilung der Abendspitze die hohen Wartezeiten von 2 bis 3 Minuten. Diese können damit erklärt werden, dass Fahrzeuge aufgrund des hohen Verkehrsaufkommen die Durchfahrt durch den Knoten nicht bei der ersten Grünphase schaffen und somit länger im System verweilen.

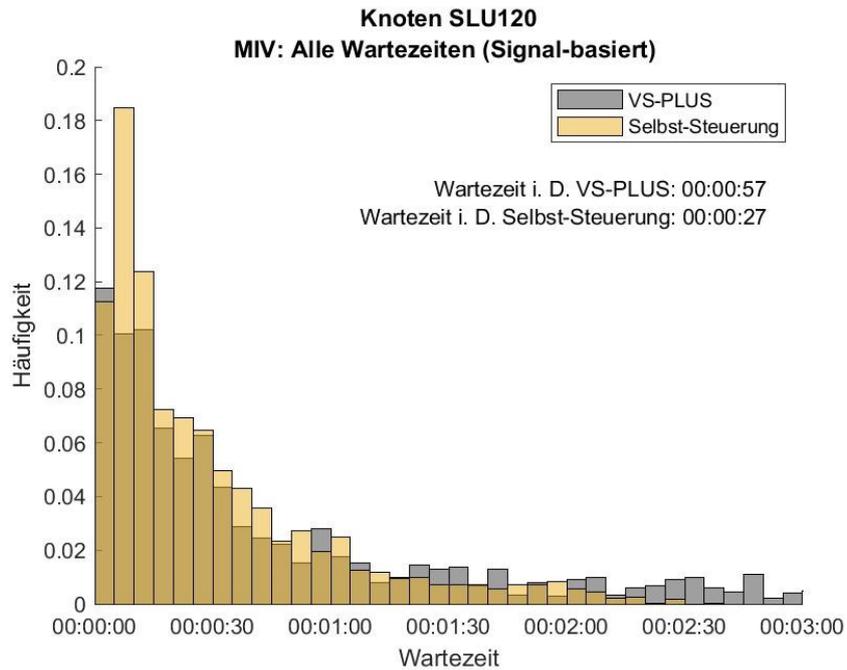


Abbildung 48: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

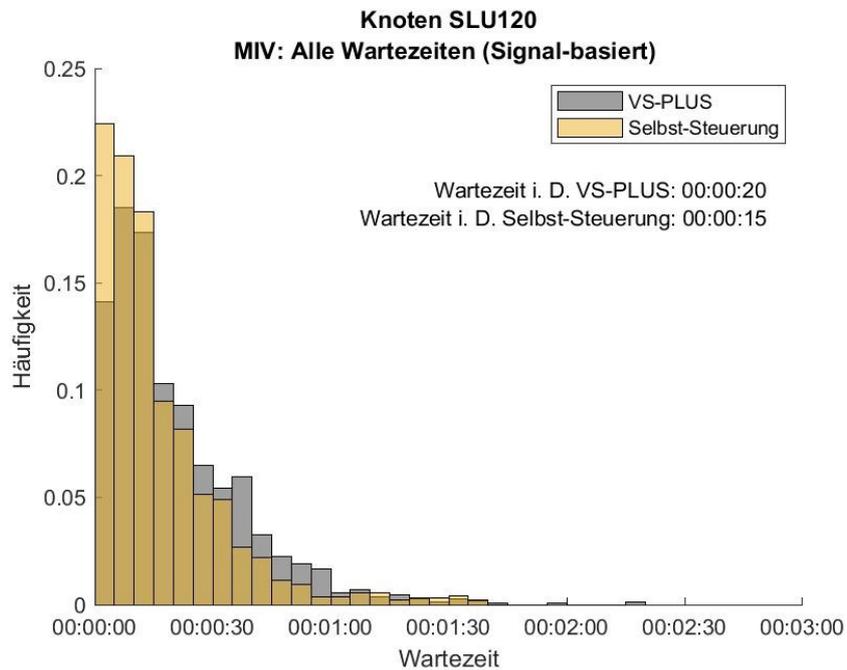


Abbildung 49: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV im Mittagsverkehr des Dienstages, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

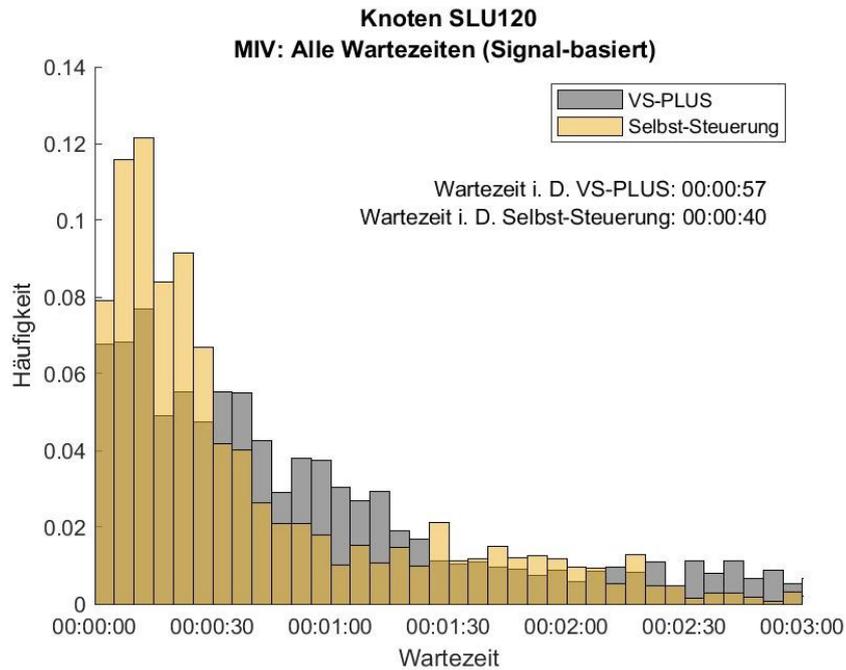


Abbildung 50: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Betrachtet man den gesamten Messzeitraum für diese Analyse, ergibt sich die Häufigkeitsverteilung in Abbildung 51.

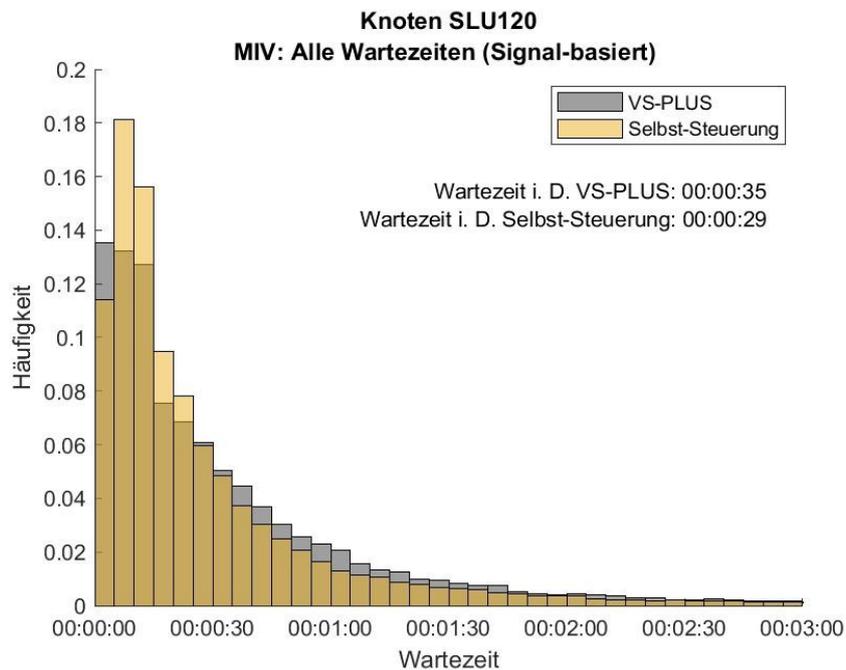


Abbildung 51: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV über den gesamten Messzeitraum, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Über den gesamten Messzeitraum zeigt sich, dass die Selbst-Steuerung eine Reduzierung der mittleren Wartezeit von 35 Sekunden auf 29 Sekunden herbeiführen kann. Die Resultate der vorgestellten Abbildungen und jener Wochentage, welche sich im Anhang befinden, sind nochmals in Tabelle 15 zusammengestellt.

Es zeigt sich, dass durch die Selbst-Steuerung in allen betrachteten Zeiträumen eine Verbesserung erreicht werden kann. Die Reduktion der Wartezeit ist in einem Bereich zwischen 3.13% und 28.21% für die betrachteten Wochentage. Für die betrachteten Spitzenzeiten, zeigen sich ähnliche Reduktion der Wartezeiten von 52.63%, 25.00% und 29.82%. Aggregiert über den gesamten Messzeitraum ergibt sich eine Reduktion der mittleren Wartezeit von 17.14% (entspricht 6 Sekunden) gegenüber der LSA-Steuerung VS-PLUS.

Tabelle 15: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für den MIV am Knoten SLU120 der betrachteten Zeiträume.

Zeitraum	Wartezeit i. D. – VS-PLUS [s]	Wartezeit i. D. – Selbst-Steuerung [s]	Unterschied absolut [s]	Unterschied relativ [%]
Montag	33	25	-8	-24.24%
Dienstag	39	28	-11	-28.21%
Mittwoch	36	33	-3	-8.33%
Donnerstag	33	29	-4	-12.12%
Freitag	32	31	-1	-3.13%
Samstag	18	16	-2	-11.11%
Dienstag – Morgenspitze	57	27	-30	-52.63%
Dienstag – Mittagsverkehr	20	15	-5	-25.00%
Dienstag - Abendspitze	57	40	-17	-29.82%
Montag - Freitag	35	29	-6	-17.14%
Gesamt	35	29	-6	-17.14%

Bei der getrennten Analyse der Systeme, werden hier speziell die Signalgeber 1, 3, 24 und 25 betrachtet. Dazu sei erwähnt, dass für den Signalgeber 2, welcher von der Tribschenstrasse kommend den Strom der Linksabbieger darstellt, keine klare Zuordnung des Einflusses und Ausflusses der Fahrzeuge festgestellt werden kann. Der Detektor 1.8 erfasst alle Fahrzeuge die entweder geradeaus oder nach links abfließen. Eine Analyse der Verkehrsströme zeigt, dass 92% der Fahrzeuge geradeaus fließen und 8% hingegen links abbiegen. Es

wurde daher aufgrund der verfügbaren Daten, als auch aufgrund der untergeordneten Bedeutung dieses Stromes auf eine detaillierte Analyse verzichtet. Für den Signalgeber 23 sei hier nochmals erwähnt, dass ein Detektor zur Voranmeldung hier fehlt, was eine Erfassung des Einflusses nicht möglich macht. Die Langschleife ist hierzu (aufgrund der erwähnten Problematik der Erfassung einzelner Fahrzeuge) zu ungenau. Die Ergebnisse der getrennten Analyse für die Morgen- und Abendspitze als auch für den gesamten Messzeitraum sind in Tabelle 16 zusammengefasst; die korrespondierenden Abbildungen finden sich im Anhang.

Tabelle 16: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für die einzelnen Signalgeber des MIVs am Knoten SLU120 der Morgen- (MS) und Abendspitze (AS) des Dienstag und für den gesamten Messzeitraum.

		Dienstag - MS	Dienstag - AS	Gesamt
Signalgeber	Steuerung	Wartezeit i. D. [s]	Wartezeit i. D. [s]	Wartezeit i. D. [s]
1	VS-PLUS	32	57	23
	Selbst-Steuerung	14	35	18
	Unterschied absolut [s]	-18	-22	-5
	Unterschied relativ [%]	-56.25%	-38.60%	-21.74%
3	VS-PLUS	70	43	36
	Selbst-Steuerung	37	47	36
	Unterschied absolut [s]	-33	4	0
	Unterschied relativ [%]	-47.14%	9.30%	0.00%
24	VS-PLUS	5	5	5
	Selbst-Steuerung	5	4	6
	Unterschied absolut [s]	0	-1	1
	Unterschied relativ [%]	0.00%	-20.00%	20.00%
25	VS-PLUS	58	28	18
	Selbst-Steuerung	23	16	14
	Unterschied absolut [s]	-35	-12	-4
	Unterschied relativ [%]	-60.34%	-42.86%	-22.22%

Die getrennte Analyse der einzelnen Signalgeber 1, 3, 24 und 25 zeigen, dass die Wartezeiten für den MIV am Knoten SLU120 reduziert werden können aber auch Verschlechterung durch den Einsatz der Selbst-Steuerung auftreten. Am Signalgeber 24 zeigt sich in der Morgenspitze keine Verbesserung und im gesamten Messzeitraum eine leichte Verschlechterung von 1 Sekunde, was 20% entspricht. Jedoch sind die Wartezeiten hier generell niedrig (im Bereich von 5 Sekunden bis 6 Sekunden) weshalb die Verschlechterung keine massiven Auswirkungen auf die Qualität der Abflüsse die Verkehrsströme hat. Am Signalgeber 3 zeigt sich in der Abendspitze eine Verschlechterung von 9.30% (4 Sekunden), jedoch konträr dazu in der Morgenspitze eine signifikante Verbesserung von 47.14% (33 Sekunden). Aggregiert auf den gesamten Messzeitraum bedeutet das an diesem Verkehrsstrom das Niveau der Wartezeit von VS-PLUS und Selbst-Steuerung gleich ist. Die

aggregierten Reduktionen der Wartezeiten am Signalgeber 1 und 25 bewegen sich im Bereich von 21.74% und 22.22%, was 5 und 4 Sekunden entspricht. Um die Qualität der LSA-Steuerung detaillierter beurteilen zu können, werden im Folgenden für den gesamten Messzeitraum die Belegungszeiten der Langschlaufen (beim Signalstatus Rot) und der Voranmeldedetektoren analysiert (Abbildung 52 und Abbildung 53).

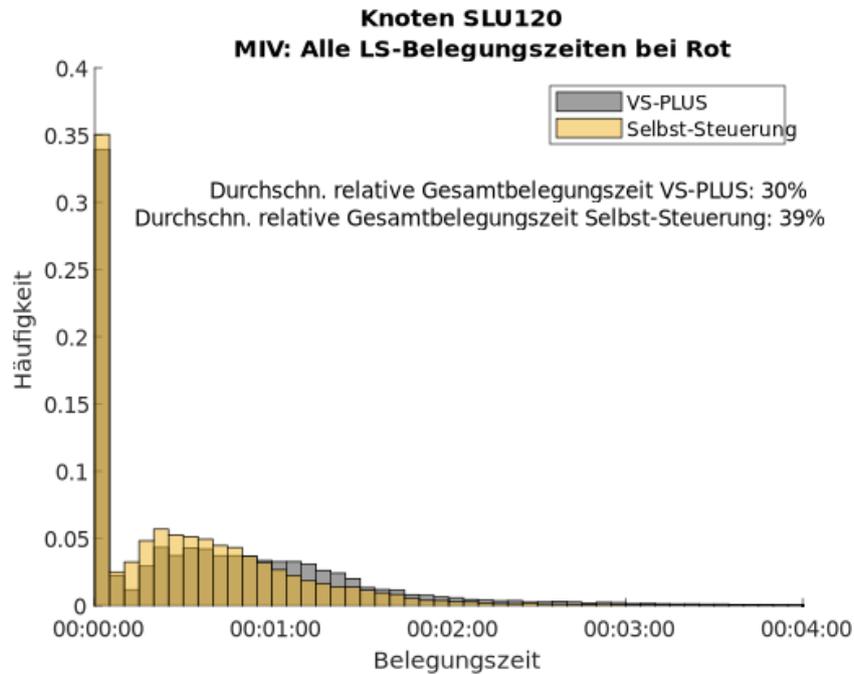


Abbildung 52: Belegungszeiten der Langschlaufendetektoren am Knoten SLU120 aggregiert über den gesamten Messzeitraum. In Grau die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS); Gelb die Selbst-Steuerung.

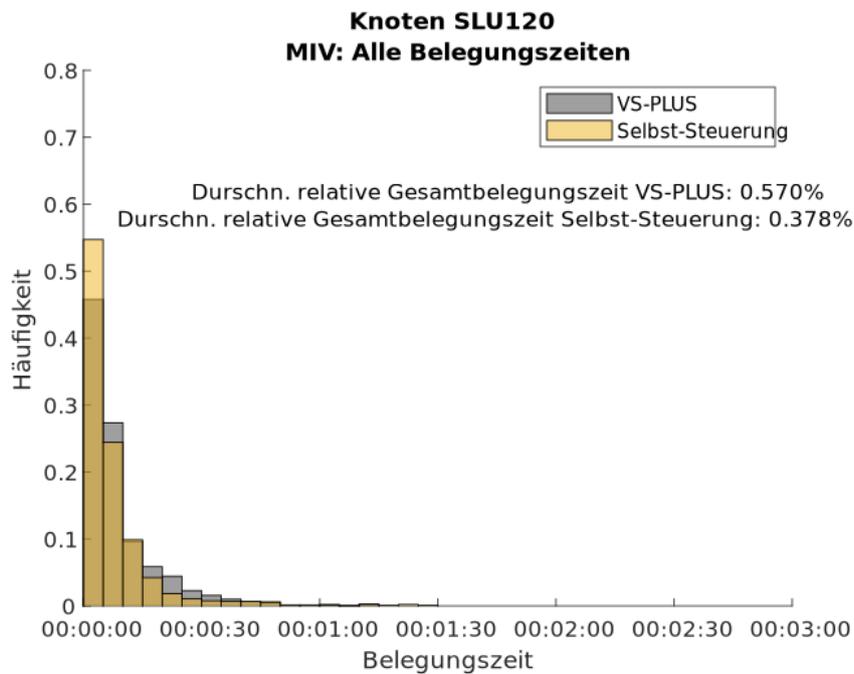


Abbildung 53: Belegungszeiten der Voranmeldedetektoren am Knoten SLU120 aggregiert über den gesamten Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Die Verteilungen der Belegungszeiten zeigen, dass durch die Selbst-Steuerung die Belegungszeiten an den Langschlaufen beim Signalstatus Rot signifikant nach links verschoben werden könne. Es treten also weitaus weniger lange Belegungszeiten (grösser als 1 Minute) auf. Auch die Analyse der Belegungszeiten der Voranmeldedetektoren, welche ein Indikator für lange Schlangen vor der LSA sind, zeigen, dass durch die Selbst-Steuerung die Häufigkeit kurzer Belegungszeiten erhöht und folglich die längeren Belegungszeiten eliminiert werden können. Auch die relative Gesamtbelegungszeit reduziert sich signifikant durch den Einsatz der Selbst-Steuerung.

Um jedoch ein klareres Bild über potenzielle Staubildungen abzuleiten, wurden die längsten Belegungszeiten an den Voranmeldedetektoren aufsummiert (mit einem Grenzwert von 60 Minuten). Die Verteilung dieser Analyse ist in Abbildung 54 abgebildet.

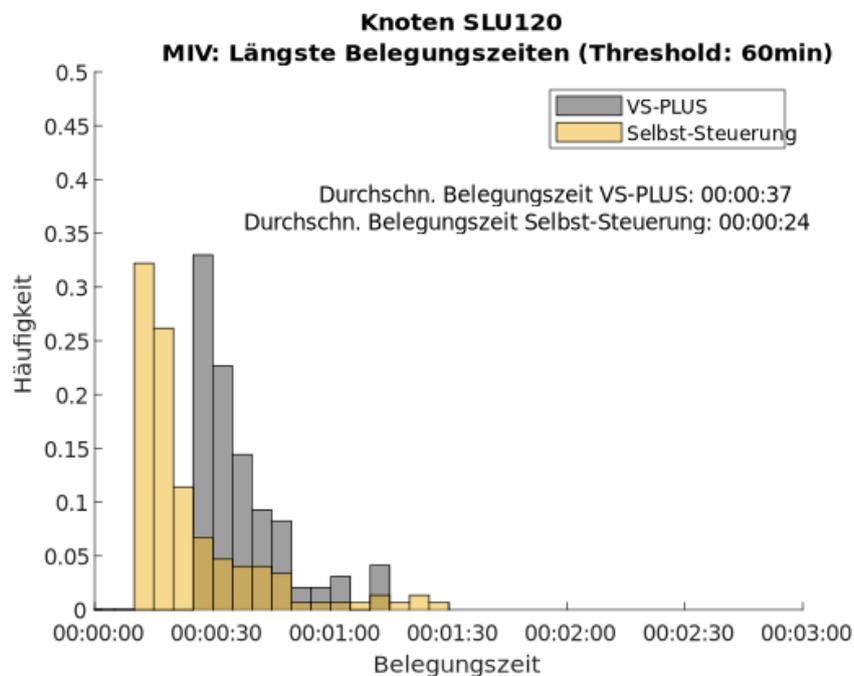


Abbildung 54: Belegungszeiten der Voranmeldedetektoren am Knoten SLU120 aggregiert auf eine Stunde Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Die Verteilung zeigt, dass durch die Selbst-Steuerung weitaus geringere Extremwerte von «langen» Belegungszeiten erreicht werden können. Die Häufigkeit erhöht sich im Zeitbereich von 15 Sekunden – 25 Sekunden signifikant. Zudem zeigen sich Belegungszeiten, welche mit der Steuerung VS-PLUS auftreten (30 Sekunden und grösser) weitaus weniger häufig. Dieser Verschiebung der Verteilung lässt sich mit den durchschnittlichen längsten Belegungszeiten untermauern, welche 37 Sekunden für die Steuerung VS-PLUS und 24 Sekunden für die Selbst-Steuerung betragen.

Wie im Kapitel der Methodik beschrieben, werden die Zeitlücken für die Analyse von harten Grünabbrüchen herangezogen. Es werden hier die Wochentage getrennt analysiert als auch die Morgenspitze, Mittagsverkehr

und Abendspitzen des Dienstages. Aufgrund der Detektoranalyse in Kapitel 4 werden die Signalgeber 4, 5 und 22 hier nicht betrachtet.

Tabelle 17 zeigt die Ergebnisse der harten Grünabbrüche für den Montag im Untersuchungszeitraum von 6:00Uhr – 23:00Uhr. Es zeigt sich, dass für die Signalgeber 1, 2, 3, 23 und 25 die Anzahl der harten Grünabbrüche signifikant reduziert werden kann. Am Signalgeber 2 ergibt die Berechnung eine Reduktion der harten Grünabbrüche von 89.13%. Jedoch ist auch ein Anstieg von harten Grünabbrüchen ersichtlich: So zeigt sich am Signalgeber 23 eine Erhöhung von 9.52%. Der Grund dafür dürfte in der Priorisierung des öffentlichen Verkehrs liegen, der bei einer Anmeldung auf der Langensandbrücke harte Grünabbrüche bei Signalgeber 23 bedingen kann.

Tabelle 17: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Montagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	219	106	-113	-51.60%
Signalgeber 2	46	5	-41	-89.13%
Signalgeber 3	41	22	-19	-46.34%
Signalgeber 23	42	46	4	9.52%
Signalgeber 24	30	19	-11	-36.67%
Signalgeber 25	270	153	-117	-43.33%
Gesamt	648	351	-297	-45.83%

Für den Dienstag zeigen sich in Tabelle 2 die aufgelisteten Ergebnisse. Die errechneten Grössen sind analog zu Tabelle 17.

Tabelle 18: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Dienstagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	244	122	-122	-50.00%
Signalgeber 2	57	33	-24	-42.11%
Signalgeber 3	45	23	-22	-48.89%
Signalgeber 23	40	58	18	45.00%
Signalgeber 24	18	16	-2	-11.11%
Signalgeber 25	286	195	-91	-31.82%
Gesamt	690	447	-243	-35.22%

Für die Ergebnisse des Dienstages zeigt sich ein ähnliches Bild für die Signalgeber 1, 2, 3, 24, und 25 (wobei die Reduktion der harten Grünabbrüche am Signalgeber 2 weitaus niedriger ist und für Signalgeber 3 erhöht) der Unterschiede wie in Tabelle 1. Der Signalgeber 23 zeigt jedoch eine Erhöhung von 45.00%.

Tabelle 19 bis Tabelle 22 zeigen die Ergebnisse der restlichen Wochentage Mittwoch bis Samstag des Knotens SLU120.

Tabelle 19: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Mittwochen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	224	161	-63	-28.13%
Signalgeber 2	53	25	-28	-52.83%
Signalgeber 3	35	23	-12	-34.29%
Signalgeber 23	54	57	3	5.56%
Signalgeber 24	28	28	0	0.00%
Signalgeber 25	309	232	-77	-24.92%
Gesamt	703	526	-177	-25.18%

Tabelle 20: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Donnerstagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	240	143	-97	-40.42%
Signalgeber 2	44	27	-17	-38.64%
Signalgeber 3	39	21	-18	-46.15%
Signalgeber 23	41	45	4	9.76%
Signalgeber 24	29	17	-12	-41.38%
Signalgeber 25	250	213	-37	-14.80%
Gesamt	643	466	-177	-27.53%

Tabelle 21: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Freitagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	237	171	-66	-27.85%
Signalgeber 2	61	97	36	59.02%
Signalgeber 3	36	41	5	13.89%
Signalgeber 23	47	37	-10	-21.28%
Signalgeber 24	28	44	16	57.14%
Signalgeber 25	289	222	-67	-23.18%
Gesamt	698	612	-86	-12.32%

Tabelle 22: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Samstagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	144	70	-74	-51.39%
Signalgeber 2	38	29	-9	-23.68%
Signalgeber 3	23	6	-17	-73.91%
Signalgeber 23	10	14	4	40.00%
Signalgeber 24	4	18	14	350.00%
Signalgeber 25	182	120	-62	-34.07%
Gesamt	401	257	-144	-35.91%

Vergleicht man nun Spitzen der Verkehrsnachfrage, kann eine Aussage darüber getroffen werden, wie die LSA-Steuerungen unter Bedingungen arbeiten, wo eine potenzielle Sättigung von Verkehrsströmen eintritt. Dafür wurden hier die Daten der Dienstage (für VS-PLUS und Selbst-Steuerung) herangezogen. Dabei wird eine Morgenspitze von 7:00 Uhr – 9:30 Uhr, der Mittagsverkehr von 11:00 Uhr – 13:00 Uhr und eine Abendspitze von 16:00 Uhr – 18:30 Uhr analysiert. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 23 bis Tabelle 25.

Tabelle 23: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Morgenspitzen, dienstags, 7:00 Uhr – 9:30 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	45	22	-23	-51.11%
Signalgeber 2	10	5	-5	-50.00%
Signalgeber 3	23	9	-14	-60.87%
Signalgeber 23	8	6	-2	-25.00%
Signalgeber 24	2	2	0	0.00%
Signalgeber 25	59	42	-17	-28.81%
Gesamt	147	86	-61	-41.50%

Tabelle 24: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung im Mittagsverkehr, dienstags, 11:00 Uhr – 13:00 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	25	12	-13	-52.00%
Signalgeber 2	5	2	-3	-60.00%
Signalgeber 3	1	2	1	100.00%
Signalgeber 23	3	6	3	100.00%
Signalgeber 24	1	2	1	100.00%
Signalgeber 25	26	18	-8	-30.77%
Gesamt	61	42	-19	-31.15%

Tabelle 25: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Abendspitzen, dienstags, 16:00 Uhr – 18:30 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	79	40	-39	-49.37%
Signalgeber 2	24	7	-17	-70.83%
Signalgeber 3	9	7	-2	-22.22%
Signalgeber 23	15	17	2	13.33%
Signalgeber 24	3	3	0	0.00%
Signalgeber 25	69	48	-21	-30.43%
Gesamt	199	122	-77	-38.69%

Die Ergebnisse der Morgenspitze, Mittagsverkehr und Abendspitze zeigen für die Signalgeber 1 – 3 und 25 jeweils eine signifikante Verbesserung der harten Grünabbrüche (ausgenommen Signalgeber 3 um die Mittagszeit, wo eine Erhöhung von 100% verzeichnet wird). Die Ergebnisse an den Signalgebern 23 und 24 zeigen in den Spitzenzeiten eine Erhöhung der harten Grünabbrüche im Bereich von 20% bis hin zu 100%. Eine Ausnahme stellt hier der Signalgeber 23 dar, der in der Morgenspitze zumindest eine Reduktion der harten Grünabbrüche von 25% aufweist.

Berechnet man nun die Zielgrößen über den Messzeitraum Montag bis Freitag, so zeigt sich, dass die Selbst-Steuerung am Signalgeber 1, 2, 3, 24 und 25 eine signifikante Reduktion der harten Grünabbrüche herbeiführen kann. Für Signalgeber 23 ergibt sich eine Erhöhung der harten Grünabbrüche durch die Selbst-Steuerung (8.48%). Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 26.

Tabelle 26: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung der jeweiligen Messzeiträume von Montag bis Freitag.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	1164	703	-461	-39.60%
Signalgeber 2	261	187	-74	-28.35%
Signalgeber 3	196	130	-66	-33.67%
Signalgeber 23	224	243	19	8.48%
Signalgeber 24	133	124	-9	-6.77%
Signalgeber 25	1404	1015	-389	-27.71%
Gesamt	3382	2402	-980	-28.98%

9.2 Knoten SLU121

Am Knoten SLU121 wurden 4 Einfluss-Ausfluss-System für die Bestimmung der Warte-, Belegungszeit und der Zeitlücken definiert. Es werden wiederum die Detektoren zur Voranmeldung für die Bestimmung des Einflusses und die Querschleifen nach der Haltelinie für den Ausfluss verwendet. Wie zuvor werden zuerst die Ergebnisse der Wochentage Montag, Dienstag und Samstag vorgestellt (Abbildung 55, Abbildung 56 und Abbildung 57). Die restlichen Wochentage finden sich im Anhang.

Analysiert man die Ergebnisse der vorgestellten Wochentage, so zeigt sich, dass durch die Selbst-Steuerung die Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten signifikant nach links verschoben werden kann. Die Häufigkeit von Wartezeiten zwischen 0 und 10 Sekunden erhöht sich signifikant. Zudem treten Wartezeiten mit einem Wert grösser 60 Sekunden nur mit sehr geringer Häufigkeit auf. Im Gegensatz zeigt sich durch die Steuerung VS-PLUS hier eine grössere Häufigkeit. Die durchschnittlichen Wartezeiten für den MIV am Knoten SLU121 können am Montag von 34 Sekunden (VS-PLUS) auf 20 Sekunden (Selbst-Steuerung), am Dienstag von 43 Sekunden (VS-PLUS) auf 25 Sekunden (Selbst-Steuerung) und am Samstag von 28 Sekunden (VS-PLUS) auf 17 Sekunden (Selbst-Steuerung) reduziert werden. Die Durchschnittswerte aller Wochentage mit dem prozentuellen Unterschied sind in Tabelle 27 gegenübergestellt.

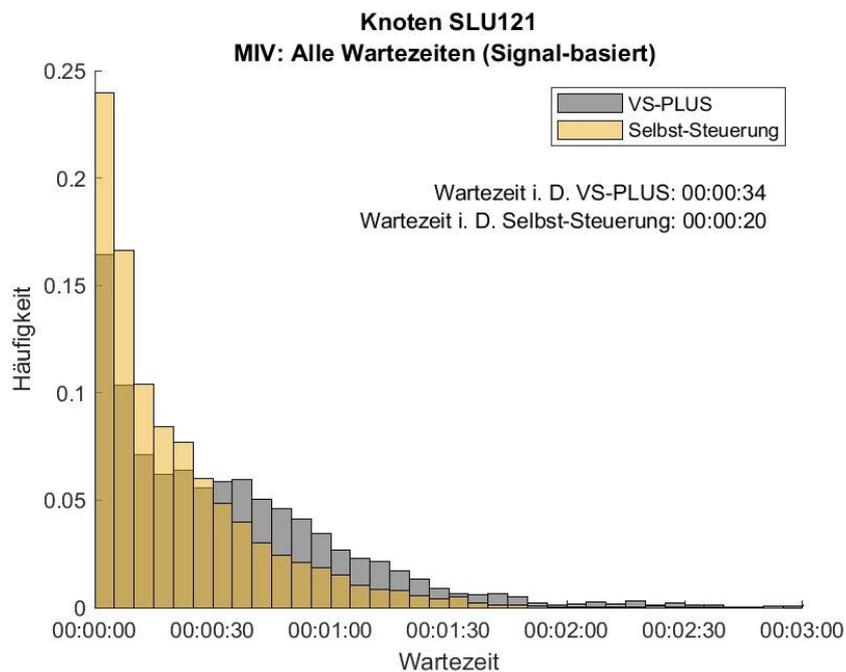


Abbildung 55: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Montag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

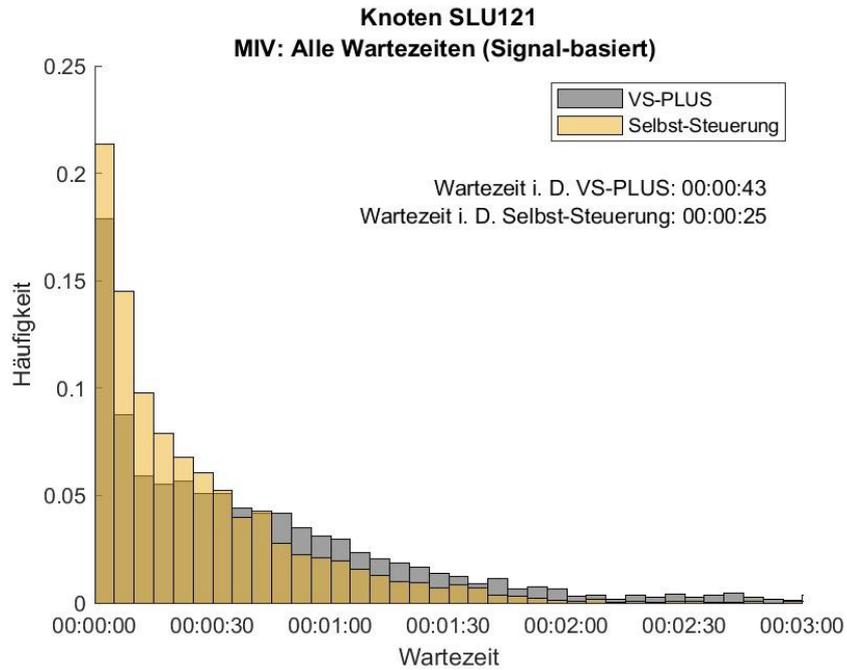


Abbildung 56: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Dienstag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

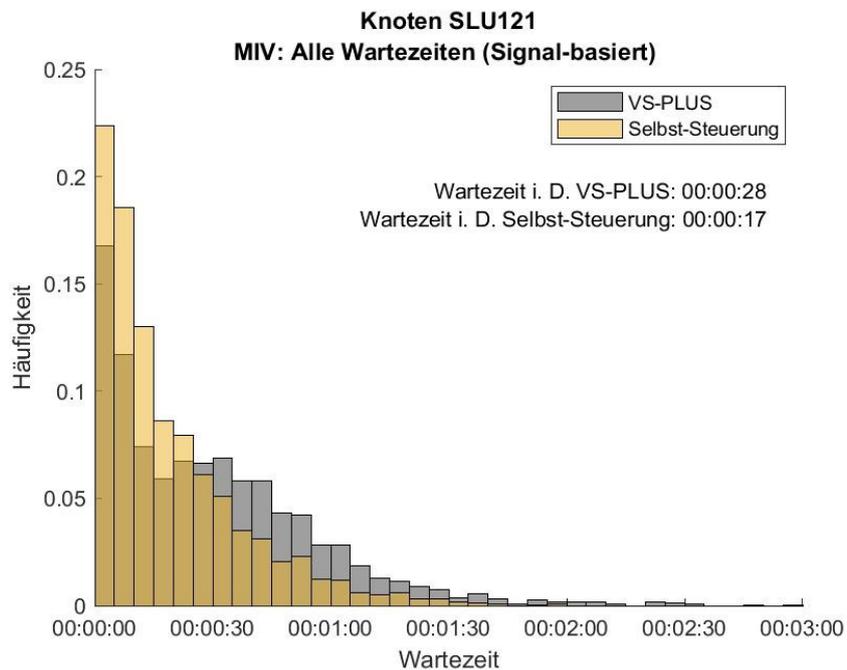


Abbildung 57: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Samstag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Die Ergebnisse für die Morgen-, Mittags- und Abendspitze sind für den MIV am Knoten SLU121 in Abbildung 58, Abbildung 59 und Abbildung 60 dargestellt.

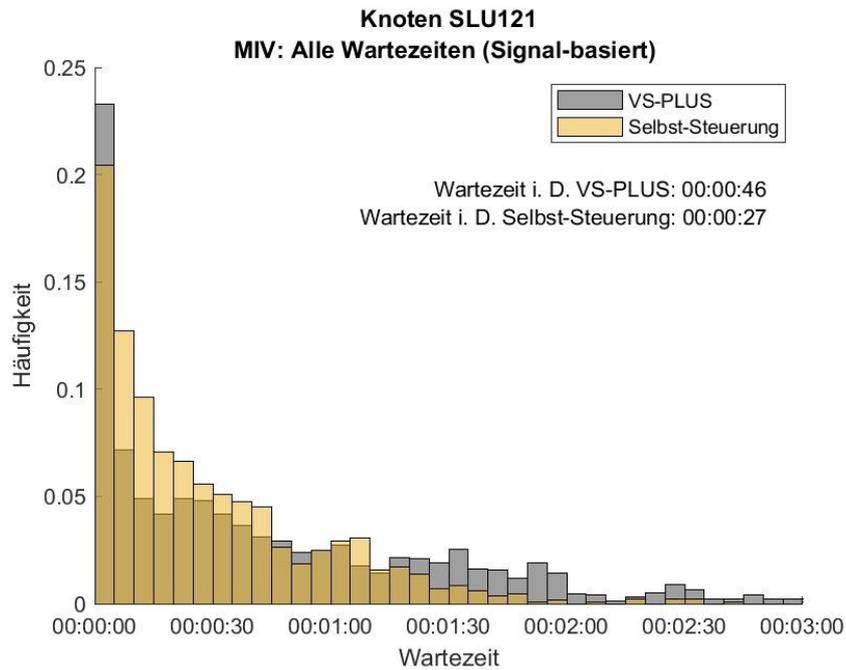


Abbildung 58: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

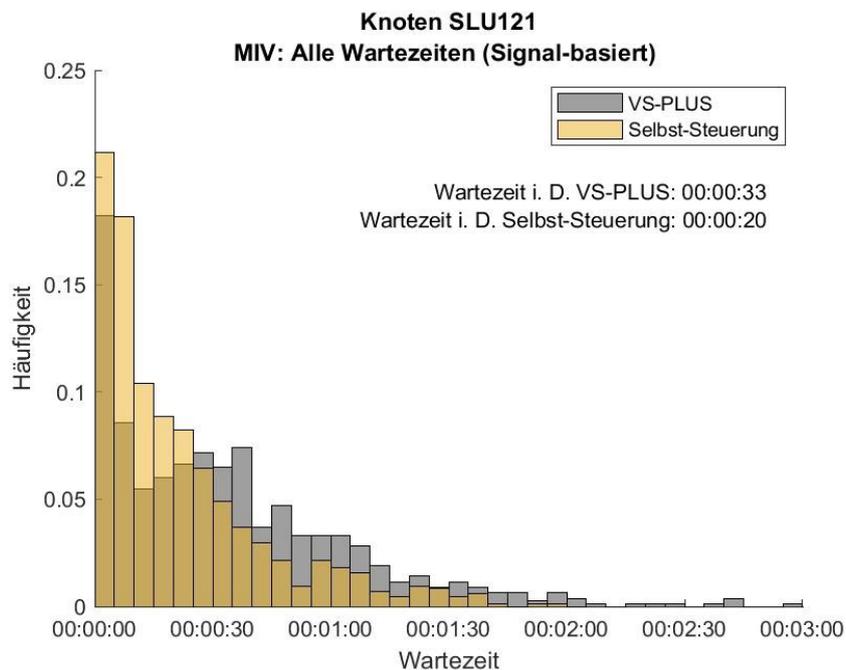


Abbildung 59: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV des Mittagsverkehr dienstags, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

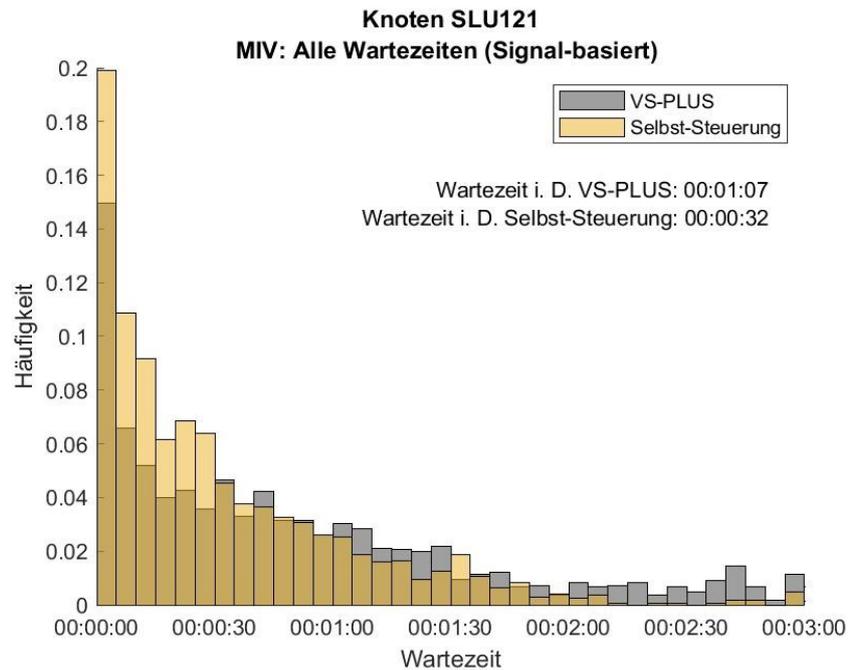


Abbildung 60: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Es zeigt sich auch in den Spitzenzeiten eine erhebliche Verbesserung durch die Selbst-Steuerung. In der Morgenspitze kann die durchschnittliche Wartezeit von 46 Sekunden mit der LSA-Steuerung VS-PLUS auf 27 Sekunden durch die Selbst-Steuerung reduziert werden. Im Mittagsverkehr ergibt sich die Reduktion von 33 Sekunden (VS-PLUS) auf 20 Sekunden (Selbst-Steuerung). In der Abendspitze treten generell weitaus höhere Wartezeiten auf. Die Selbst-Steuerung erhöht auch hier die Häufigkeit der Wartezeiten zwischen 0 Sekunden und 5 Sekunden signifikant. Im Mittel kann die Wartezeit für den MIV von 67 Sekunden (VS-PLUS) auf 32 Sekunden mit der Selbst-Steuerung reduziert werden.

Betrachtet man die Ergebnisse der Wartezeiten für den gesamten Messzeitraum so ergibt sich eine Reduktion der mittleren Wartezeit von 37 Sekunden (VS-PLUS) auf 23 Sekunden (Selbst-Steuerung).

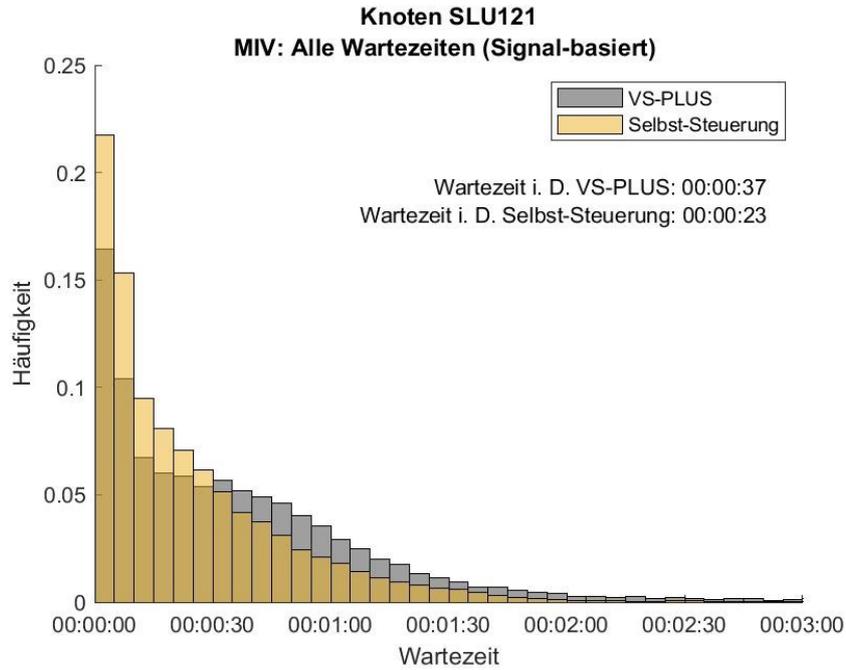


Abbildung 61: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV über den gesamten Messzeitraum, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

In Tabelle 27 sind die mittleren Wartezeiten mit deren prozentuellen Unterschied nochmals zusammengestellt. An den Wochentagen Montag bis Samstag kann eine Reduktion der Wartezeit zwischen 28.13% und 41.86% durch die Selbst-Steuerung herbeigeführt werden. In den Spitzenzeiten liegt die Verbesserung zwischen 39.39% und 52.24%. Über den gesamten Messzeitraum aggregiert ergibt sich am Knoten SLU121 eine Reduktion der Wartezeiten für den MIV von 37.84% im Durchschnitt.

Tabelle 27: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für den MIV am Knoten SLU121 der betrachteten Zeiträume.

Zeitraum	Wartezeit i. D. – VS-PLUS [s]	Wartezeit i. D. – Selbst-Steuerung [s]	Unterschied absolut [s]	Unterschied relativ [%]
Montag	34	20	-14	-41.18%
Dienstag	43	25	-18	-41.86%
Mittwoch	38	26	-12	-31.58%
Donnerstag	32	23	-9	-28.13%
Freitag	35	22	-13	-37.14%
Samstag	28	17	-11	-39.29%
Dienstag – Morgenspitze	46	27	-19	-41.30%
Dienstag – Mittagsverkehr	33	20	-13	-39.39%
Dienstag - Abendspitze	67	32	-35	-52.24%
Montag - Freitag	37	23	-14	-37.84%
Gesamt	37	23	-14	-37.84%

Die Analyse der einzelnen Signalgeber am Knoten SLU121 für die Morgen- und Abendspitze des Dienstag als auch für den gesamten Messzeitraum ist in Tabelle 28 zusammengestellt. Es zeigt sich, dass durch die Selbst-Steuerung in allen betrachteten Zeiträumen an allen Signalgebern eine Verbesserung der durchschnittlichen Wartezeit erreicht werden kann. Die Reduktionen bewegen sich am Signalgeber 2, 3, 4 und 5 im Bereich zwischen jeweils 17.24% und 50.00%; 33.33% und 50.00%, was respektive 5, 29, 12 und 8 Sekunden entspricht.

Tabelle 28: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten für die einzelnen Signalgeber des MIVs am Knoten SLU121 der Morgen- (MS) und Abendspitze (AS) des Dienstag und für den gesamten Messzeitraum.

		Dienstag - MS	Dienstag - AS	Gesamt
Signalgeber	Steuerung	Wartezeit i. D. [s]	Wartezeit i. D. [s]	Wartezeit i. D. [s]
2	VS-PLUS	41	33	29
	Selbst-Steuerung	31	27	24
	Unterschied absolut [-]	-10	-6	-5
	Unterschied relativ [%]	-24.39%	-18.18%	-17.24%
3	VS-PLUS	84	120	58
	Selbst-Steuerung	27	49	29
	Unterschied absolut [-]	-57	-71	-29
	Unterschied relativ [%]	-67.86%	-59.17%	-50.00%
4	VS-PLUS	49	84	36
	Selbst-Steuerung	29	30	24
	Unterschied absolut [-]	-20	-54	-12
	Unterschied relativ [%]	-40.82%	-64.29%	-33.33%
5	VS-PLUS	22	20	16
	Selbst-Steuerung	12	11	8
	Unterschied absolut [-]	-10	-9	-8
	Unterschied relativ [%]	-45.45%	-45.00%	-50.00%

Um die Qualität der LSA-Steuerung detaillierter beurteilen zu können, werden im Folgenden für den gesamten Messzeitraum die Belegungszeiten der Langschlaufen (beim Signalstatus Rot) und der Voranmeldedetektoren analysiert. Abbildung 62 und Abbildung 63 zeigen die jeweiligen Häufigkeitsverteilungen im Vergleich.

Die Belegungszeiten der Langschlaufen vor den Haltelinien zeigen auf, dass durch die Selbst-Steuerung die Häufigkeit kurzer Belegungszeiten erhöht wird (im Vergleich zu VS-PLUS). Folglich werden längere Belegungszeiten im Bereich von 60 Sekunden bis 120 Sekunden vermieden und die Häufigkeit dieser sinkt. Betrachtet man die relative Gesamtbelegungsdauer der Langschlaufen über den Messzeitraum, so verringert sich diese durch die Selbst-Steuerung von 21.20% (VS-PLUS) auf 18.30%.

Betrachtet man die Belegungszeiten der Voranmeldeschlaufen, so zeigt sich ein ähnliches Bild. Die relative Gesamtbelegungsdauer reduziert sich durch den Einsatz der Selbst-Steuerung von 2.25% auf 1.03%. Da die Voranmeldeschlaufen auch ein Indikator für potenzielle Staubildungen sind, wurden in Abbildung 64 abermals die längsten Belegungsauern über einen Untersuchungszeitraum von einer Stunde aufsummiert. Es kann wie am Knoten SLU120 eine klare Verschiebung der Häufigkeitsverteilung hinzu kürzeren Belegungszeiten aufzeigt werden. Die durchschnittliche Belegungsdauer von VS-PLUS von 1 Minute und 35 Sekunden kann durch die Selbst-Steuerung auf 1 Minute und 18 Sekunden signifikant reduziert werden.

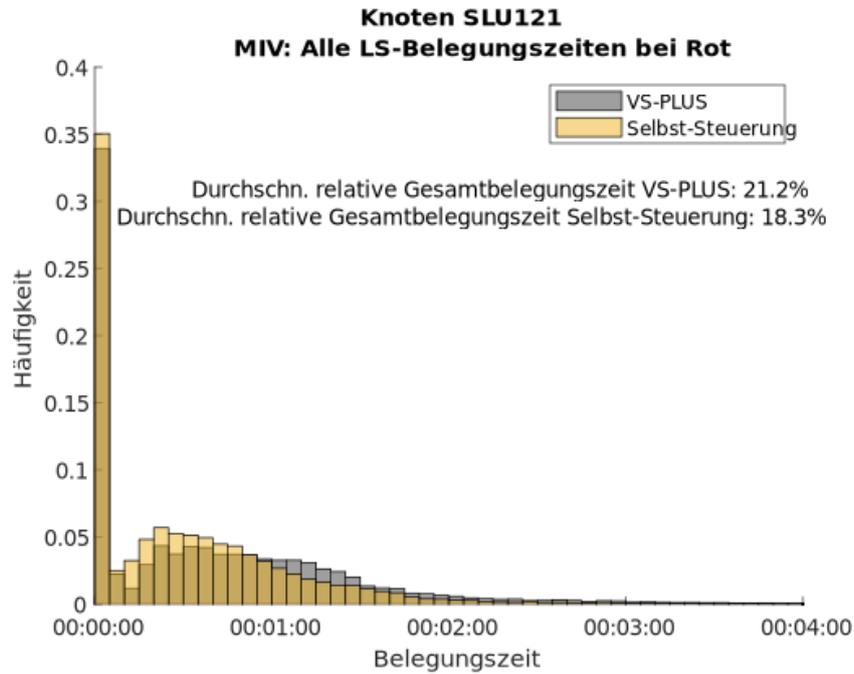


Abbildung 62: Belegungszeiten der Langschlaufendetektoren am Knoten SLU121 aggregiert über den gesamten Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

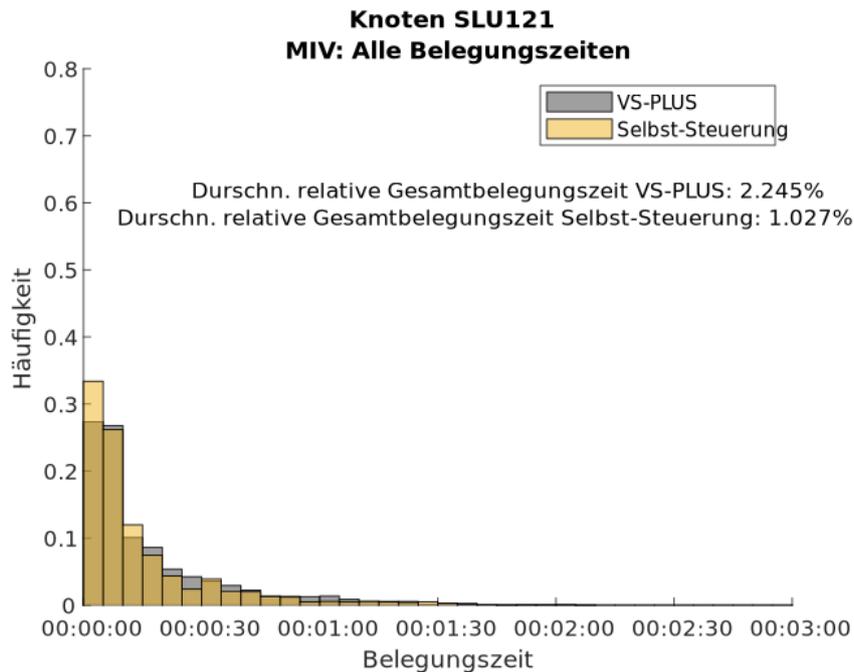


Abbildung 63: Belegungszeiten der Voranmeldedetektoren am Knoten SLU121 aggregiert über den gesamten Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

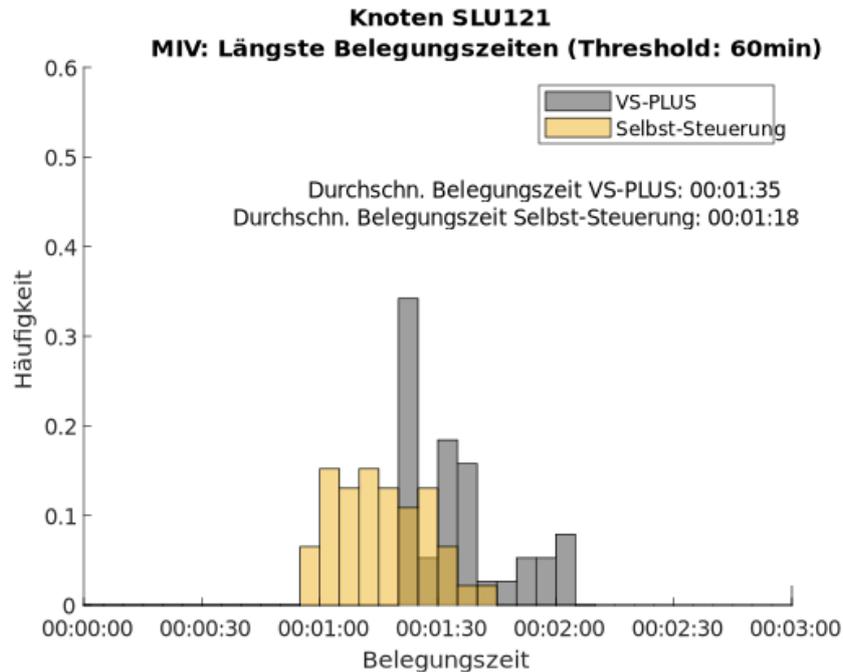


Abbildung 64: Belegungszeiten der Voranmeldedetektoren am Knoten SLU121 aggregiert auf eine Stunde Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Wie im Kapitel der Methodik beschrieben, werden die Zeitlücken für die Analyse von harten Grünabbrüchen herangezogen. Es werden hier die Wochentage getrennt analysiert als auch die Morgenspitze, Mittagsverkehr und Abendspitzen des Dienstages.

Tabelle 29 zeigt die Ergebnisse der harten Grünabbrüche und Grünabbrüche für den Montag im Untersuchungszeitraum von 6:00Uhr – 23:00Uhr. Es zeigt sich, dass für die Signalgeber 1, 3, 5, 6 und 7 die Anzahl der harten Grünabbrüche signifikant reduziert werden kann. Am Signalgeber 3 reduzieren sich die harten Grünabbrüche von einer Anzahl von 147 (VS-PLUS) auf 69 (Selbst-Steuerung), was einer Reduktion von 53,06% entspricht. Am Signalgeber 1 ergibt diese Berechnung eine Reduktion von 46,75%. Jedoch sind auch Anstiege von harten Grünabbrüche ersichtlich: So zeigt sich am Signalgeber 2 und 4 eine Erhöhung von 26,83% und 3,85%. Der Grund dafür dürfte wiederum an der Priorisierung des öffentlichen Verkehrs an der Hauptachse liegen, der bei einer Anmeldung harte Grünabbrüche bei Signalgeber 2 und 4 bedingt. Interessanterweise können jedoch die harten Grünabbrüche an Signalgeber 3, welcher ebenfalls nicht an der Hauptachse verbaut ist, um die genannte Anzahl an harten Grünabbrüchen verringert werden.

Tabelle 29: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Montagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	154	82	-72	-46.75%
Signalgeber 2	41	52	11	26.83%
Signalgeber 3	147	69	-78	-53.06%
Signalgeber 4	52	54	2	3.85%
Signalgeber 5	58	24	-34	-58.62%
Signalgeber 6	176	123	-53	-30.11%
Signalgeber 7	99	63	-36	-36.36%
Gesamt	727	467	-260	-35.76%

Tabelle 30: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Dienstagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	166	94	-72	-43.37%
Signalgeber 2	53	57	4	7.55%
Signalgeber 3	185	90	-95	-51.35%
Signalgeber 4	107	76	-31	-28.97%
Signalgeber 5	67	31	-36	-53.73%
Signalgeber 6	226	186	-40	-17.70%
Signalgeber 7	118	145	27	22.88%
Gesamt	922	679	-243	-26.36%

Für die Ergebnisse des Dienstages (Tabelle 30) zeigt sich ein ähnliches Bild für die Signalgeber 1, 3, 5, 6 der Unterschiede wie in Tabelle 1 (Verbesserungen von 43.37%, 51.35%, 53.73% und 17.70%). Für Signalgeber 4 kann an diesem Tag eine Verbesserung der harten Grünabbrüche verzeichnet werden, zum Vergleich des Montages (28.97%). Am Signalgeber 7 ist jedoch eine Verschlechterung der Grünabbrüche zu verzeichnen (22.88%), wobei die Auswertung der Montage ein gegensätzliches Bild zeigte.

Tabelle 31 bis Tabelle 34 zeigen die Ergebnisse der restlichen Wochentage Mittwoch bis Samstag des Knotens SLU121.

Tabelle 31: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Mittwochen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	150	97	-53	-35.33%
Signalgeber 2	54	64	10	18.52%
Signalgeber 3	190	94	-96	-50.53%
Signalgeber 4	72	77	5	6.94%
Signalgeber 5	71	42	-29	-40.85%
Signalgeber 6	201	211	10	4.98%
Signalgeber 7	120	152	32	26.67%
Gesamt	858	737	-121	-14.10%

Tabelle 32: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Donnerstagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	143	82	-61	-42.66%
Signalgeber 2	47	53	6	12.77%
Signalgeber 3	148	69	-79	-53.38%
Signalgeber 4	70	64	-6	-8.57%
Signalgeber 5	80	36	-44	-55.00%
Signalgeber 6	208	214	6	2.88%
Signalgeber 7	110	136	26	23.64%
Gesamt	806	654	-152	-18.86%

Tabelle 33: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Freitagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	137	79	-58	-42.34%
Signalgeber 2	48	55	7	14.58%
Signalgeber 3	144	84	-60	-41.67%
Signalgeber 4	81	56	-25	-30.86%
Signalgeber 5	68	38	-30	-44.12%
Signalgeber 6	201	198	-3	-1.49%
Signalgeber 7	125	135	10	8.00%
Gesamt	804	645	-159	-19.78%

Tabelle 34: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Samstagen, 6:00 Uhr – 23:00 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	82	35	-47	-57.32%
Signalgeber 2	20	17	-3	-15.00%
Signalgeber 3	52	26	-26	-50.00%
Signalgeber 4	33	27	-6	-18.18%
Signalgeber 5	32	15	-17	-53.13%
Signalgeber 6	92	78	-14	-15.22%
Signalgeber 7	43	43	0	0.00%
Gesamt	354	241	-113	-31.92%

Vergleicht man nun Spitzen der Verkehrsnachfrage, kann eine Aussage darüber getroffen werden, wie die LSA-Steuerungen unter Bedingungen arbeiten, wo eine potenzielle Sättigung von Verkehrsströmen eintritt. Dafür wurden hier die Daten der Dienstage (für VS-PLUS und Selbst-Steuerung) herangezogen. Dabei wird eine Morgenspitze von 7:00 Uhr – 9:30 Uhr, der Mittagsverkehr von 11:00 Uhr – 13:00 Uhr und eine Abendspitze von 16:00 Uhr – 18:30 Uhr analysiert. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 35 bis Tabelle 37.

Tabelle 35: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Morgenspitzen, dienstags, 7:00 Uhr – 9:30 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	33	20	-13	-39.39%
Signalgeber 2	21	18	-3	-14.29%
Signalgeber 3	42	12	-30	-71.43%
Signalgeber 4	11	8	-3	-27.27%
Signalgeber 5	18	3	-15	-83.33%
Signalgeber 6	50	36	-14	-28.00%
Signalgeber 7	38	51	13	34.21%
Gesamt	213	148	-65	-30.52%

Tabelle 36: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung im Mittagsverkehr, dienstags, 11:00 Uhr – 13:00 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	11	8	-3	-27.27%
Signalgeber 2	3	2	-1	-33.33%
Signalgeber 3	13	8	-5	-38.46%
Signalgeber 4	12	6	-6	-50.00%
Signalgeber 5	8	2	-6	-75.00%
Signalgeber 6	26	22	-4	-15.38%
Signalgeber 7	6	15	9	150.00%
Gesamt	79	63	-16	-20.25%

Tabelle 37: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung an den beiden Abendspitzen, dienstags, 16:00 Uhr – 18:30 Uhr.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	50	27	-23	-46.00%
Signalgeber 2	3	11	8	266.67%
Signalgeber 3	80	32	-48	-60.00%
Signalgeber 4	55	32	-23	-41.82%
Signalgeber 5	19	9	-10	-52.63%
Signalgeber 6	75	69	-6	-8.00%
Signalgeber 7	42	28	-14	-33.33%
Gesamt	324	208	-116	-35.80%

Die harten Grünabbrüche am Knoten SLU121 können durch die Selbst-Steuerung an den Signalgebern 1 bis 6 in der Morgenspitze, dem Mittagsverkehr und der Abendspitze signifikant reduziert werden. Eine Ausnahme stellt hier nur der Signalgeber 2 in der Abendspitze dar, wo eine signifikante Erhöhung der harten Grünabbrüche von 3 (VS-PLUS) auf 11 (Selbst-Steuerung) zu erkennen ist. In der Morgenspitze können Verbesserung zwischen 14.29% und 83.33% erreicht werden; im Mittagsverkehr zwischen 15.38% und 75.00%; in der Abendspitze zwischen 8.00% und 60.00%. Interessant ist zudem, dass am Signalgeber 7 nur in der Abendspitze eine Verbesserung zu erwarten ist, in der Morgenspitze und im Mittagsverkehr erhöhen sich die harten Grünabbrüche durch die Selbst-Steuerung jedoch.

Berechnet man nun die Zielgrößen über den Messzeitraum von Montag bis Freitag (Tabelle 38), so zeigt sich, dass die Selbst-Steuerung am Signalgeber 1, 3, 4, 5 und 6 eine signifikante Reduktion der harten Grünabbrüche herbeiführen kann. Für Signalgeber 2 und 7 ergeben sich eine Erhöhung der harten Grünabbrüche durch die Selbst-Steuerung (10.31% und 15.64%).

Tabelle 38: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung der jeweiligen Messzeiträume von Montag bis Freitag.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
Signalgeber 1	750	434	-316	-42.13%
Signalgeber 2	243	281	38	15.64%
Signalgeber 3	814	406	-408	-50.12%
Signalgeber 4	382	327	-55	-14.40%
Signalgeber 5	344	171	-173	-50.29%
Signalgeber 6	1012	932	-80	-7.91%
Signalgeber 7	572	631	59	10.31%
Gesamt	4117	3182	-935	-22.71%

10 Resultate für das gesamte Untersuchungsgebiet

Um ein finales Conclusio der Wirkungsanalyse abzugeben, sollen die behandelten Grössen für alle Verkehrsmittel auf das gesamte Untersuchungsgebiet aggregiert werden. Dabei werden die Daten vom Knoten SLU120 und SLU121 über den gesamten Messzeitraum zusammen betrachtet.

10.1 FussgängerInnenverkehr

Für den FV wurden die Wartezeiten an den beiden Knoten untersucht und für die definierten Zeiträume als auch gegebenen Signalgeber dargestellt. Als finales Ergebnis konnte am SLU120 eine signifikante Reduktion der Wartezeit durch die Selbst-Steuerung von 9 Sekunden (VS-PLUS: 31 Sekunden; Selbst-Steuerung 22 Sekunden) und eine geringe Reduktion am SLU121 von 1 Sekunde (VS-PLUS: 35 Sekunden; Selbst-Steuerung 34 Sekunden) gezeigt werden. Aggregiert man nun die beiden Knoten kann final die in Abbildung 65 gezeigte Häufigkeitsverteilung berechnet werden.

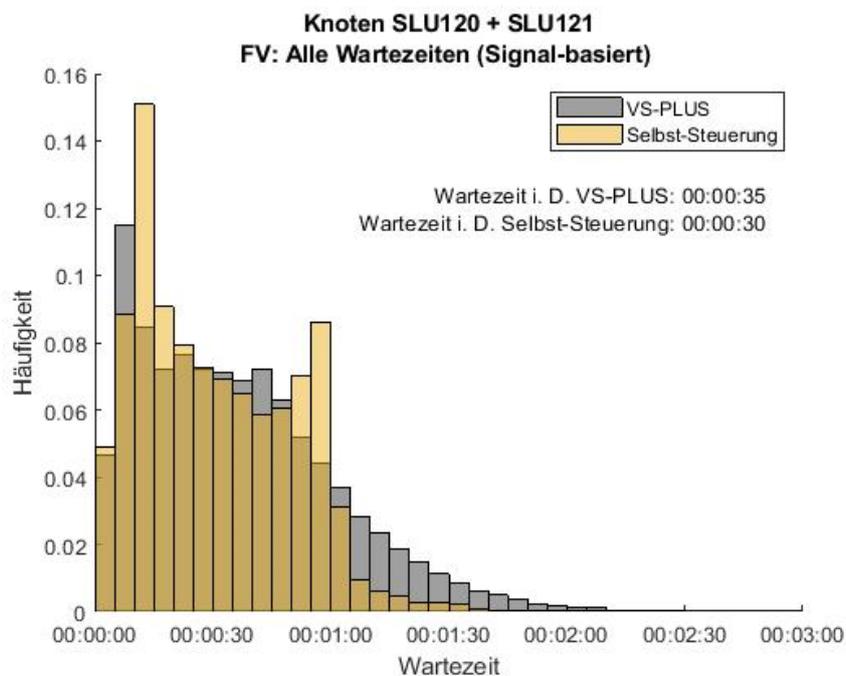


Abbildung 65: Aggregierte Wartezeiten für den FV am Knoten SLU120 und SLU121 über den gesamten Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Die aggregierten Resultate zeigen, dass durch die Selbst-Steuerung vor allem hohe Wartezeiten (grösser 60 Sekunden) nahezu eliminiert werden können und damit die Verkehrsqualität für den FV im Untersuchungsgebiet signifikant verbessert werden kann. Im Durchschnitt verringert sich die Wartezeit von 35 Sekunden (VS-PLUS) auf 30 Sekunden (Selbst-Steuerung). Das entspricht einer Reduktion der Wartezeit von 5 Sekunden oder 14.29%.

10.2 Öffentlicher Verkehr

Auch für den öffentlichen Verkehr wurden die Ergebnisse der Wartezeiten untersucht und für die Knoten SLU120 und SLU121 getrennt dargestellt. Um ein finales Ergebnis für das gesamte Untersuchungsgebiet darzustellen, wurden auch hier die Wartezeiten aggregiert. Abbildung 66 stellt die Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV dar.

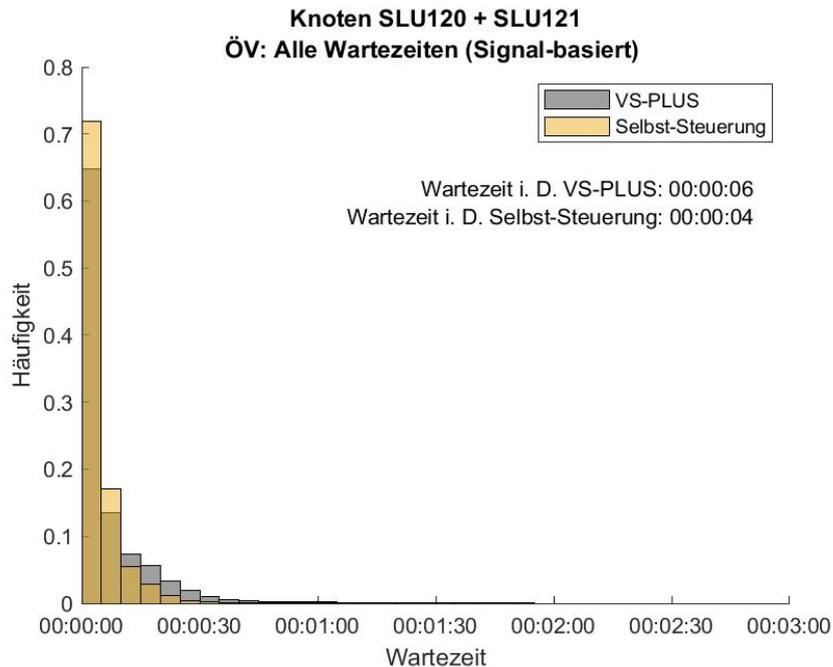


Abbildung 66: Aggregierte Wartezeiten für den ÖV am Knoten SLU120 und SLU121 über den gesamten Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Im gesamten Untersuchungsgebiet wird die Wartezeit für den ÖV von 6 Sekunden (VS-PLUS) auf 4 Sekunden (Selbst-Steuerung) verringert, was einer Reduktion von 2 Sekunden bzw. 33.33% entspricht. Im Vergleich dazu ergab der Vergleich der Steuerungen am SLU120 und SLU121 4 Sekunden und 12 Sekunden für VS-PLUS und 3 und 6 Sekunden für die Selbst-Steuerung.

10.3 Motorisierter Individualverkehr

Final werden die abgeleiteten Wartezeiten für den MIV am Knoten SLU120 und SLU121 auf das gesamte Untersuchungsgebiet aggregiert. Die Häufigkeitsverteilung ist in Abbildung 67 dargestellt. Es zeigt sich eine Reduktion der mittleren Wartezeit von 35 Sekunden mit der Steuerung VS-PLUS auf 27 Sekunden mittels des Einsatzes der Selbst-Steuerung.

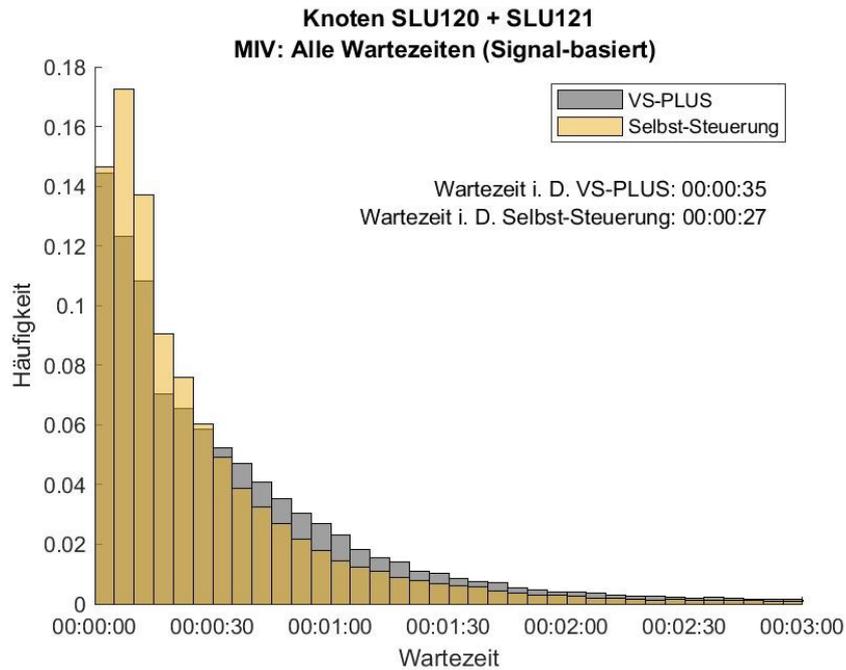


Abbildung 67: Aggregierte Wartezeiten für den MIV am Knoten SLU120 und SLU121 über den gesamten Messzeitraum. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

Für die Belegungszeiten werden final die kumulierten längsten Belegungen mit einem Grenzwert von 60 Minuten vorgestellt. Es konnte auf den einzelnen Knoten schon gezeigt werden, dass die Selbst-Steuerung hier eine Verbesserung für Staubildungen herbeiführt. Das aggregierte Resultat für das gesamte Untersuchungsgebiet findet sich in Abbildung 68.

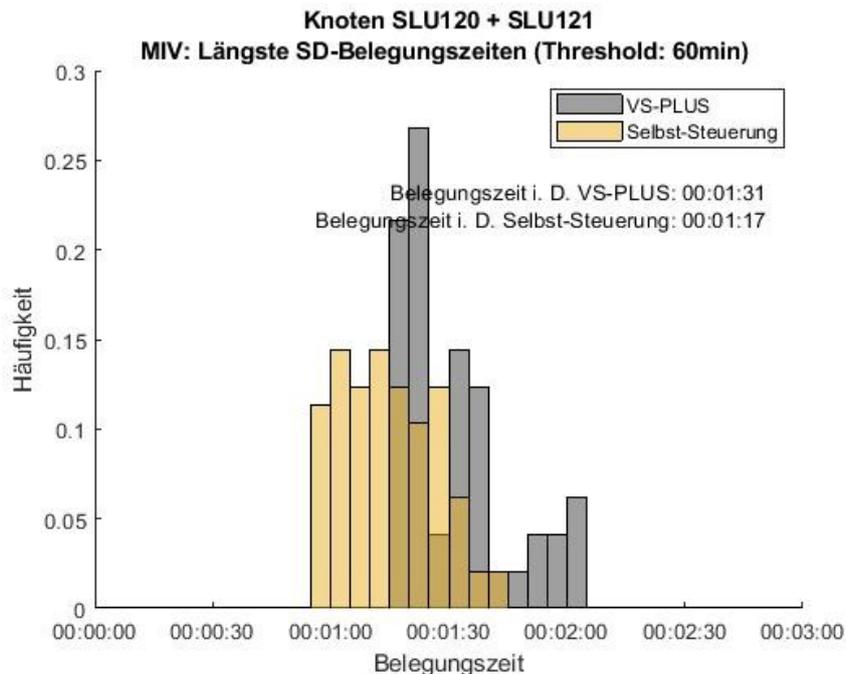


Abbildung 68: Längste Belegungszeiten (Grenzwert 60 Minuten) für das gesamte Untersuchungsgebiet.

Das finale Ergebnis zeigt, dass die längsten Belegungszeiten von einer mittleren Zeitdauer von 91 Sekunden auf 77 Sekunden reduziert werden können. Das entspricht einer Reduktion von 14 Sekunden oder 15,38%.

Die harten Grünabbrüche konnten durch die Selbst-Steuerung sowohl am SLU120 als auch am SLU121 signifikant reduziert werden. Aggregiert man die Anzahl von harten Grünabbrüchen für das gesamte Untersuchungsgebiet, so ergeben sich die in Tabelle 39 vorgestellten Ergebnisse.

Tabelle 39: Vergleich der harten Grünabbrüche für VS-PLUS und die Selbst-Steuerung der jeweiligen Messzeiträume für das gesamte Untersuchungsgebiet.

	VS-PLUS Harte Grünabbrüche	Selbst-Steuerung Harte Grünabbrüche	Unterschied absolut [-]	Unterschied relativ [%]
SLU120	3382	2402	-980	-28,98%
SLU121	4117	3182	-935	-22,71%
Gesamt	7499	5584	-1915	-25,54%

Die harten Grünabbrüche können durch die Selbst-Steuerung im Untersuchungsgebiet um 25,54% - entspricht 1915 harten Grünabbrüchen – reduziert werden.

Final kann das Conclusio abgegeben werden, dass die aggregierten Ergebnisse für das gesamte Untersuchungsgebiet zeigen, dass durch die Selbst-Steuerung eine wesentliche Verbesserung der Verkehrsqualität für den FV, ÖV und MIV erreicht werden kann.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge dieses Forschungsprojektes wurden zwei LSA-Steuerungen in einem Untersuchungsgebiet in der Stadt Luzern untersucht. Dabei wurde die bestehende Steuerung (VS-PLUS) mit der neuartigen Selbst-Steuerung für den FV, den ÖV und MIV mit verschiedenen Analysen verglichen. Basis dafür stellte ein Datensatz mit Detektor- und LSA-Daten von zwei Wochen dar. Vorerst wurde der Datensatz aufbereitet und auf potenzielle Datenfehler und Ausreisser überprüft. Folglich wurde die Verkehrsnachfrage analysiert, um die Vergleichbarkeit der Testwochen zu überprüfen. Es zeigt sich, dass der Zusammenhang der Verkehrsstundenwerte der zwei Testwochen nahezu linear ist, was auf eine sehr ähnliche Verkehrsnachfrage schliessen lässt. Die Ergebnisse der durchgeführten linearen Regression unterstützten diese These.

Folglich wurden die Verkehrsmodi getrennt mit den passenden Metriken untersucht. Für den FV wurde die Wartezeit bestimmt. Hier zeigen die aggregierten Resultate, dass die Selbst-Steuerung am Knoten SLU120 zu einer Reduktion der Wartezeit von 9 Sekunden (29.03%) führt. Alle analysierten Wochentage und Signalgeber zeigen eine signifikante Reduktion der Wartezeit. Am Knoten SLU121 zeigt sich aggregiert eine Reduktion der Wartezeit von 1 Sekunde 2.86%. An beiden Knoten kann auch eine signifikante Reduzierung von Wartezeiten grösser als 60 bzw. 90 Sekunden erreicht werden. Eine Aggregation der Ergebnisse auf das gesamte Untersuchungsgebiet zeigt eine durchschnittliche Verbesserung der Wartezeit für den FV von 5 Sekunden durch den Einsatz der Selbst-Steuerung.

Bei den Untersuchungen für den ÖV wurden ebenfalls die Wartezeiten am Knoten SLU120 und SLU121 bestimmt. Am SLU120 zeigt sich eine Reduktion der Wartezeiten für den ÖV (über den gesamten Messzeitraum) von 1 Sekunde, was 25% entspricht. Am Knoten SLU121 reduziert sich die Wartezeit des ÖVs um 50.00% (von 12 Sekunden mit VS-PLUS auf 6 Sekunden mit der Selbst-Steuerung). Alle getrennt analysierten Zeiträume als auch den separat betrachteten Signalgebern zeigen eine Verbesserung auf. Auffällig ist hier, dass bereits durch die Steuerung VS-PLUS sehr niedrige Wartezeiten erreicht werden konnten. Durch die Selbst-Steuerung kann dieses hohe Niveau gehalten werden und weiter verbessert werden. Es kann für die Reduzierung der Wartezeit an beiden Knoten ein positives Fazit für den Einsatz der Selbst-Steuerung abgegeben werden.

Bezüglich des MIVs wurden die Warte-, Belegungszeiten der Voranmeldedetektoren und Langschlaufen, die Zeitlücken und die harten Grünabbrüche untersucht. Am Knoten SLU120 zeigt sich eine Reduktion der Wartezeiten (aggregiert auf den gesamten Messzeitraum) von 17.14%, was den Wartezeiten von 35 Sekunden für VS-PLUS und 29 Sekunden für die Selbst-Steuerung. Alle Zeiträume zeigen hier eine deutliche Reduktion der Wartezeiten. Im gesamten Untersuchungsgebiet verringert sich die Wartezeit von 35 Sekunden auf 27 Sekunden, was einer Reduktion 22.86% entspricht. Die Analyse der Belegungszeiten von Langschlaufen als auch Voranmeldedetektoren zeigen am Knoten SLU120 eine klare Verschiebung hin zu kürzeren Belegungszeiten, was positiv zu beurteilen ist. Betrachtet man final die aggregierten längsten Belegungszeiten der Voranmeldeschlaufen für das gesamte Untersuchungsgebiet, so kann die durchschnittliche längste Belegungsdauer von 91 Sekunden auf 77 Sekunden reduziert werden (14 Sekunden bzw. 15.38%). Harte Grünabbrüche können durch die Selbst-Steuerung an beiden Knoten signifikant reduziert

werden. Am SLU120 treten diese Ereignisse um -28.98%, am SLU121 um 22.71 und im gesamten Untersuchungsgebiet um 25.54% weniger häufig auf.

Auf Basis dieser Resultate kann auch eine grundlegende Empfehlung für die Selbst-Steuerung im Kontext des MIVs abgegeben werden.

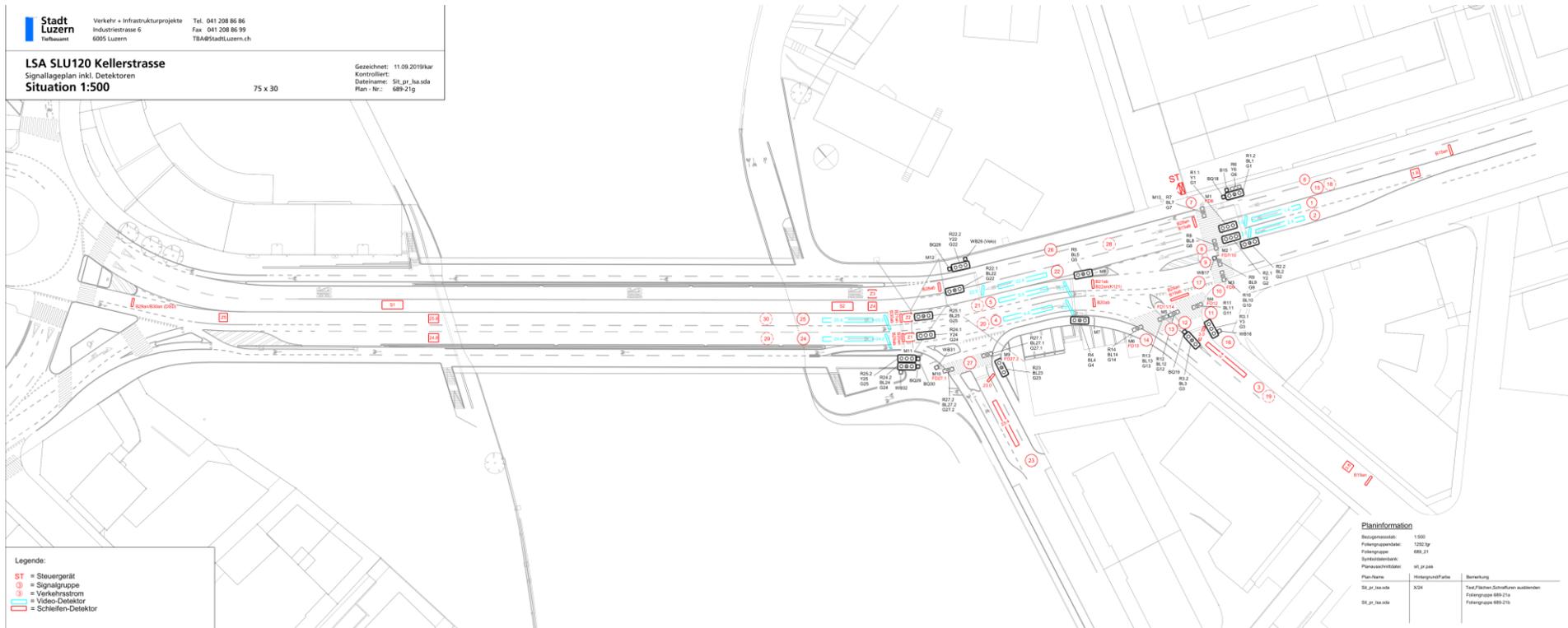
Final zeigen die Resultate, dass der Einsatz der Selbst-Steuerung eine Verbesserung der Abfertigung von Verkehrsströmen aller Verkehrsmodi im Untersuchungsgebiet bedeutet. Die Problematik, dass durch das Busdepot eine hohe Buslast auftritt, beeinflusst den Einsatz beider LSA-Steuerungen wenig. VS-PLUS arbeitet hier bereits auf einem sehr hohen Niveau und die Selbst-Steuerung kann dieses Niveau halten und sogar leicht verbessern. Zudem kann auch die Problematik der Rückstaus in den Spitzenzeiten, welche im Untersuchungsgebiet vorkommen, durch die Selbst-Steuerung adressiert werden. Es treten geringere Wartezeiten als auch Belegungszeiten an betrachteten Detektoren auf, was auf besseren Verkehrsfluss bzw. weniger Staubildungen hinweist.

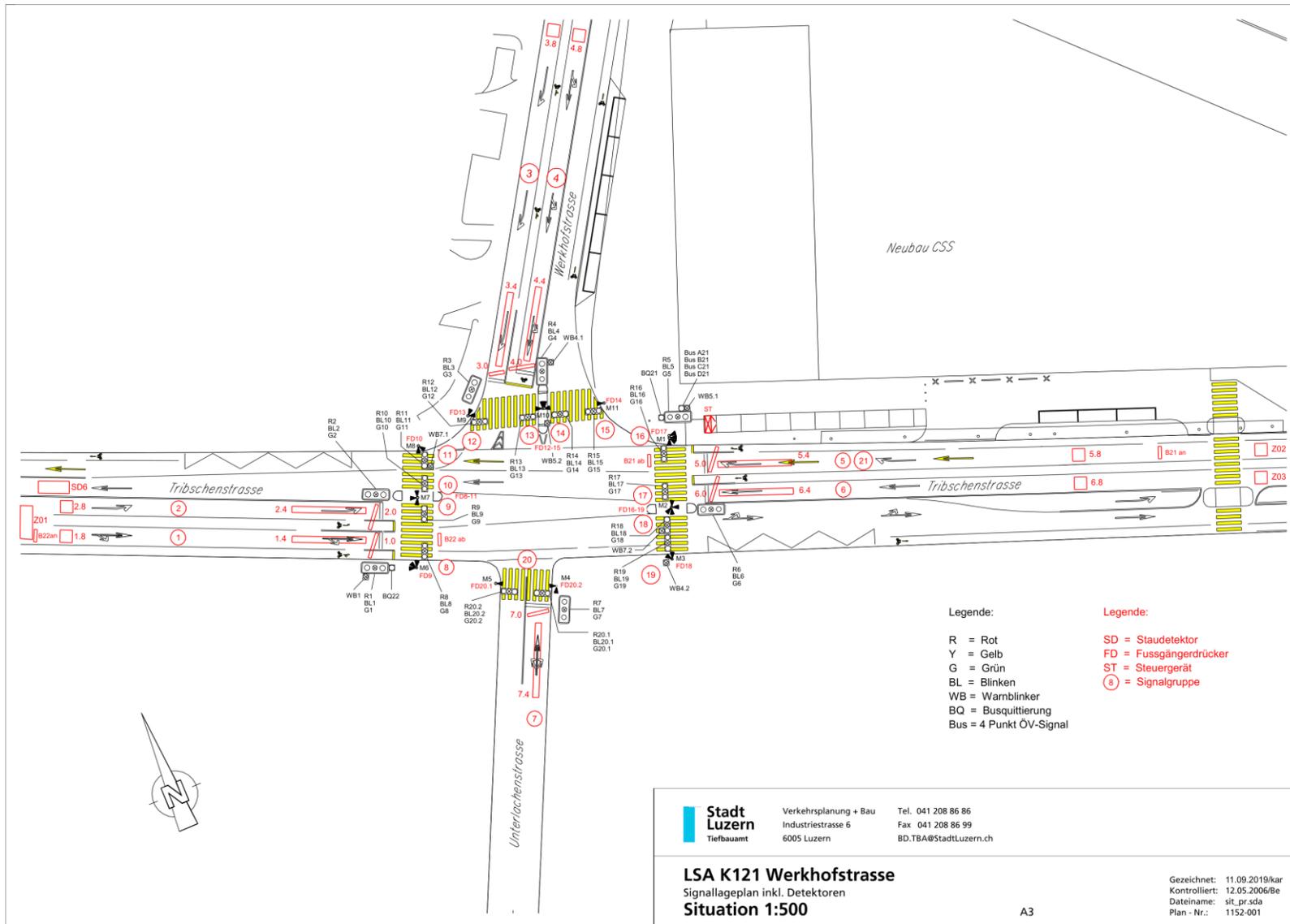
Für zukünftige Arbeiten könnte man die Selbst-Steuerung an Knoten mit anderen Charakteristika testen und die Analyse mit Fahrzeugtrajektorien verdichten. Zudem würden spezifische Daten für den Veloverkehr Aufschluss über eine potenzielle Verbesserung dieser VerkehrsteilnehmerInnen geben. Wenn man jedoch davon ausgeht, dass die Signalgeber des Veloverkehrs mit jenen des MIVs mitgeschaltet werden, kann durchaus von einer Verbesserung ausgegangen werden.

12 Referenzen

- [1] Verkehrs-Systeme AG, „VS-PLUS Version 8“. 2016, [Online]. Verfügbar unter: http://www.vs-plus.com/documents/Vs-PLUS_v8_Prodktblatt_DE.pdf.
- [2] S. Lämmer, „Selbst-gesteuerte Lichtsignalanlagen im Praxistest“. 2016, [Online]. Verfügbar unter: <http://stefanlaemmer.de/de/Selbst-Steuerung/Laemmer2016.pdf>.
- [3] E. Lefeber, S. Lämmer, und J. E. Rooda, „Optimal control of a deterministic multiclass queuing system for which several queues can be served simultaneously“, *Syst. Control Lett.*, Bd. 60, Nr. 7, S. 524–529, Juli 2011, doi: 10.1016/j.sysconle.2011.04.010.
- [4] F. L. Mannering und S. S. Washburn, *Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis, Enhanced eText*, 7th Edition. Wiley, 2019.
- [5] S. Araghi, A. Khosravi, und D. Creighton, „A review on computational intelligence methods for controlling traffic signal timing“, *Expert Syst. Appl.*, Bd. 42, Nr. 3, S. 1538–1550, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.09.003>.
- [6] Kathleen Tischler, „Neue Ansätze zur Nutzung von Induktionsschleifen-Daten an Lichtsignalanlagen: Minimierung von Fahrzeughalten und Schätzung von Kfz-Wartezeiten“, Nr. Dissertation, S. 194, 2016.
- [7] C. Yu, Y. Feng, H. X. Liu, W. Ma, und X. Yang, „Integrated optimization of traffic signals and vehicle trajectories at isolated urban intersections“, *Transp. Res. Part B Methodol.*, Bd. 112, S. 89–112, 2018.
- [8] A. Tageldin, T. Sayed, M. H. Zaki, und M. Azab, „A Safety Evaluation of an Adaptive Traffic Signal Control System Using Computer Vision“, *Adv. Transp. Stud.*, Bd. 2, Nr. Special Issue, 2014, Zugegriffen: Juni 04, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://trid.trb.org/view/1356677>.
- [9] A. Sharma, D. M. Bullock, und J. A. Bonneson, „Input–Output and Hybrid Techniques for Real-Time Prediction of Delay and Maximum Queue Length at Signalized Intersections“, *Transp. Res. Rec.*, Bd. 2035, Nr. 1, S. 69–80, Jan. 2007, doi: 10.3141/2035-08.
- [10] J. Guo, J. Xia, und B. L. Smith, „Kalman Filter Approach to Speed Estimation Using Single Loop Detector Measurements under Congested Conditions“, *J. Transp. Eng.*, Bd. 135, Nr. 12, S. 927–934, Dez. 2009, doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000071.
- [11] B. Coifman und S. Kim, „Speed estimation and length based vehicle classification from freeway single-loop detectors“, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, Bd. 17, Nr. 4, S. 349–364, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.trc.2009.01.004.
- [12] L. Neubert, „Statistische Analyse von Verkehrsdaten und die Modellierung von Verkehrsfluss mittels zellularer Automaten“, Dissertation, Universität Dresden, Dresden, 2000.
- [13] S. Hu, J. Wu, und L. Xu, „Real-time traffic congestion detection based on video analysis“, *J. Inf. Comput. Sci.*, Bd. 9, Nr. 10, S. 2907–2914, 2012.
- [14] Q. Wang, J. Wan, und Y. Yuan, „Locality constraint distance metric learning for traffic congestion detection“, *Pattern Recognit.*, Bd. 75, S. 272–281, März 2018, doi: 10.1016/j.patcog.2017.03.030.
- [15] R. Oertel, P. Wagner, J. Krimmling, und M. Körner, „Verlustzeitenbasierte LSA-Steuerung eines Einzelknotens“, S. 8.
- [16] K. Tischler und S. Lämmer, „Modellbasierte Anpassung von Grünzeiten in koordinierten Steuerungen unter der Randbedingung vollständiger Warteschlangenleerung“, *FGSV*, Stuttgart, 2014.

13 Anhang





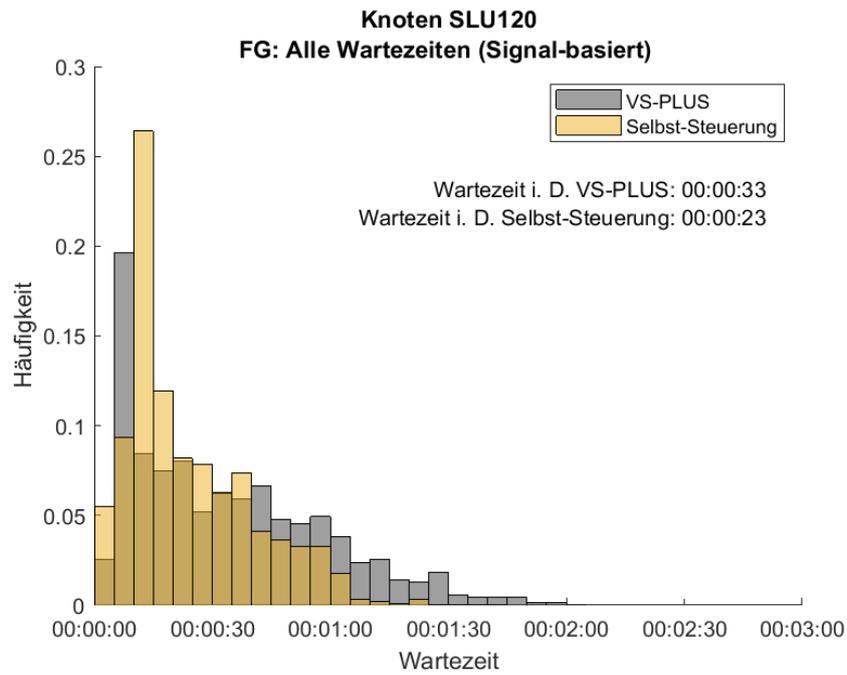


Abbildung 69: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV, mittwochs am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

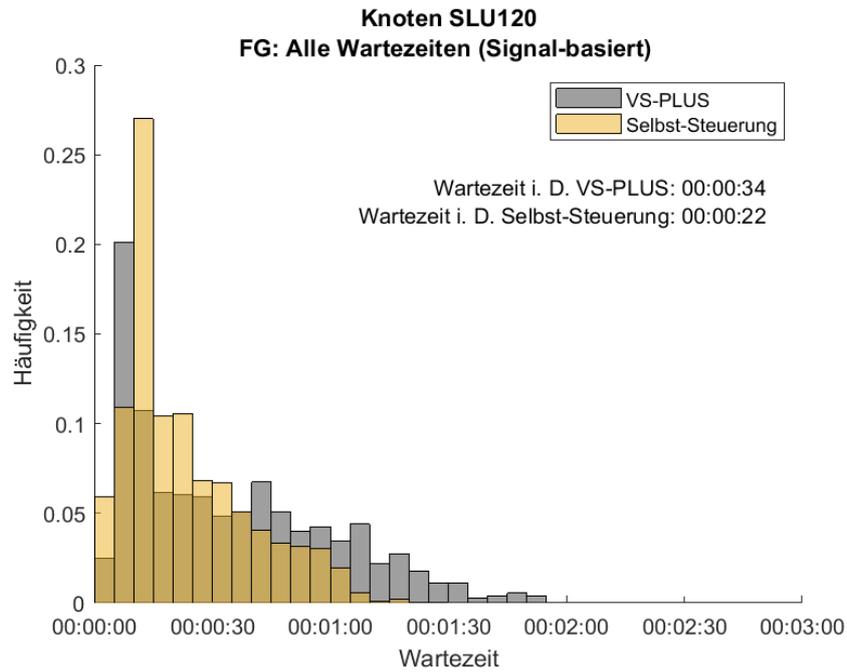


Abbildung 70: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV, donnerstags am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

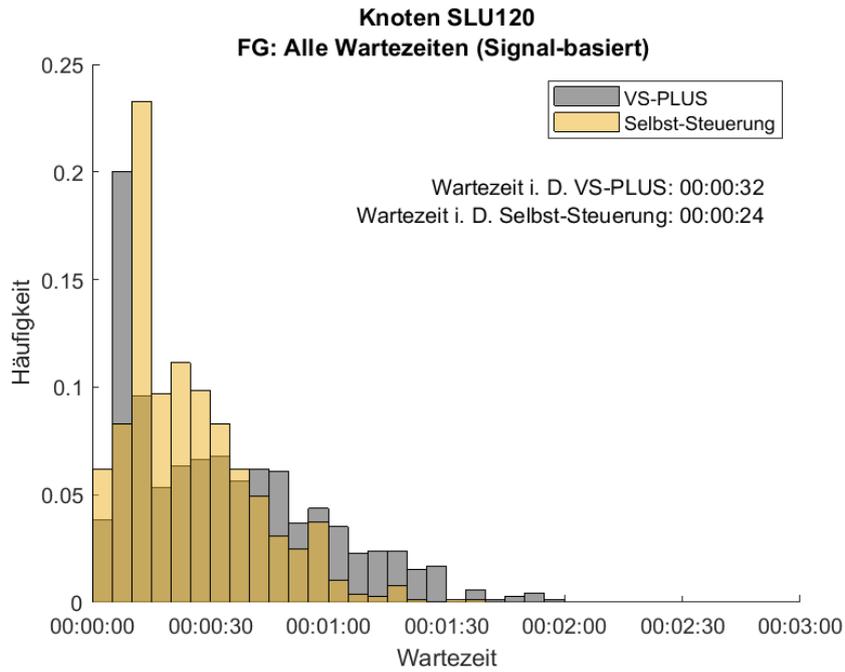


Abbildung 71: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV, freitags am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

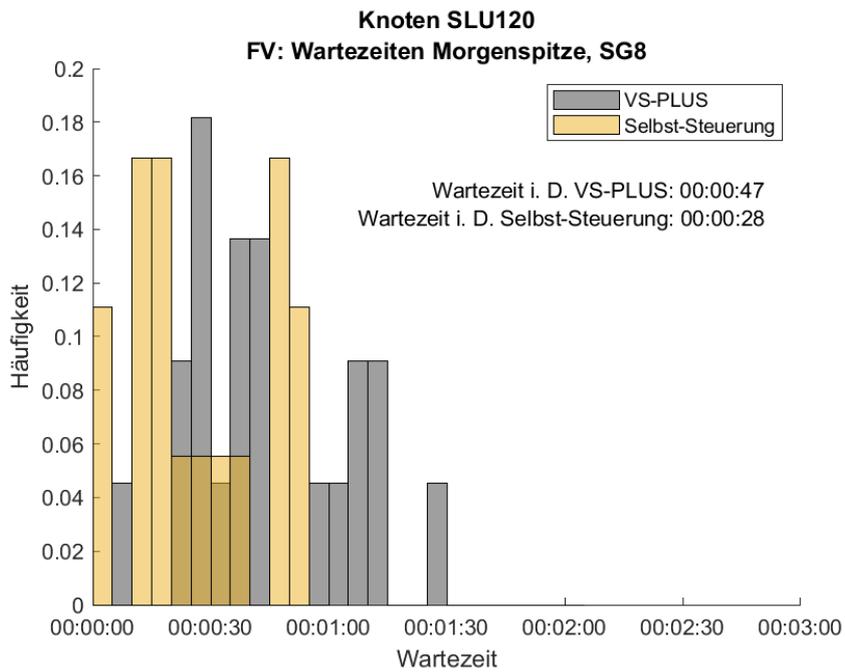


Abbildung 72: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 8 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

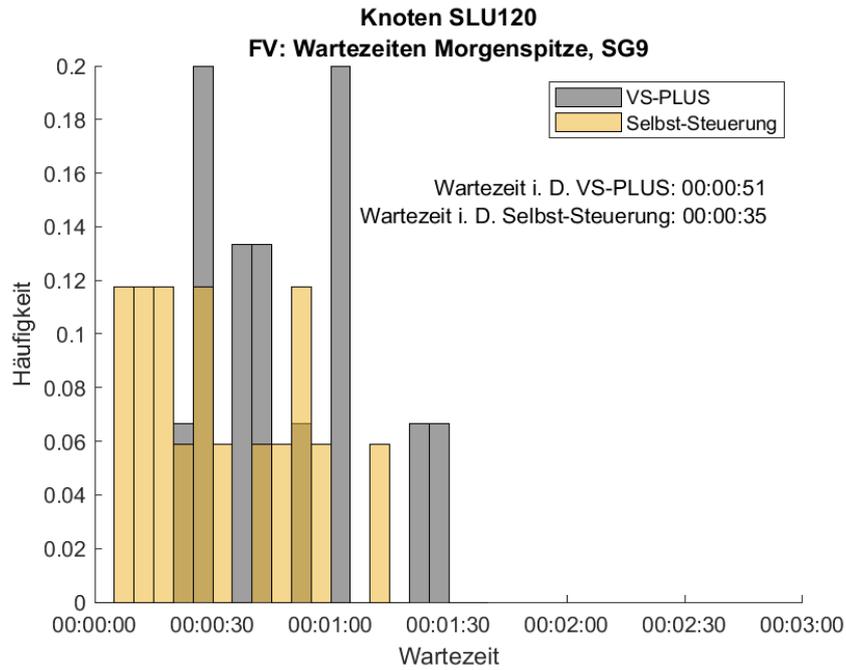


Abbildung 73: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 9 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

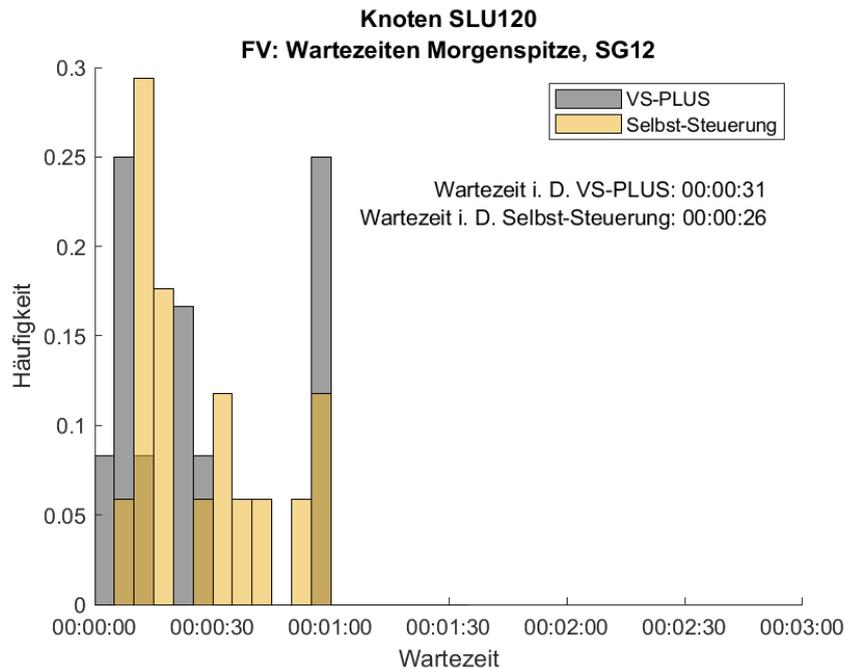


Abbildung 74: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 12 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

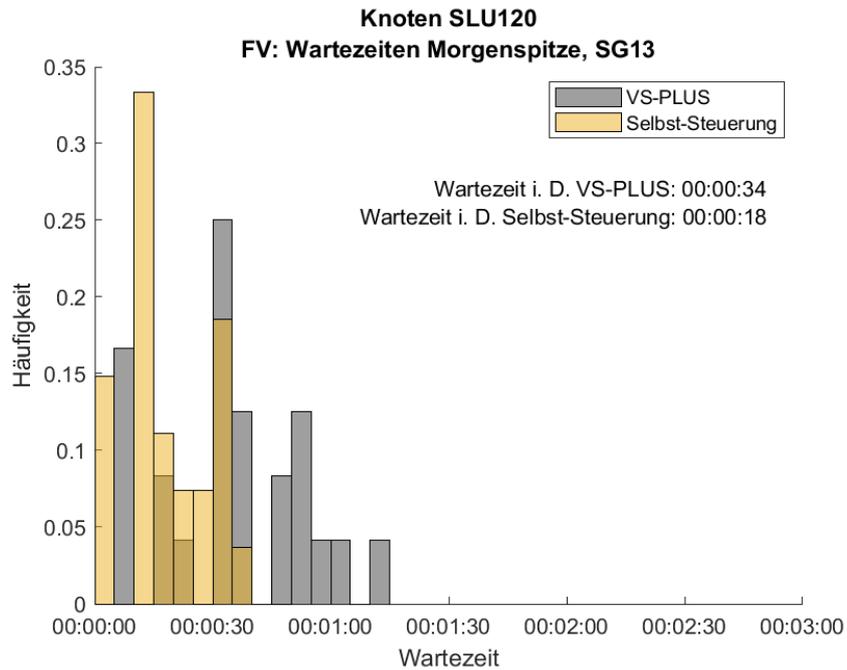


Abbildung 75: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 13 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

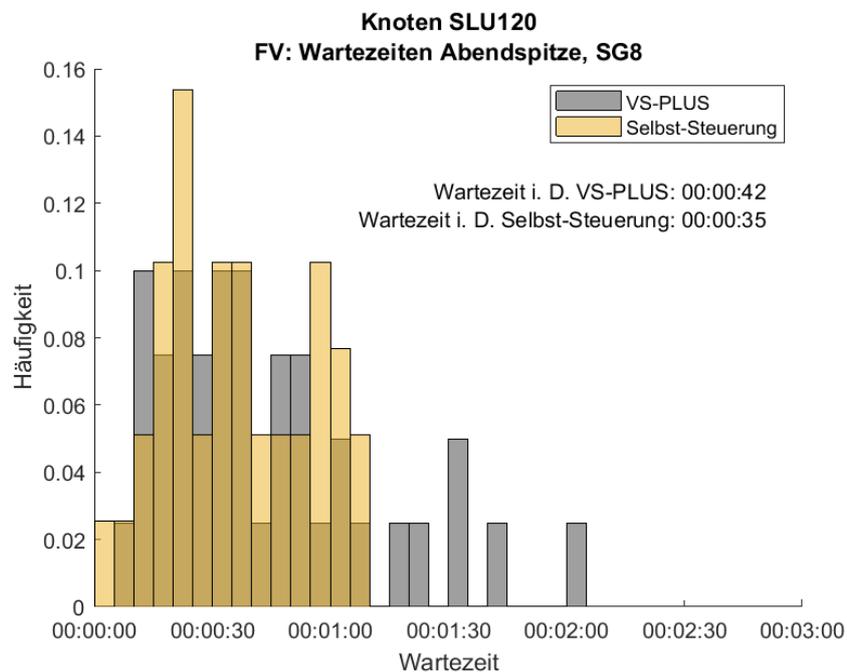


Abbildung 76: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 8 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

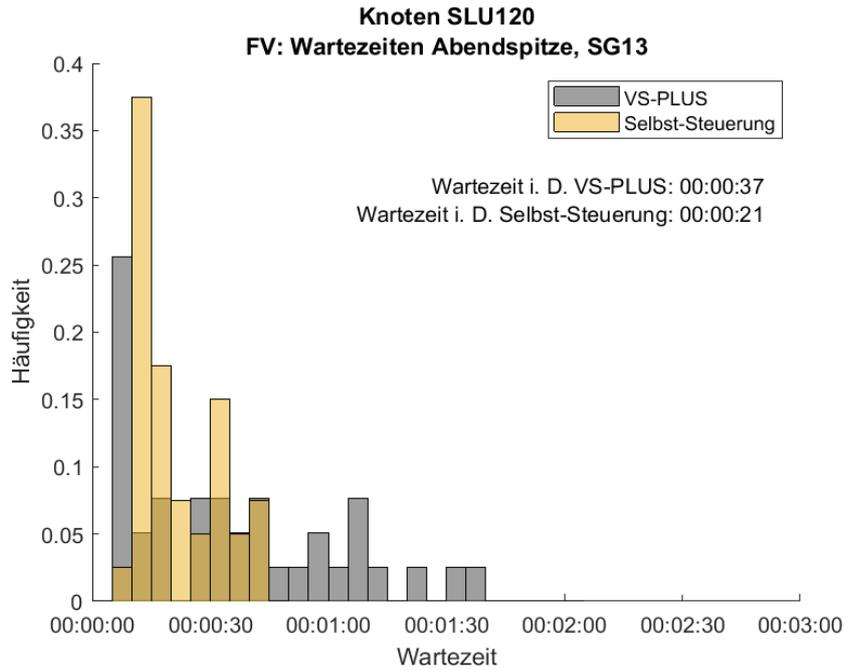


Abbildung 77: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 9 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

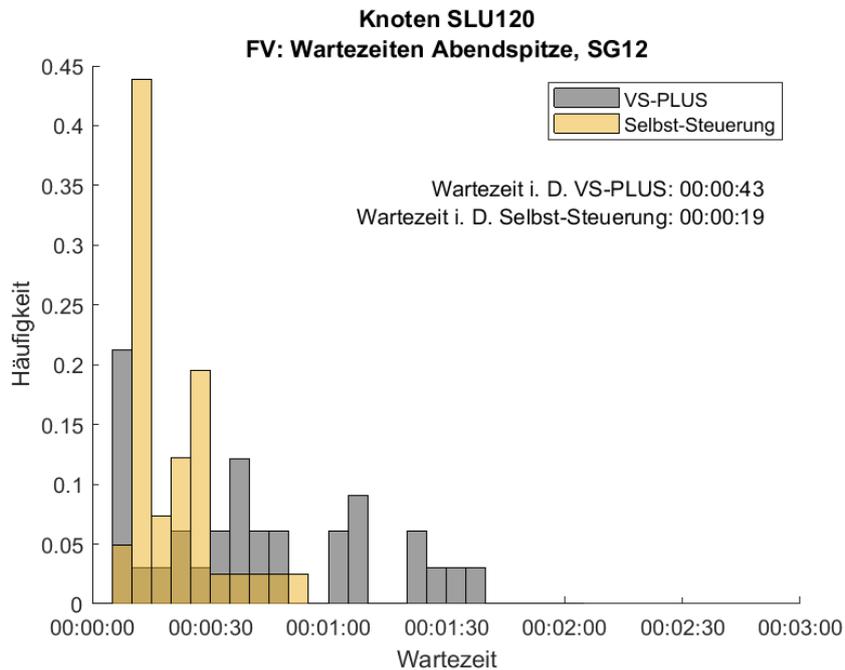


Abbildung 78: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 12 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

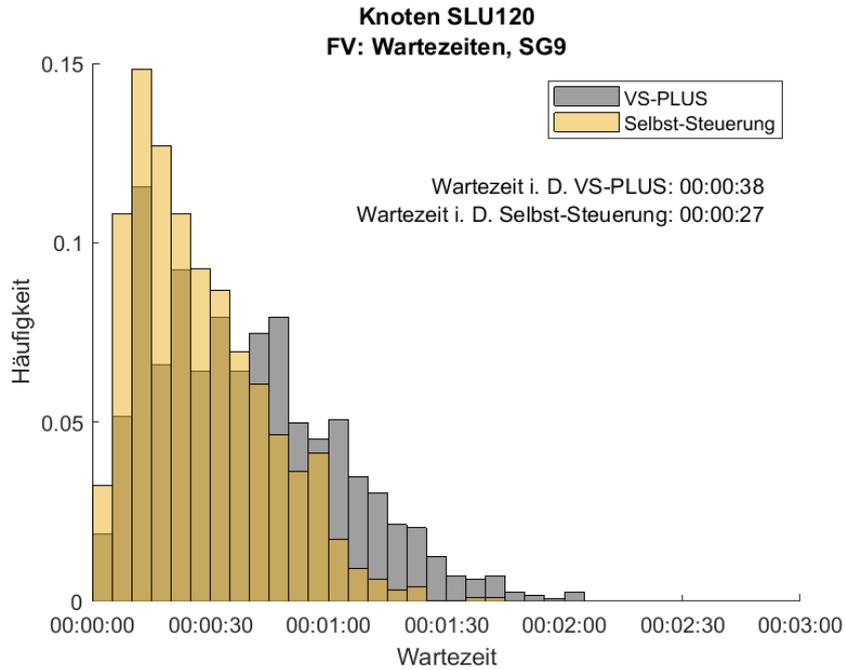


Abbildung 79: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 13 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

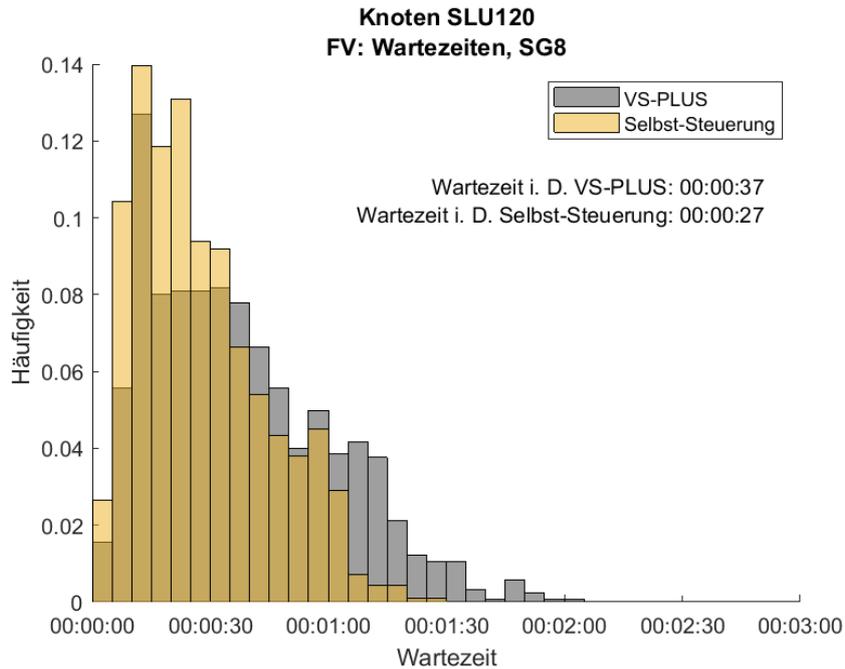


Abbildung 80: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 8 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

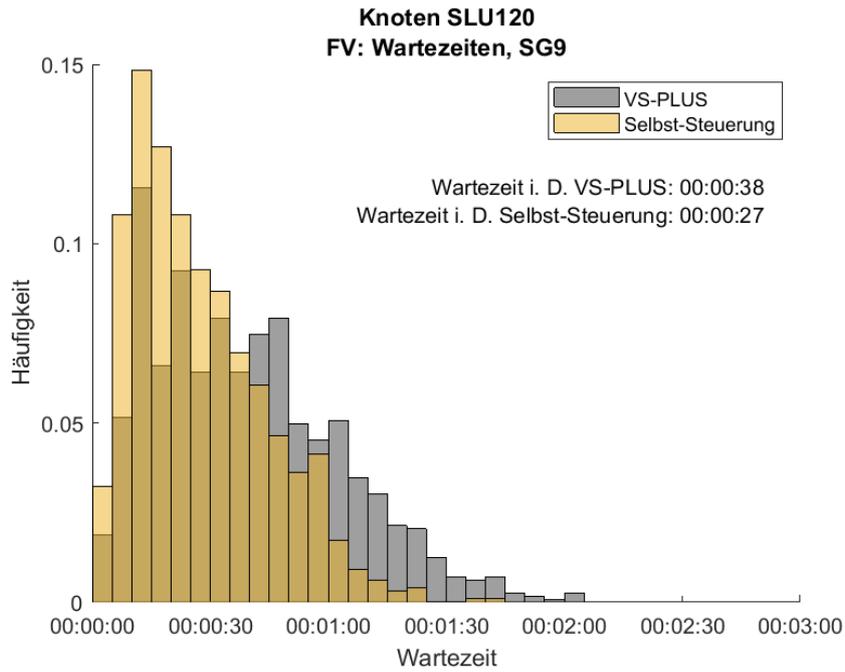


Abbildung 81: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 9 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

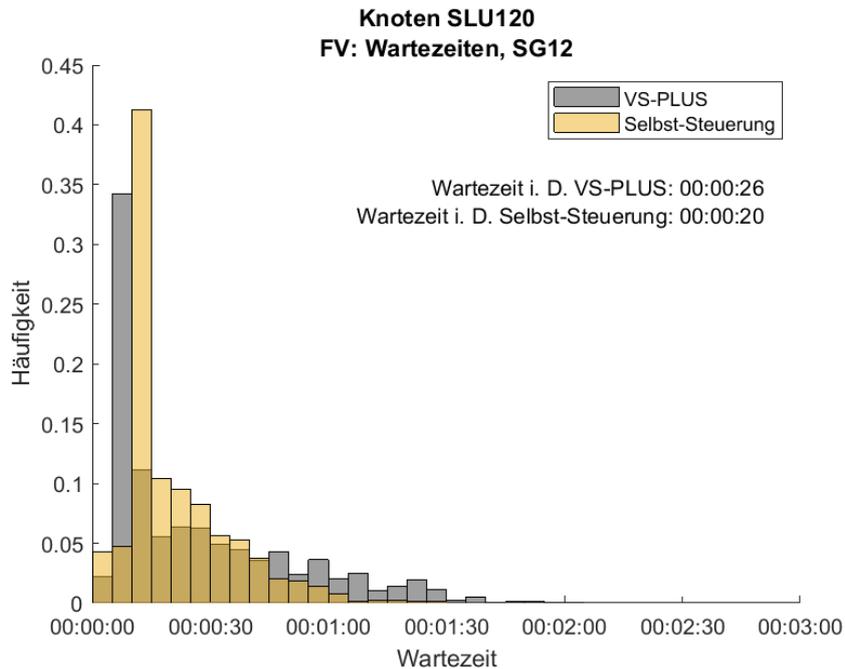


Abbildung 82: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 12 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

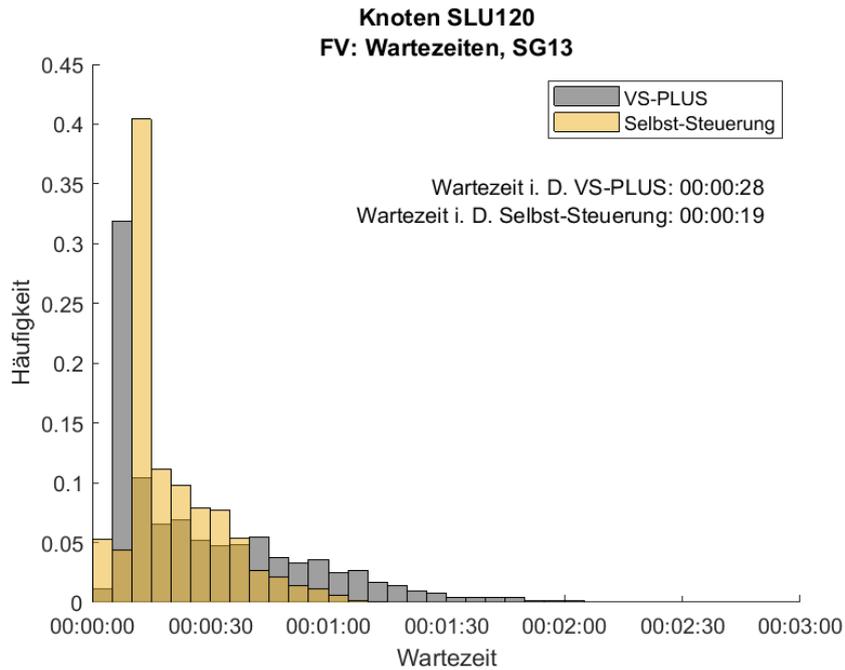


Abbildung 83: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 13 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

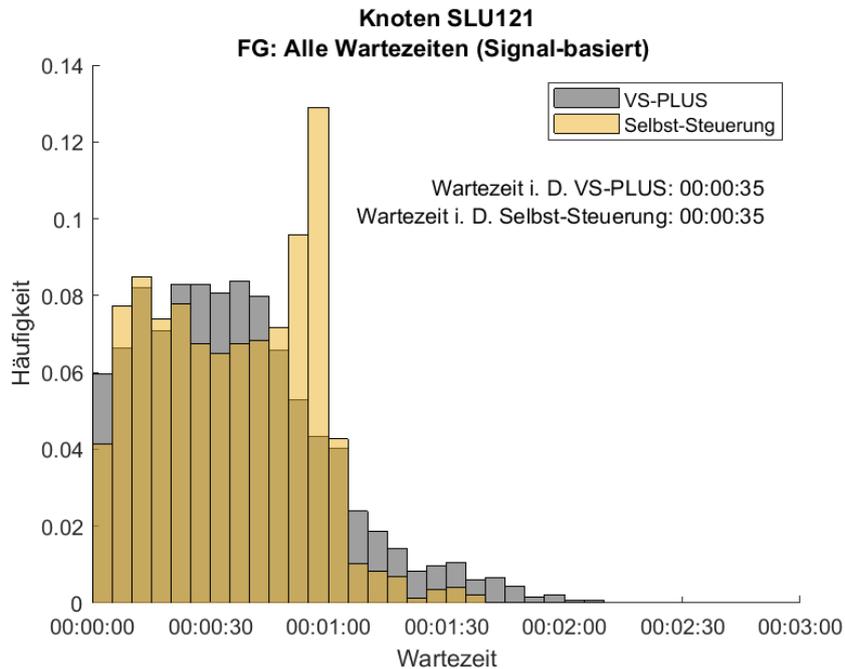


Abbildung 84: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV, mittwochs am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

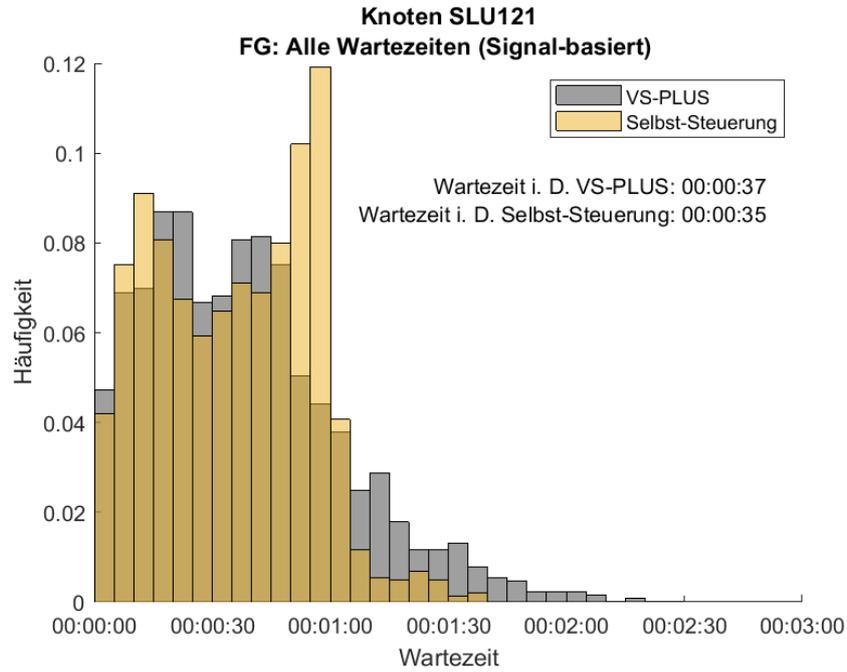


Abbildung 85: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV, donnerstags am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

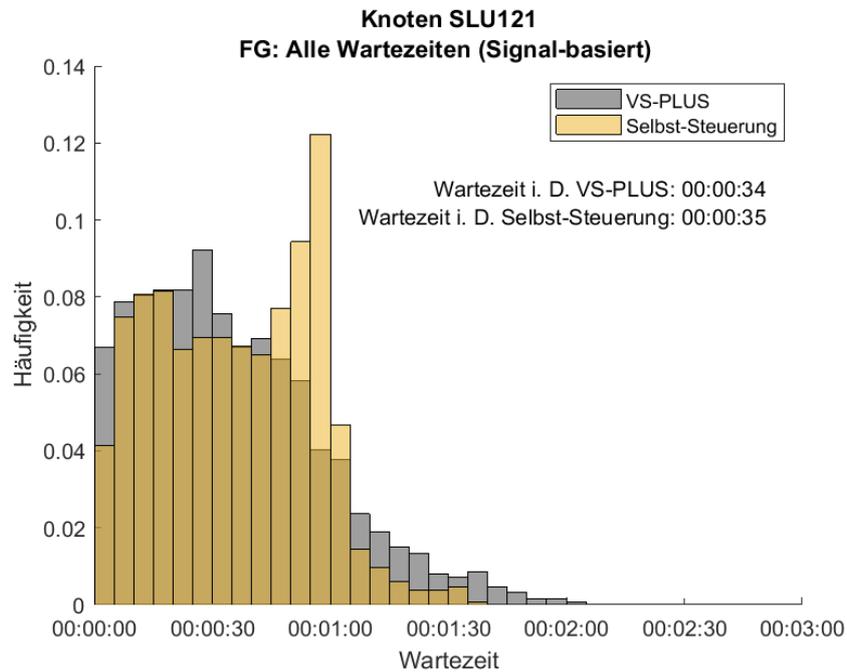


Abbildung 86: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV, freitags am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

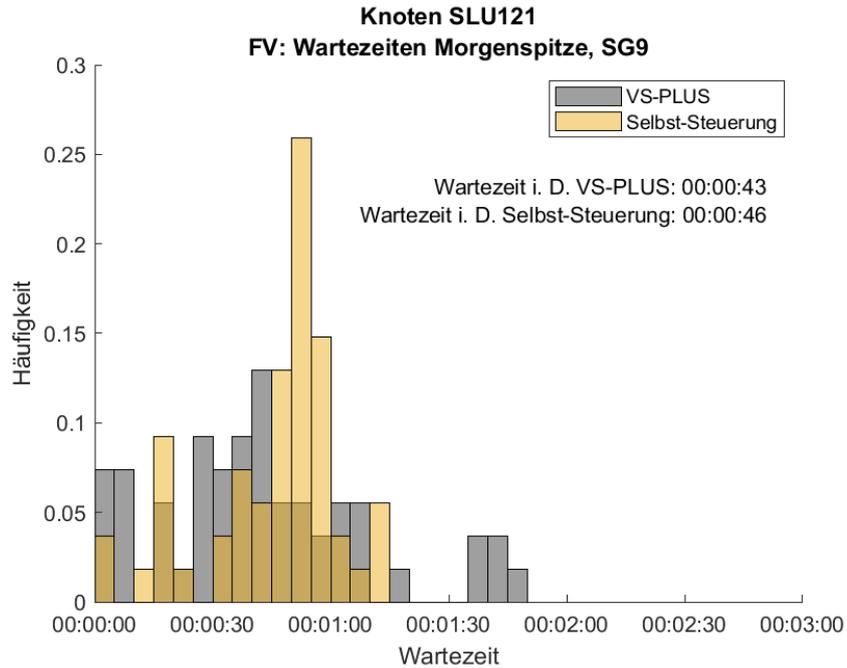


Abbildung 87: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 9 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

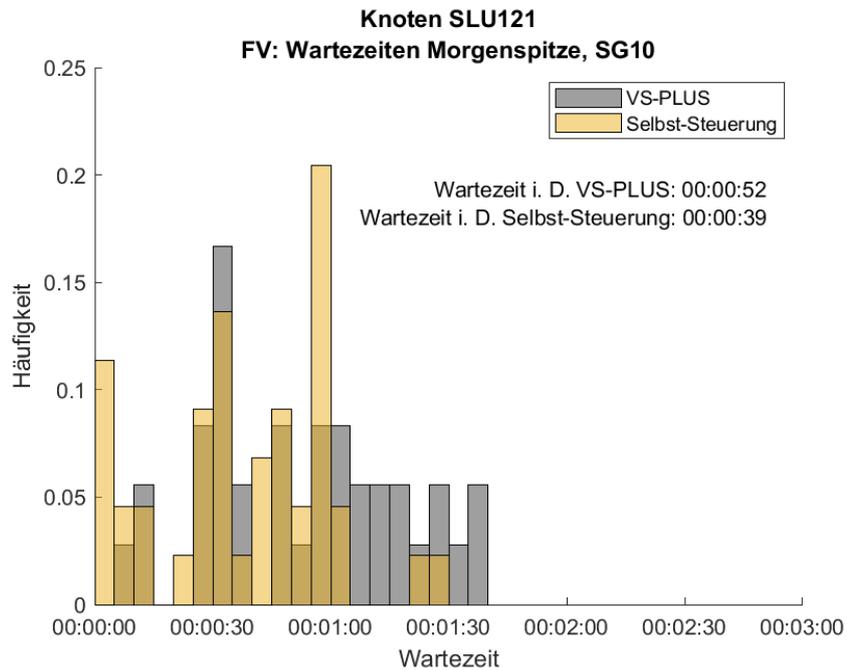


Abbildung 88: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 10 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

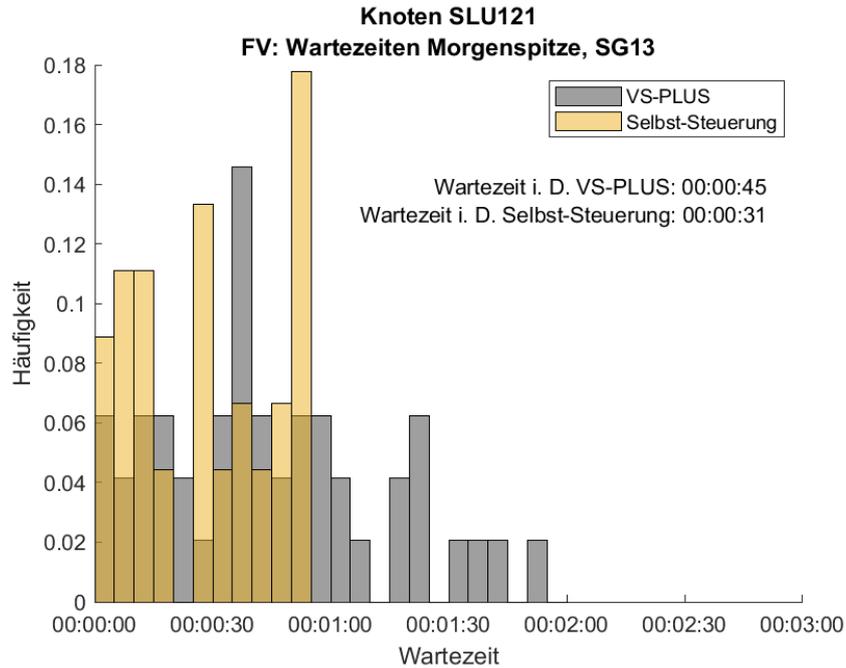


Abbildung 89: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 13 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

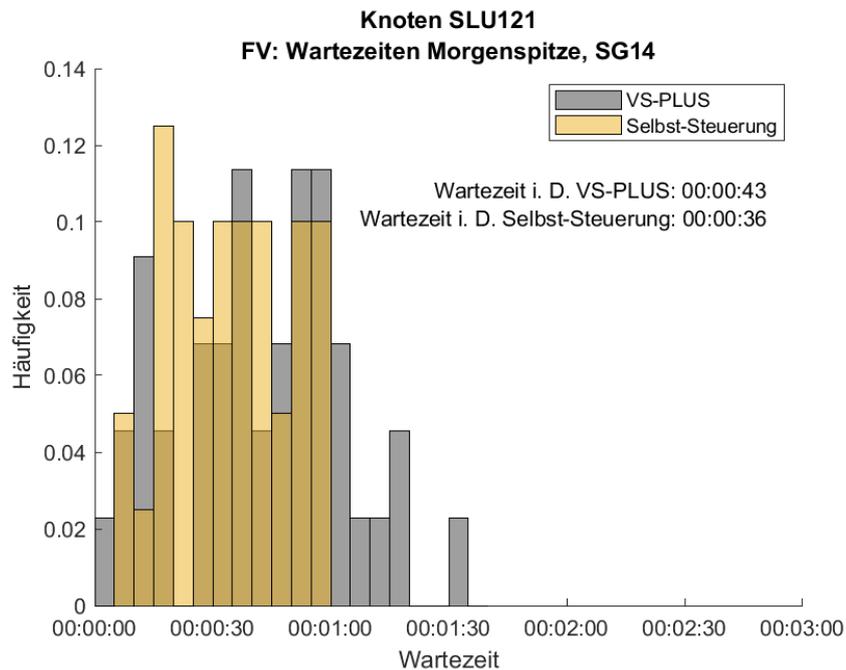


Abbildung 90: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 14 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

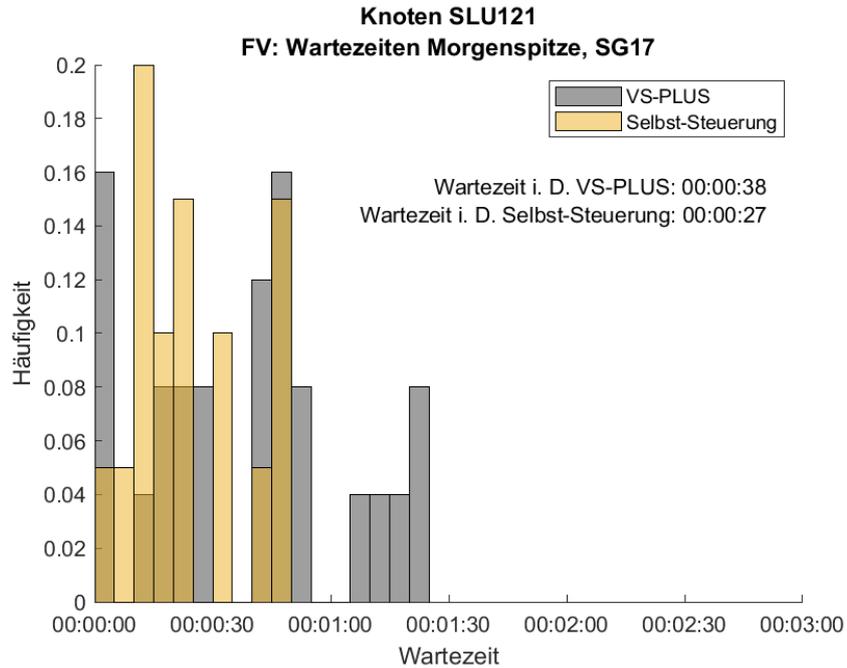


Abbildung 91: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 17 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

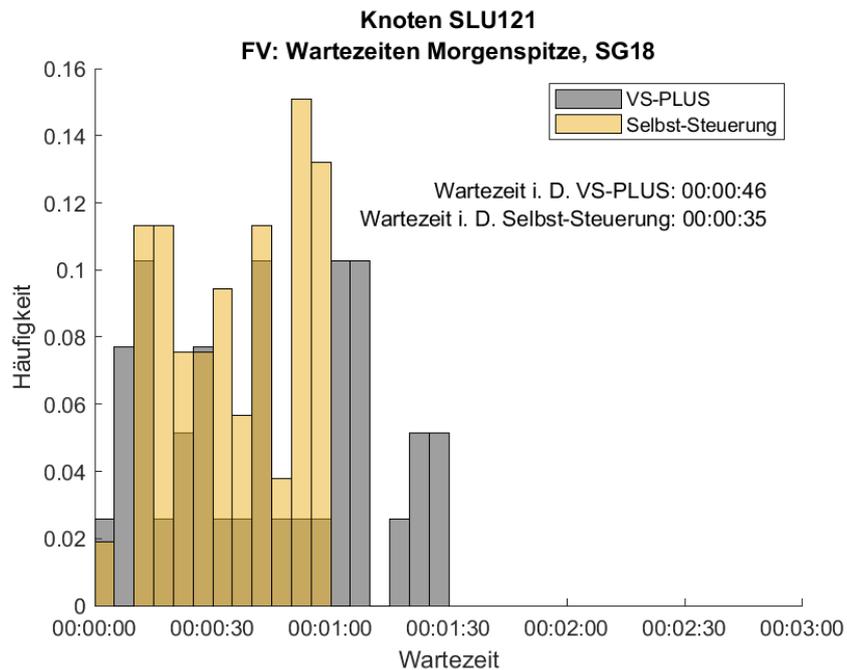


Abbildung 92: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 18 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

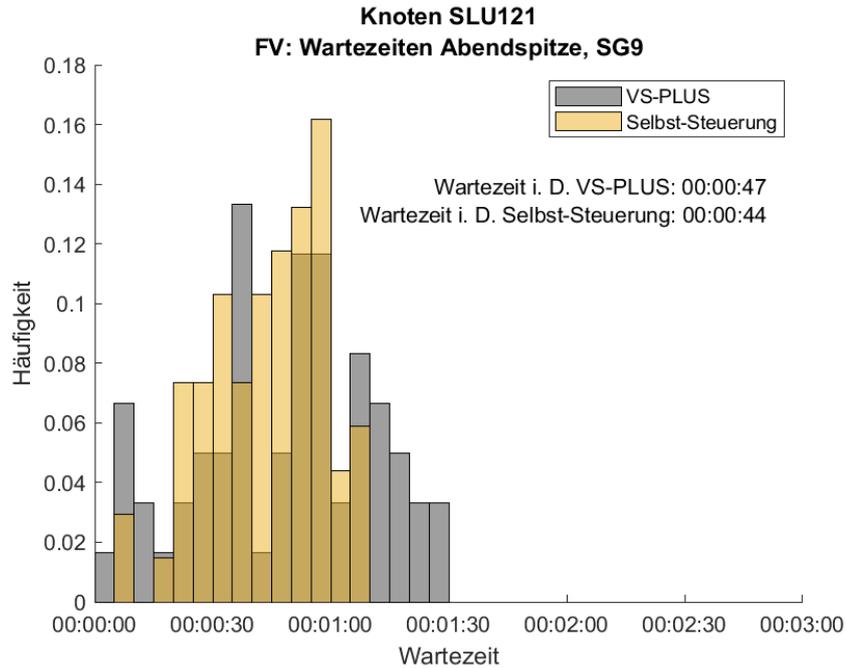


Abbildung 93: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 9 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

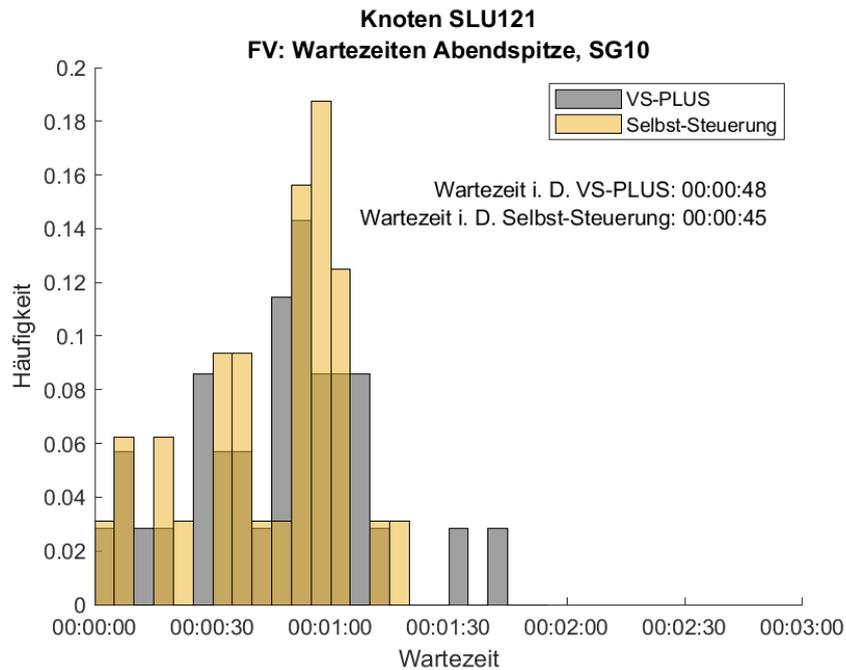


Abbildung 94: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 10 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

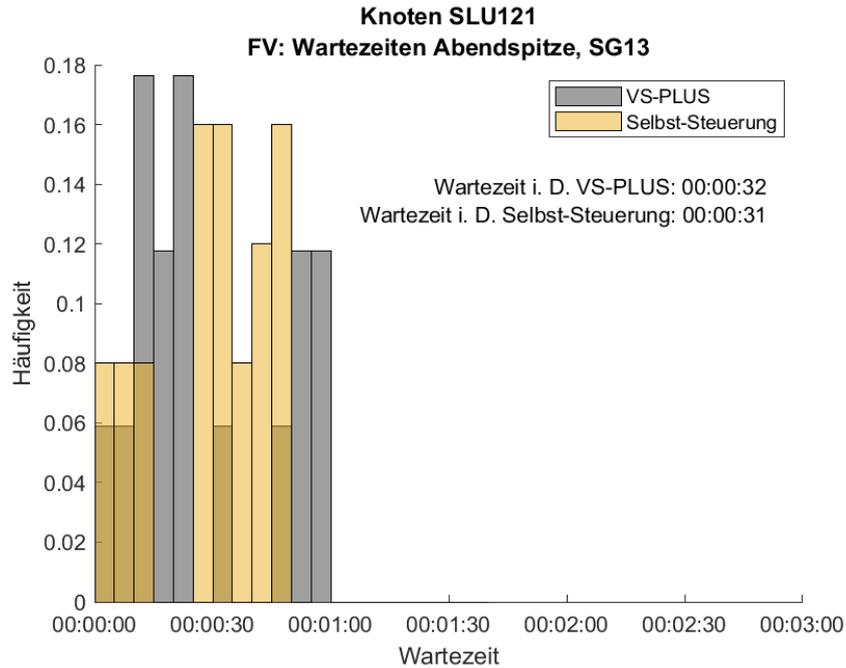


Abbildung 95: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 13 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

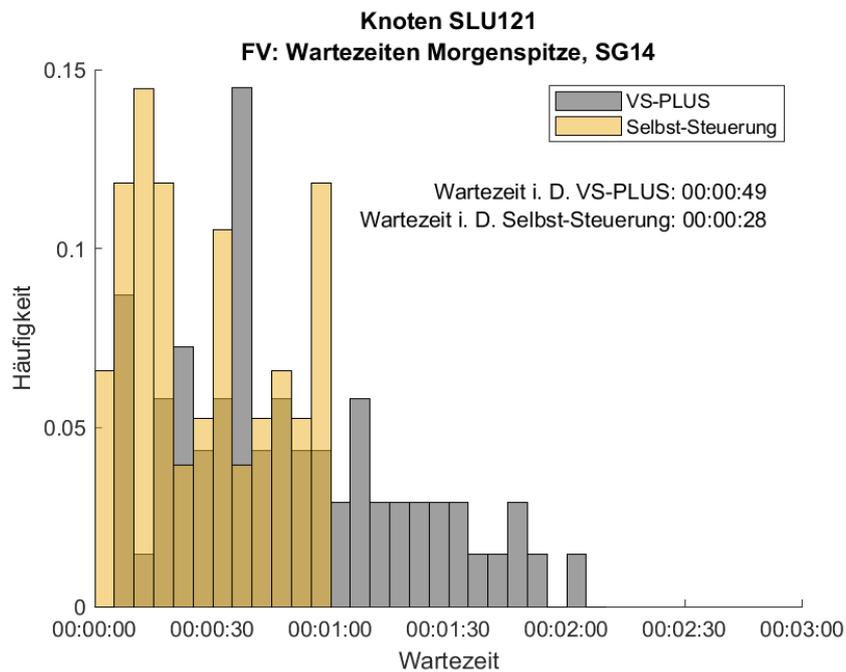


Abbildung 96: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 14 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

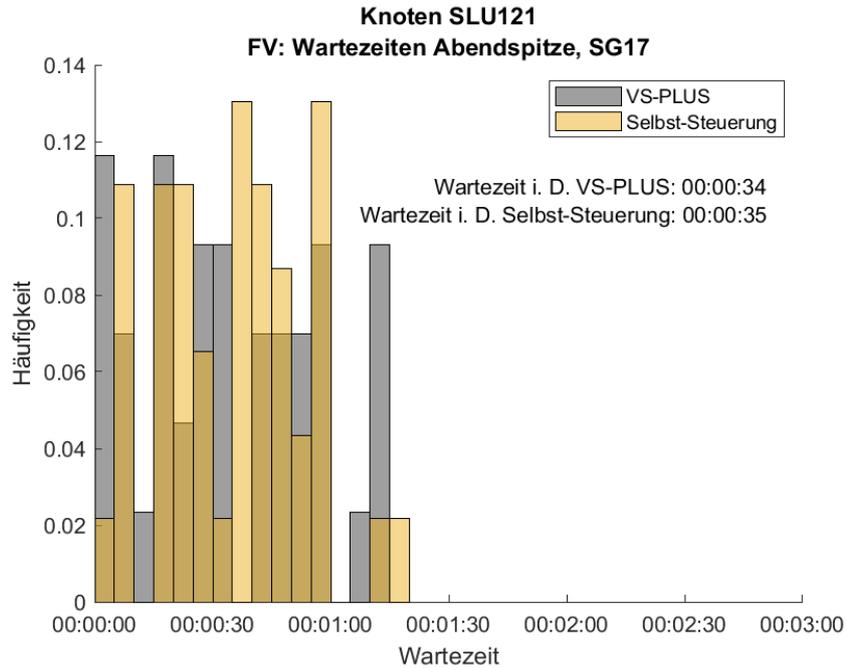


Abbildung 97: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 17 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

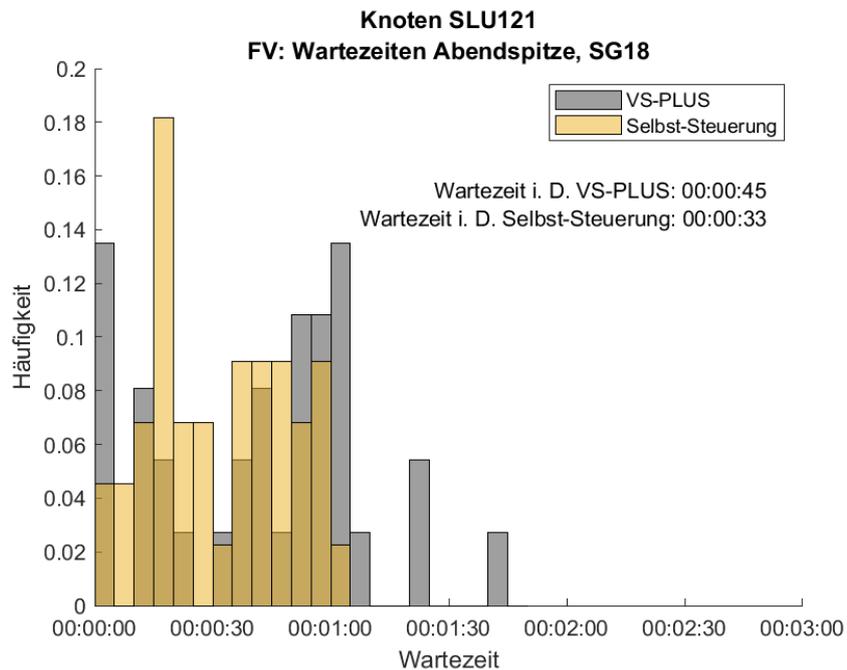


Abbildung 98: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 18 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

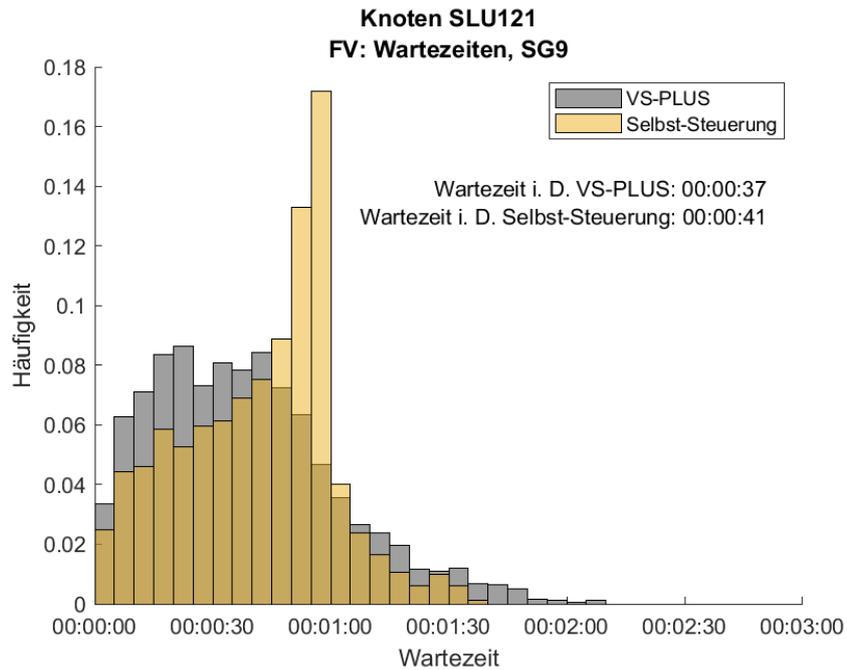


Abbildung 99: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 9 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

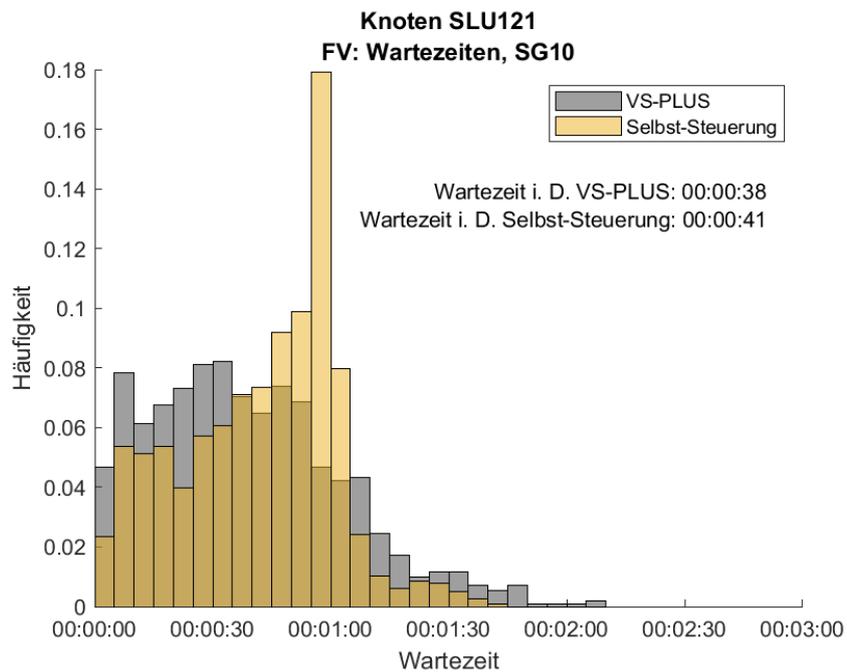


Abbildung 100: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 10 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

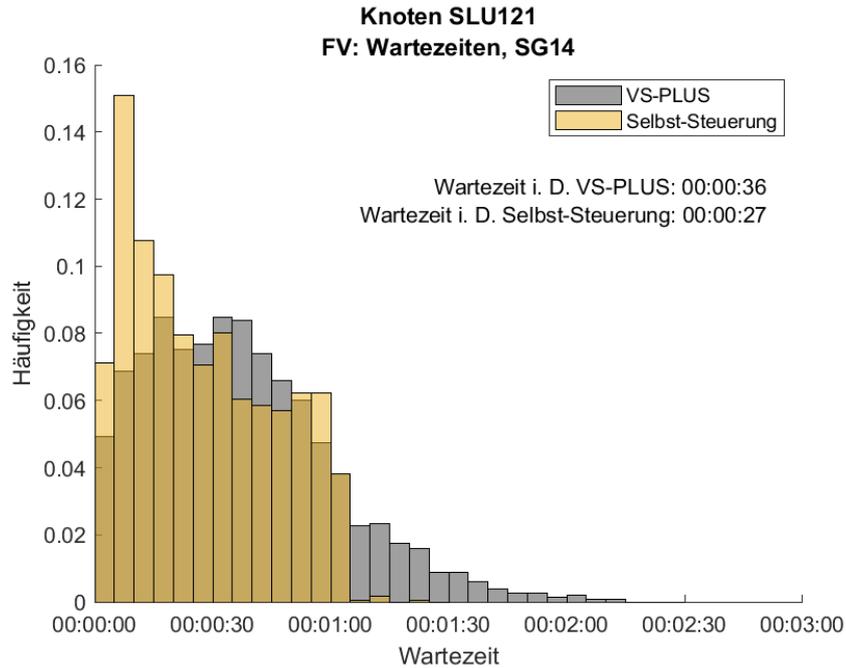


Abbildung 101: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 14 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

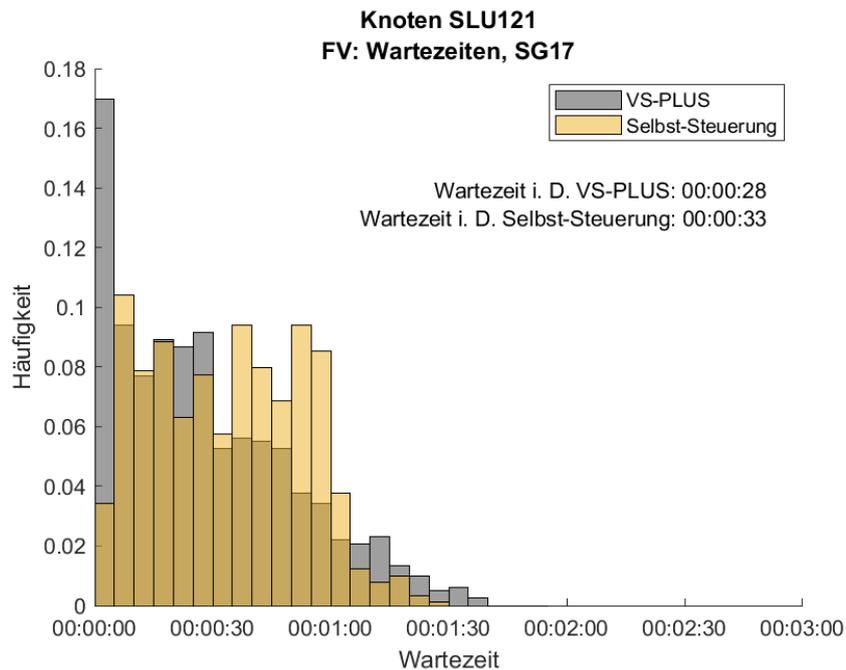


Abbildung 102: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 17 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

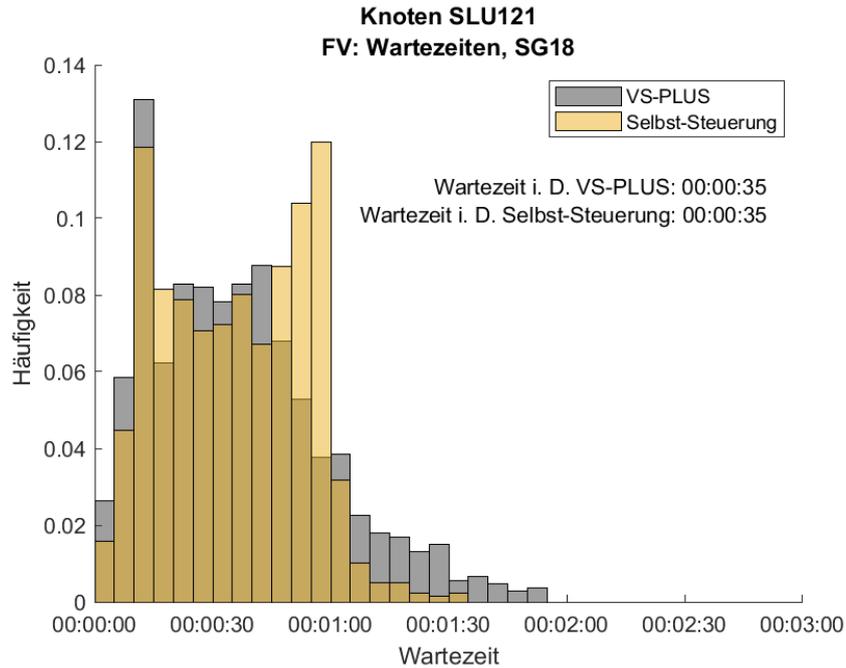


Abbildung 103: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den FV am Signalgeber 18 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

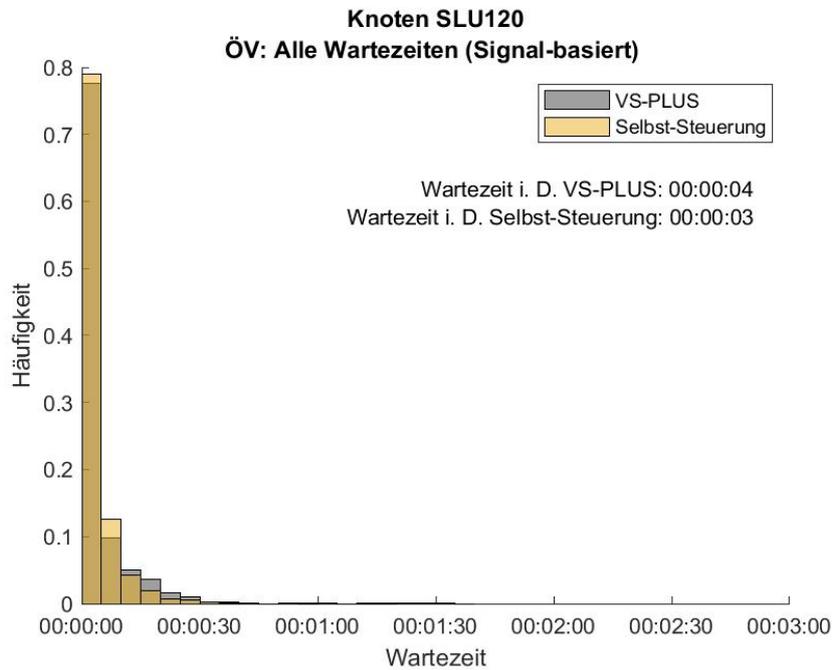


Abbildung 104: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV, mittwochs am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

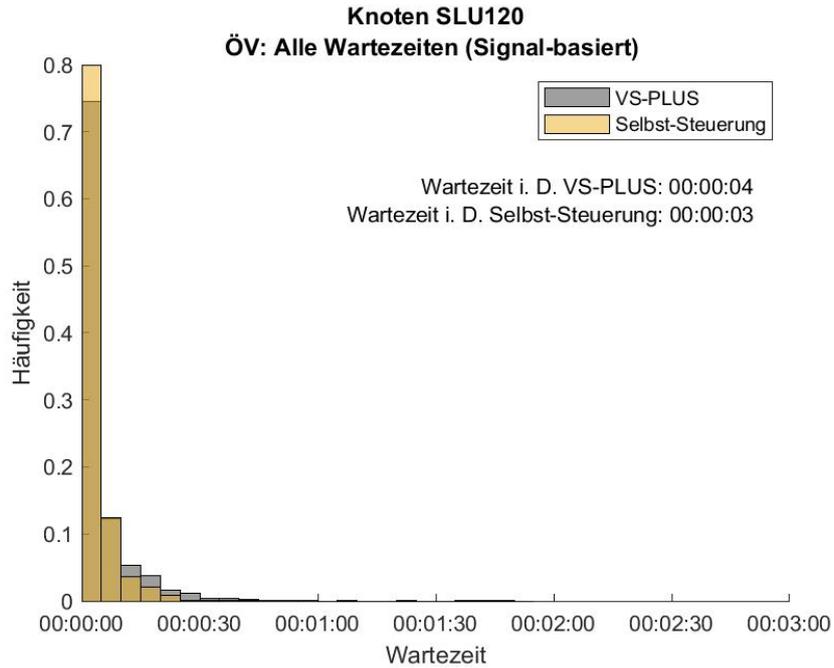


Abbildung 105: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV, donnerstags am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

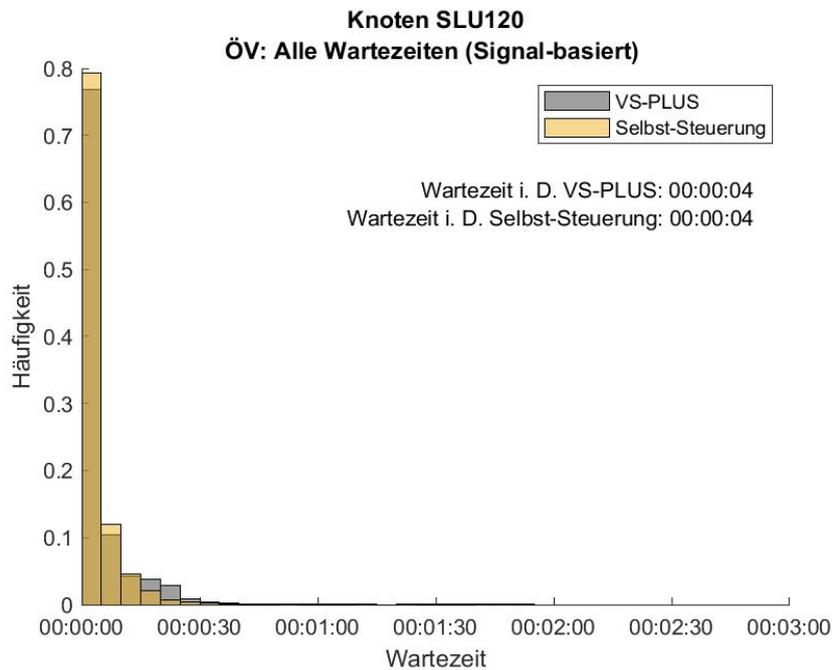


Abbildung 106: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV, freitags am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

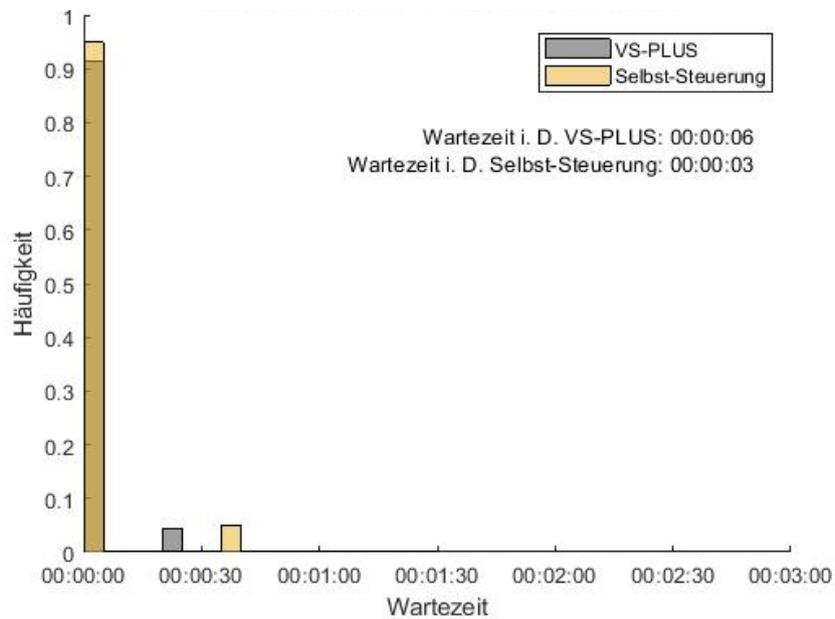


Abbildung 107: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 4 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

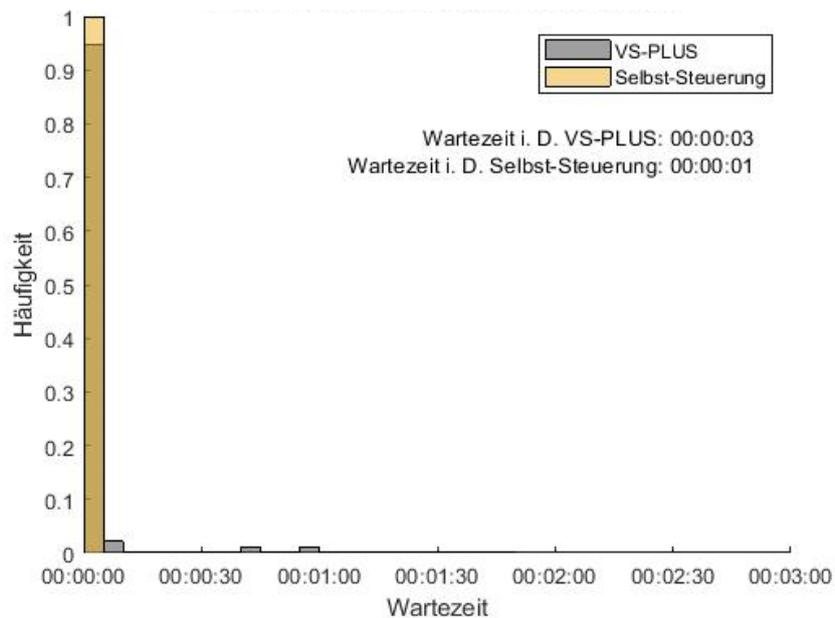


Abbildung 108: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 5 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

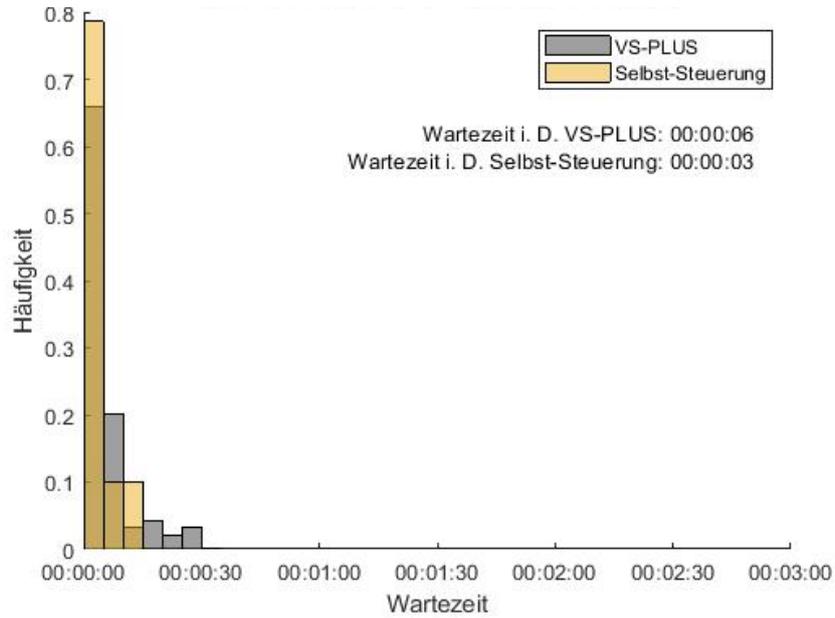


Abbildung 109: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 6 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

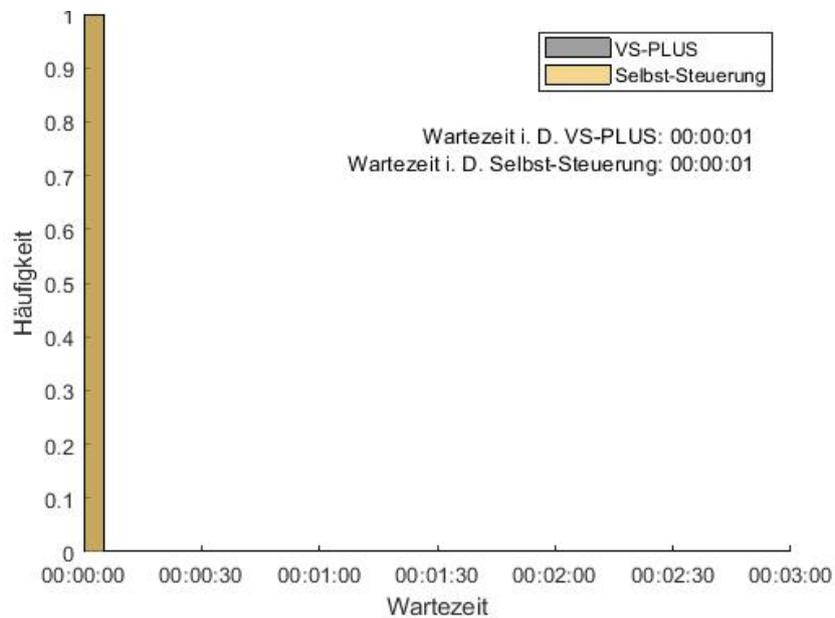


Abbildung 110: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 22,1 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

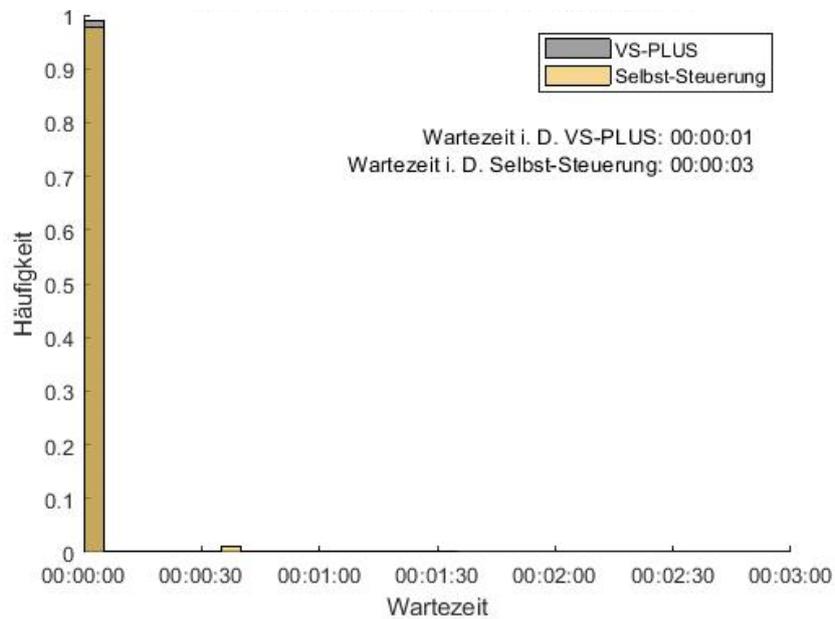


Abbildung 111: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 22,2 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

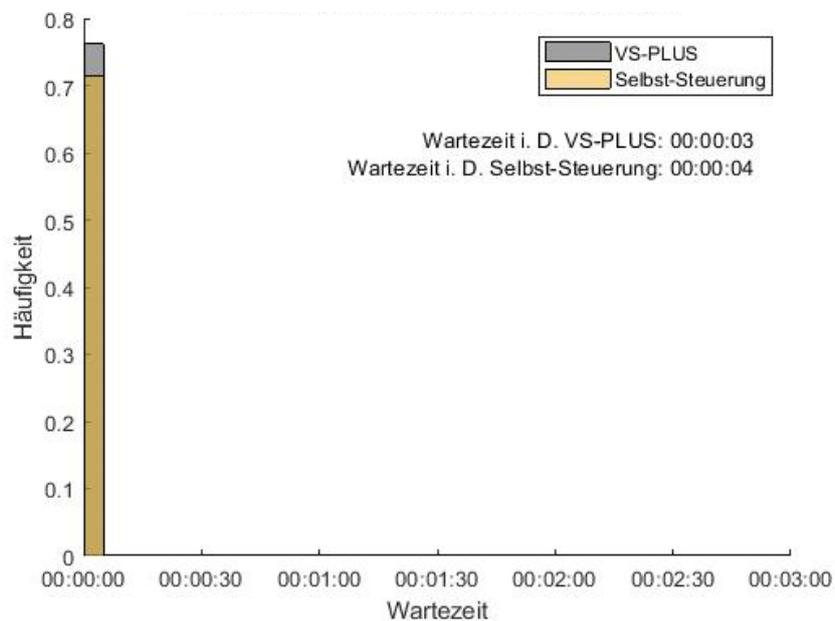


Abbildung 112: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 24 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

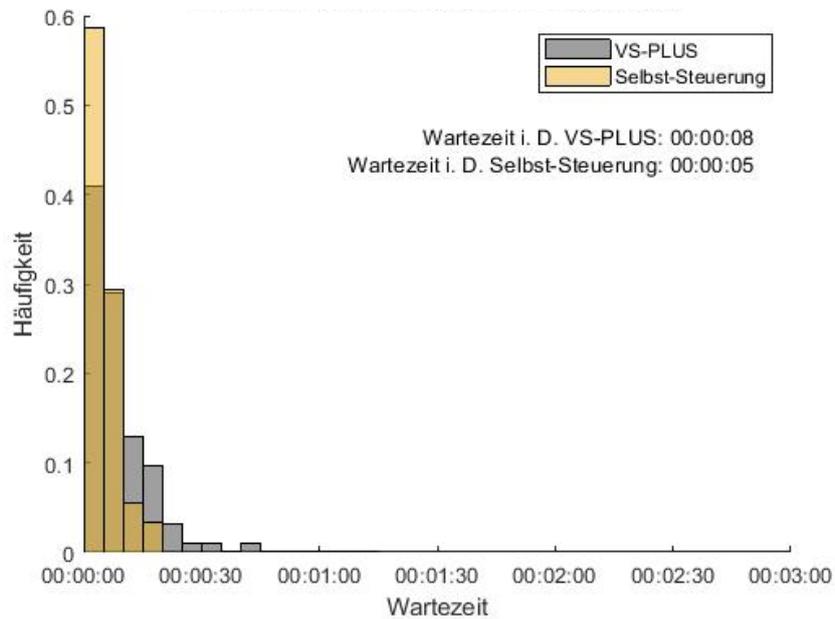


Abbildung 113: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 25 in der Morgenspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

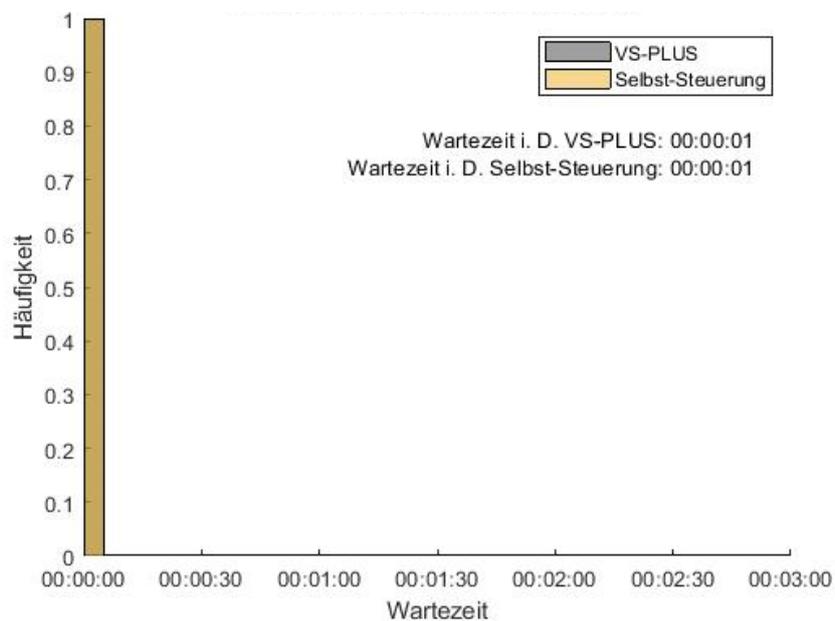


Abbildung 114: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 4 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

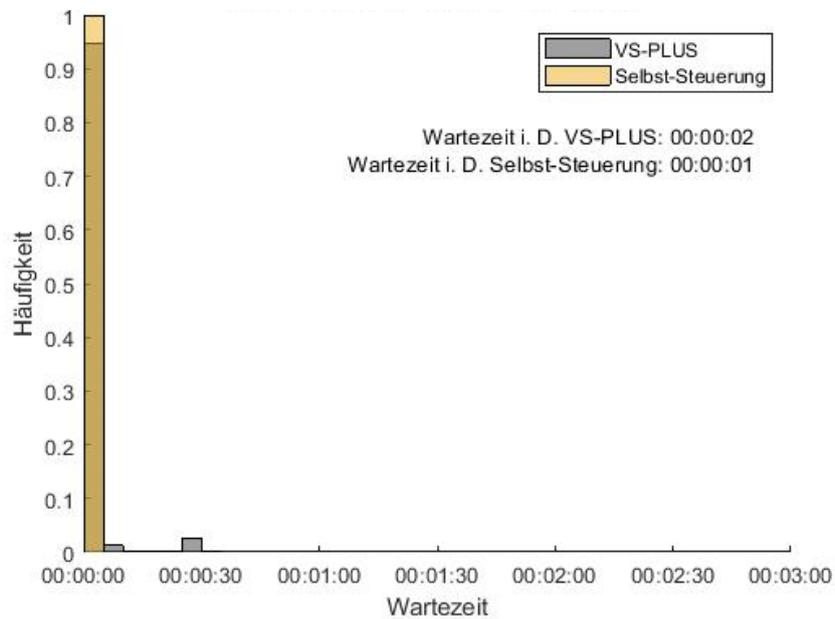


Abbildung 115: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 5 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

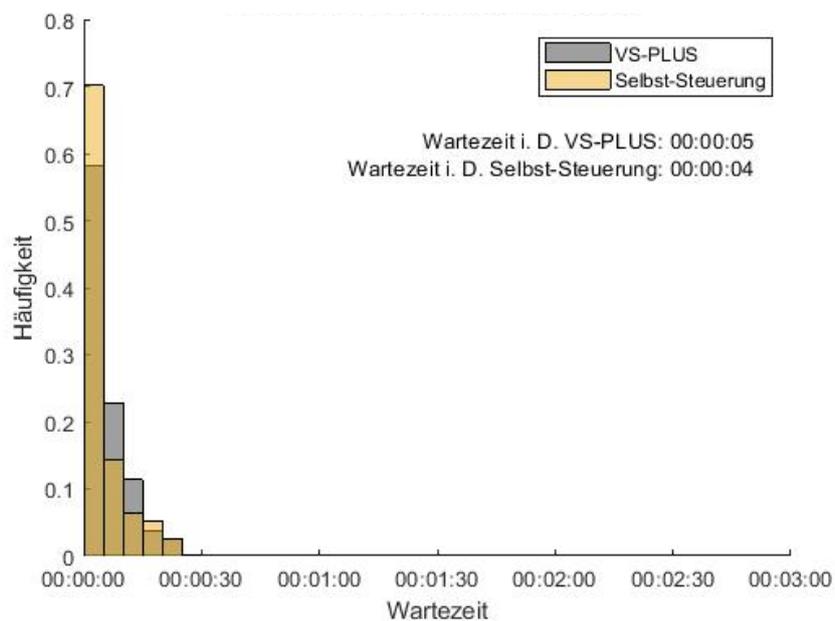


Abbildung 116: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 6 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

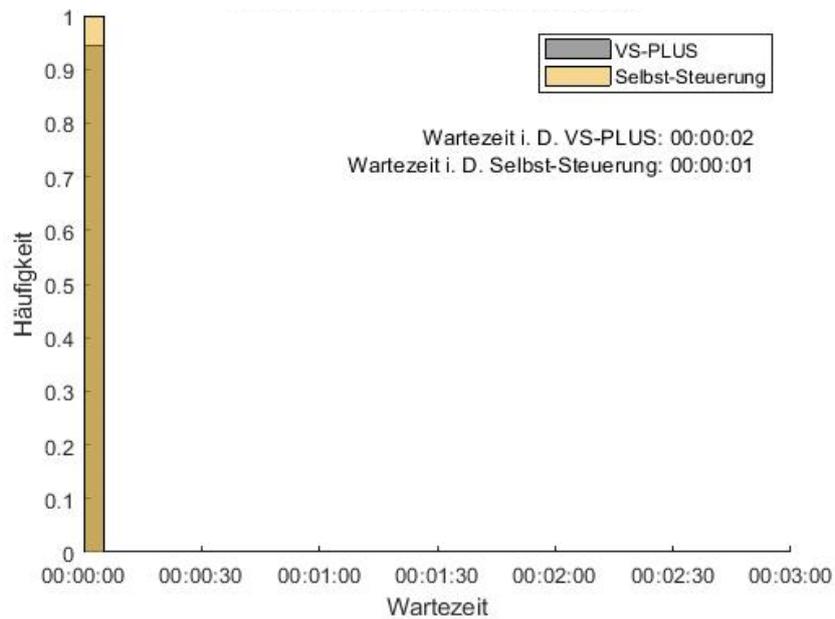


Abbildung 117: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 22,1 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

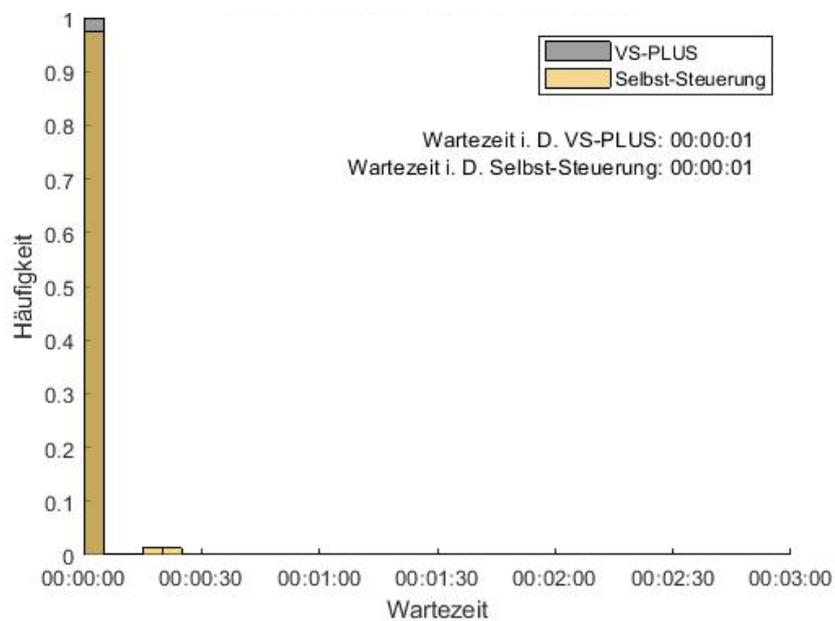


Abbildung 118: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 22,2 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

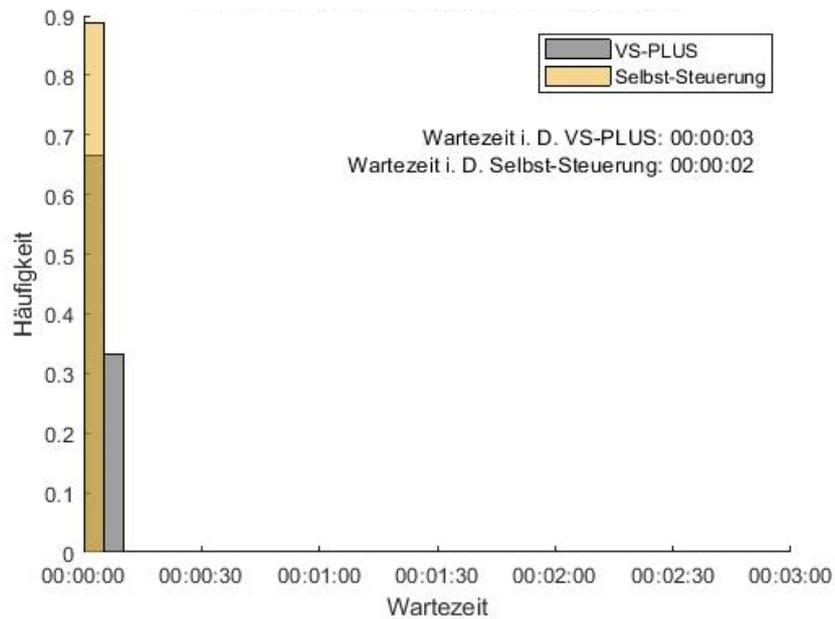


Abbildung 119: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 24 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

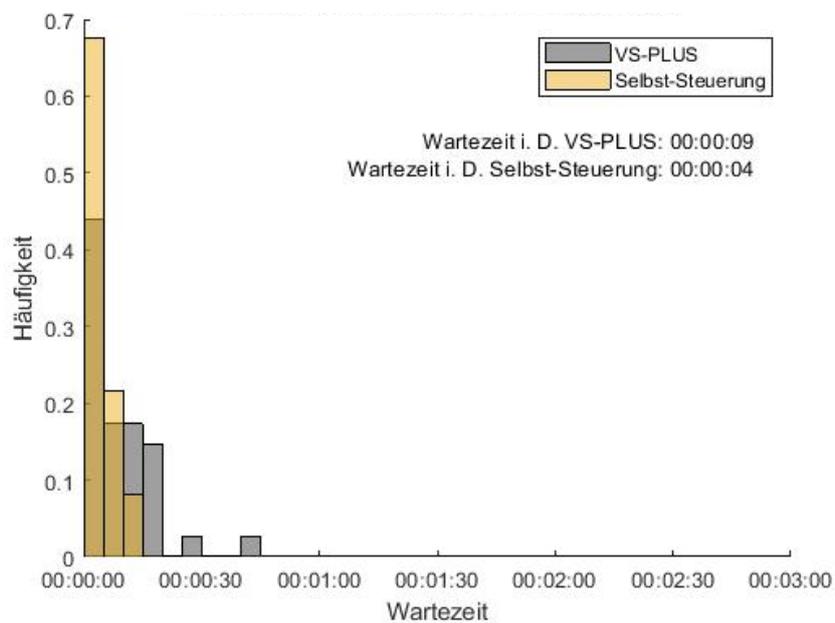


Abbildung 120: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 25 in der Abendspitze am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

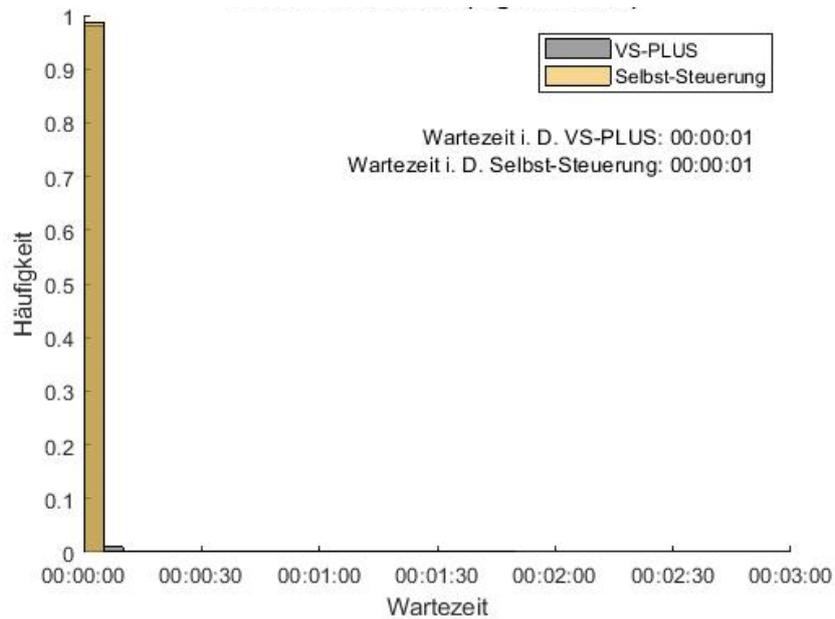


Abbildung 121: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 4 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

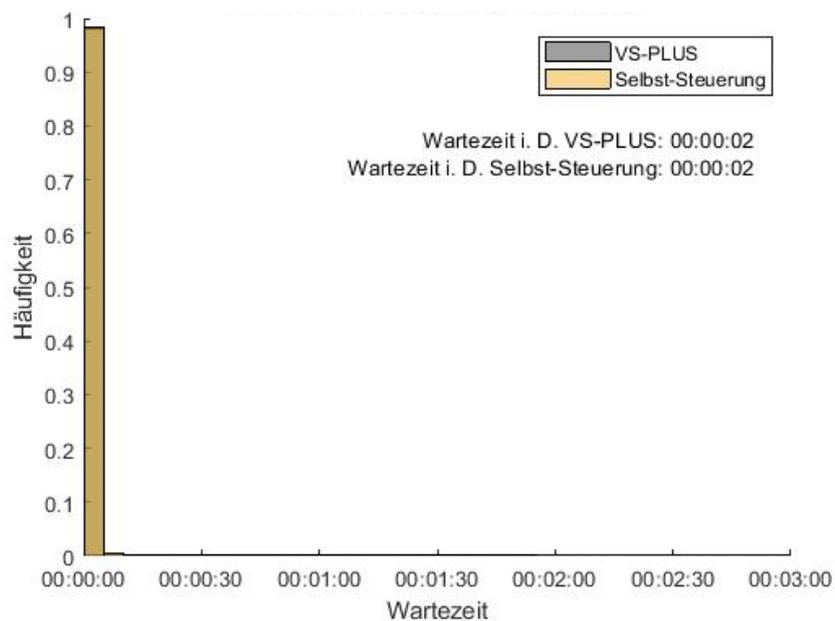


Abbildung 122: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 5 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

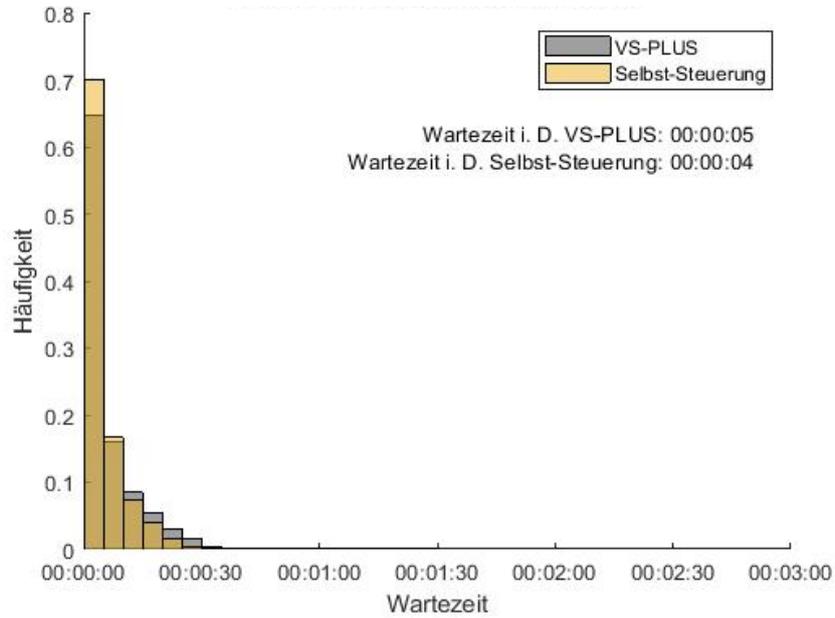


Abbildung 123: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 6 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

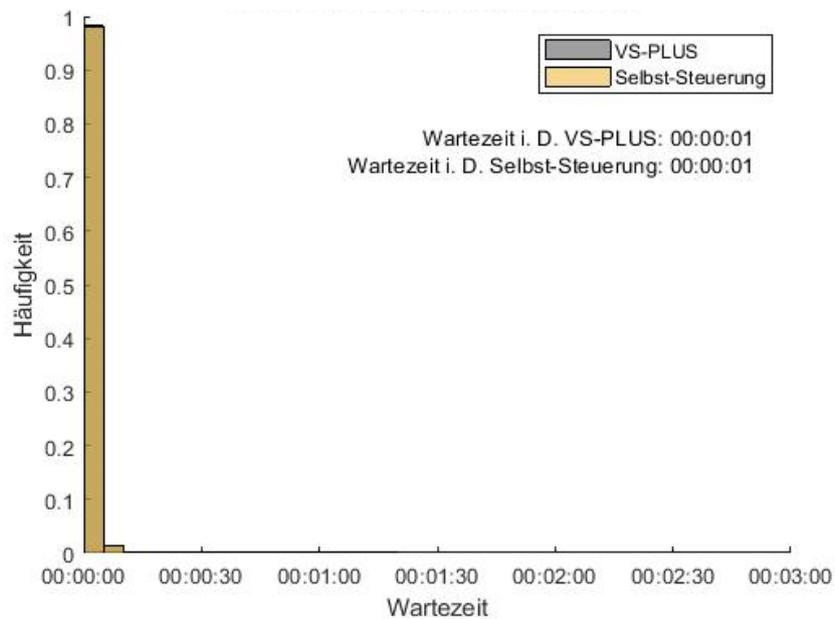


Abbildung 124: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 22,1 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

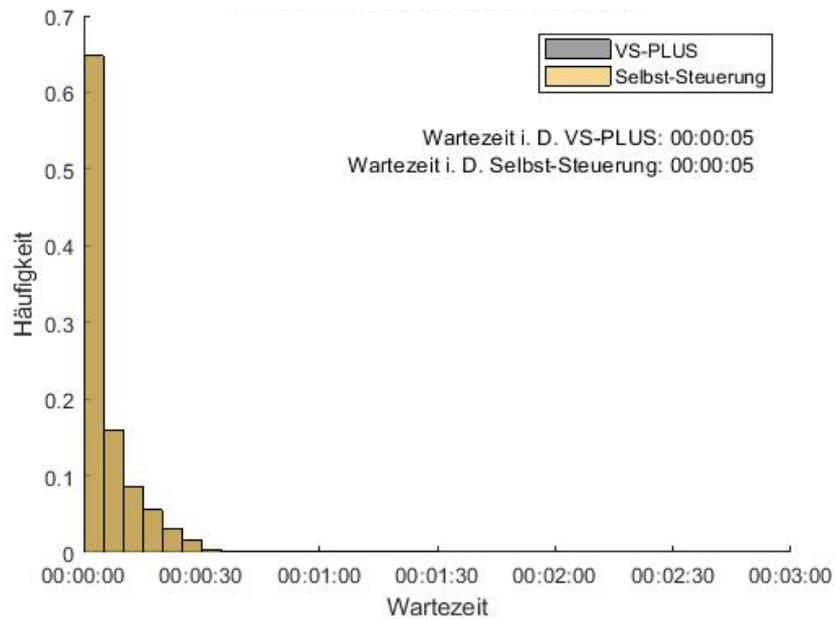


Abbildung 125: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 22,2 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

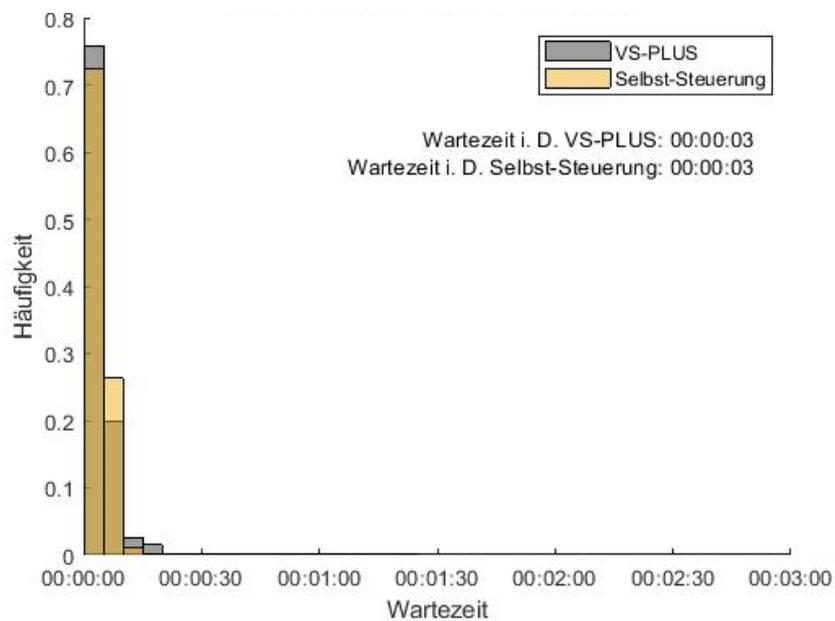


Abbildung 126: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 24 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

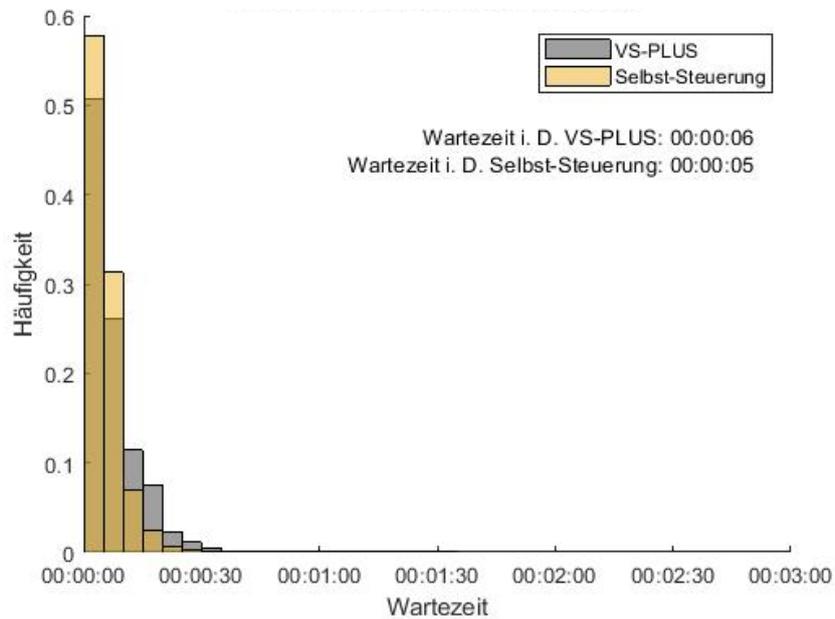


Abbildung 127: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 25 im gesamten Messzeitraum am Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

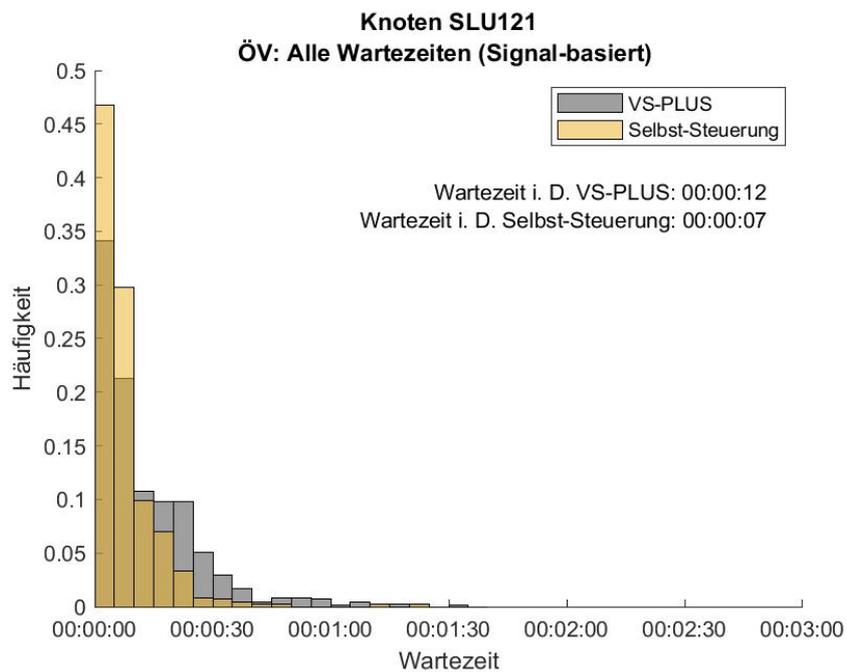


Abbildung 128: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV, mittwochs am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

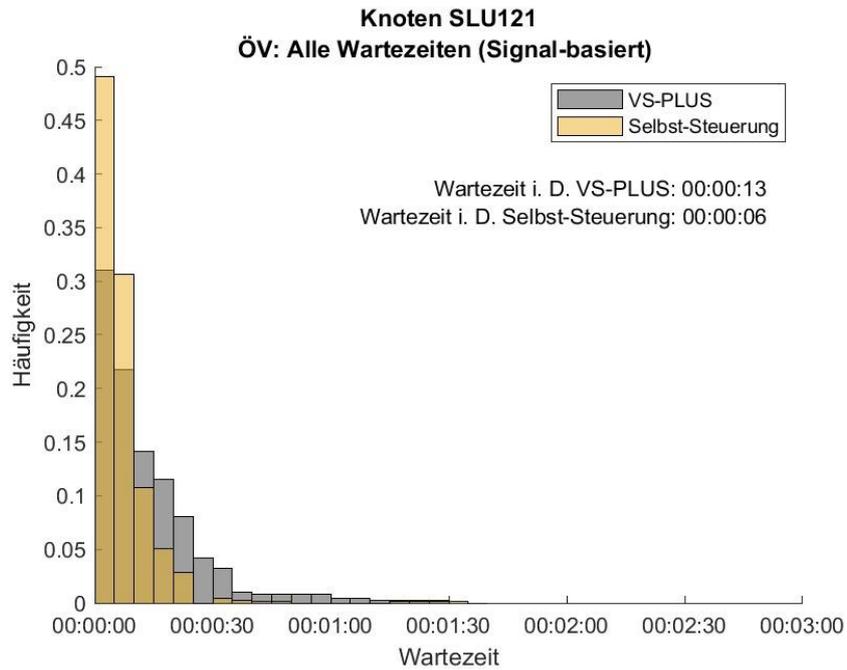


Abbildung 129: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV, donnerstags am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

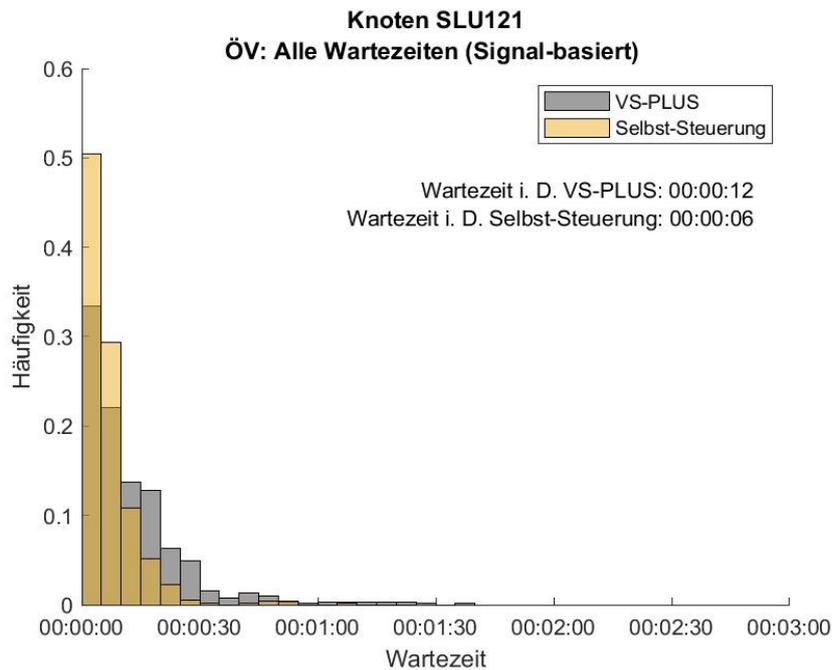


Abbildung 130: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV, freitags am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

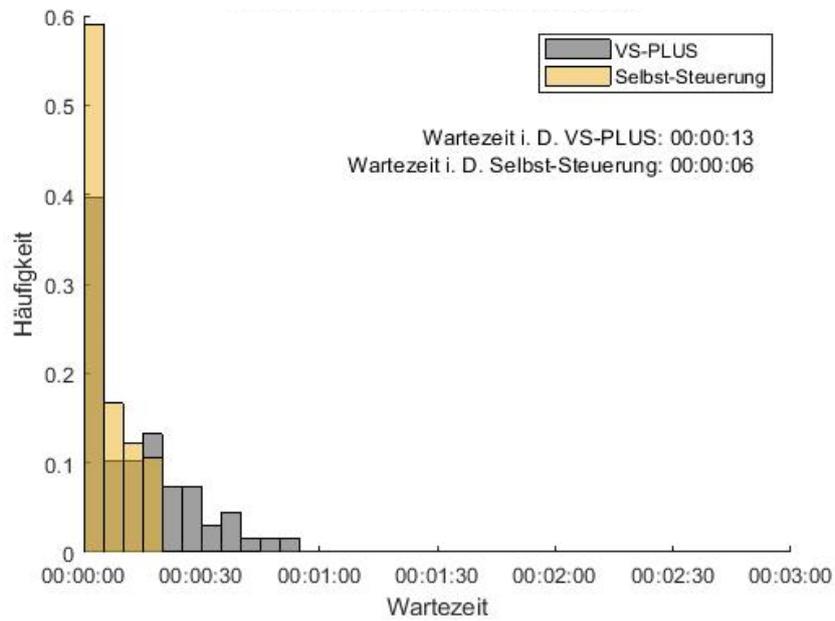


Abbildung 131: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 1 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

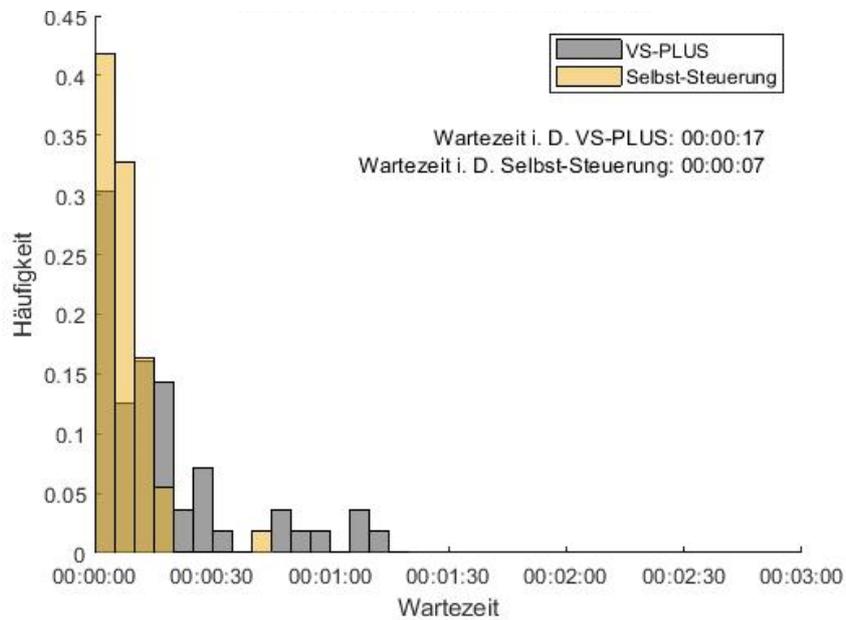


Abbildung 132: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 5 in der Morgenspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

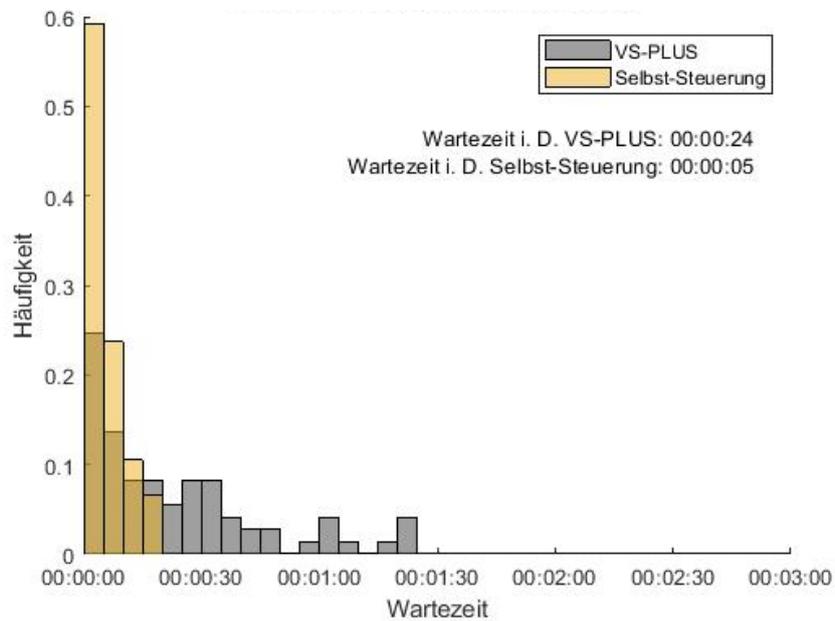


Abbildung 133: : Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 1 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

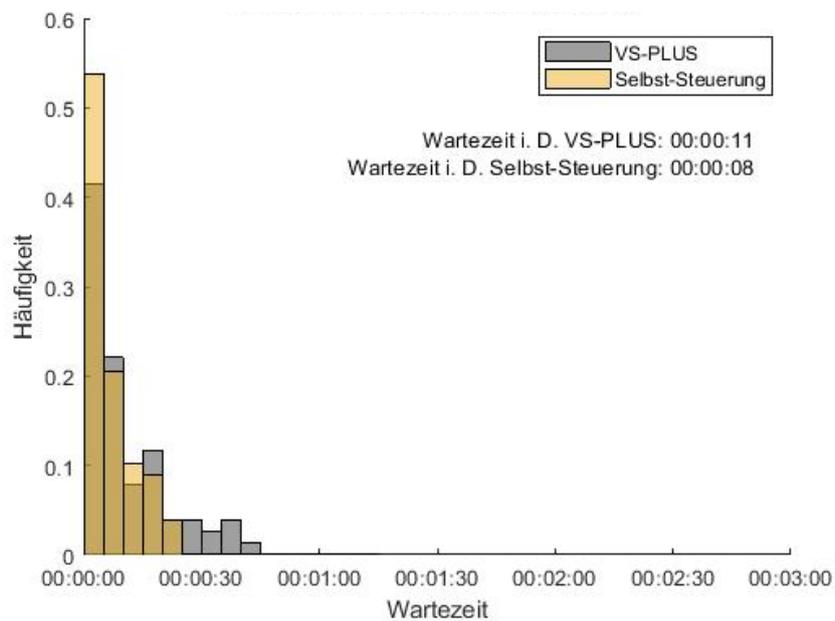


Abbildung 134: : Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 5 in der Abendspitze am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

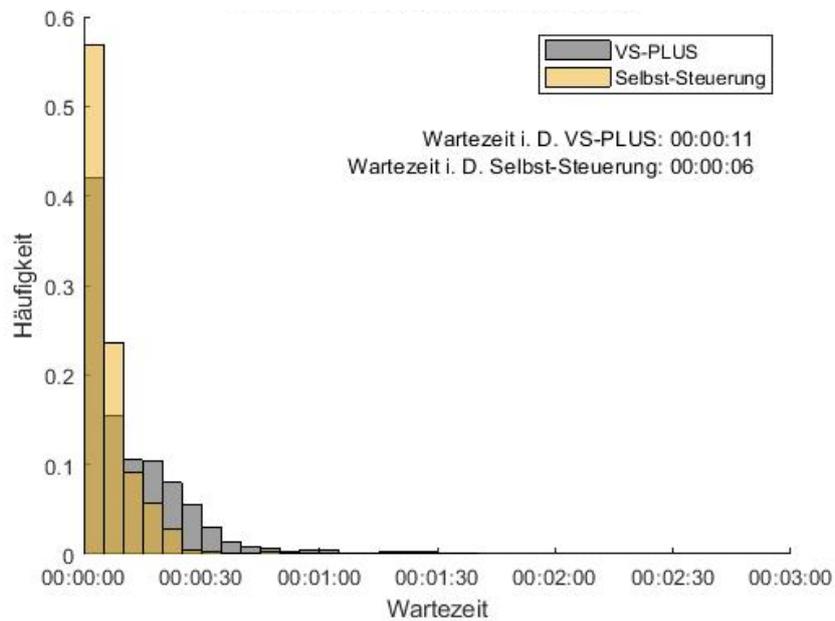


Abbildung 135: : Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 1 am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

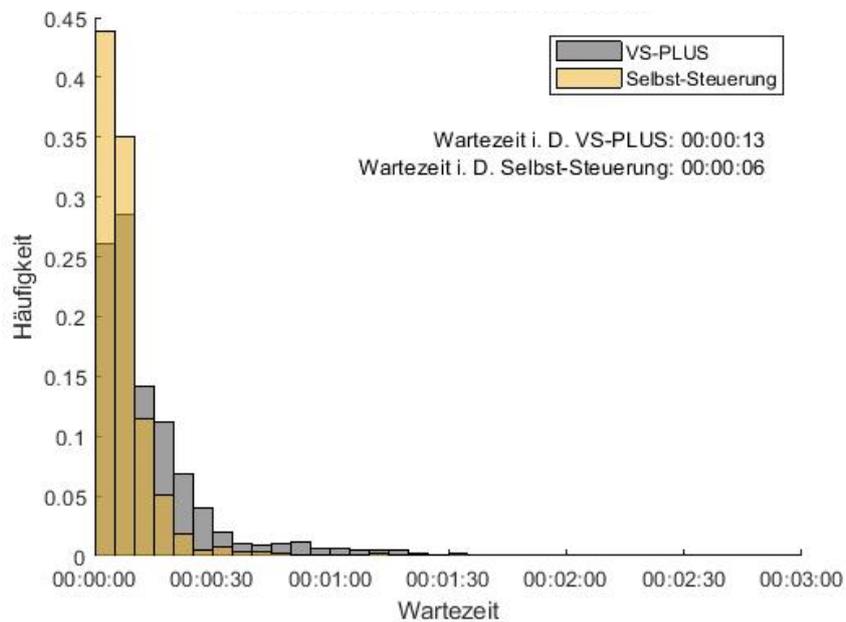


Abbildung 136: : Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den ÖV am Signalgeber 5 am Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

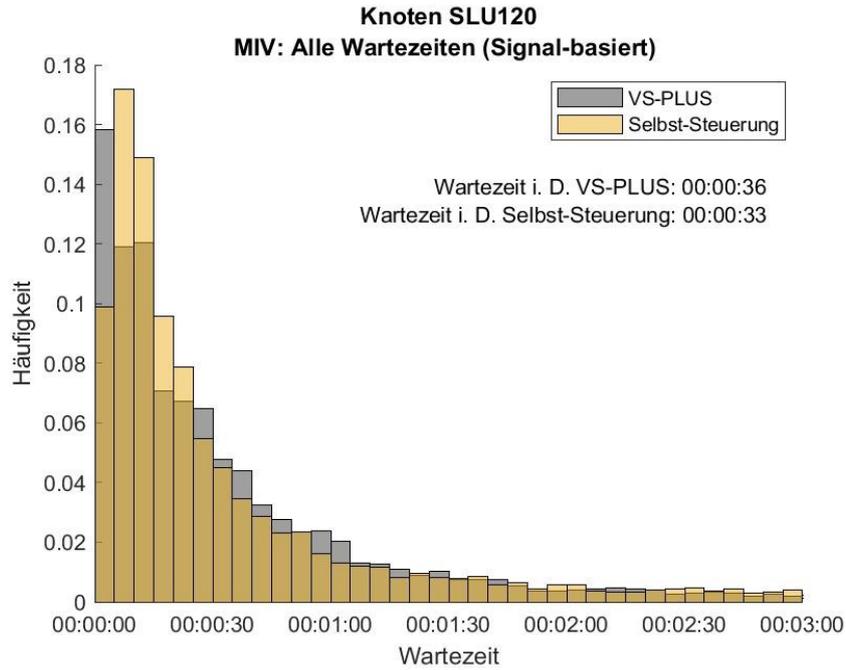


Abbildung 137: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Mittwoch, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

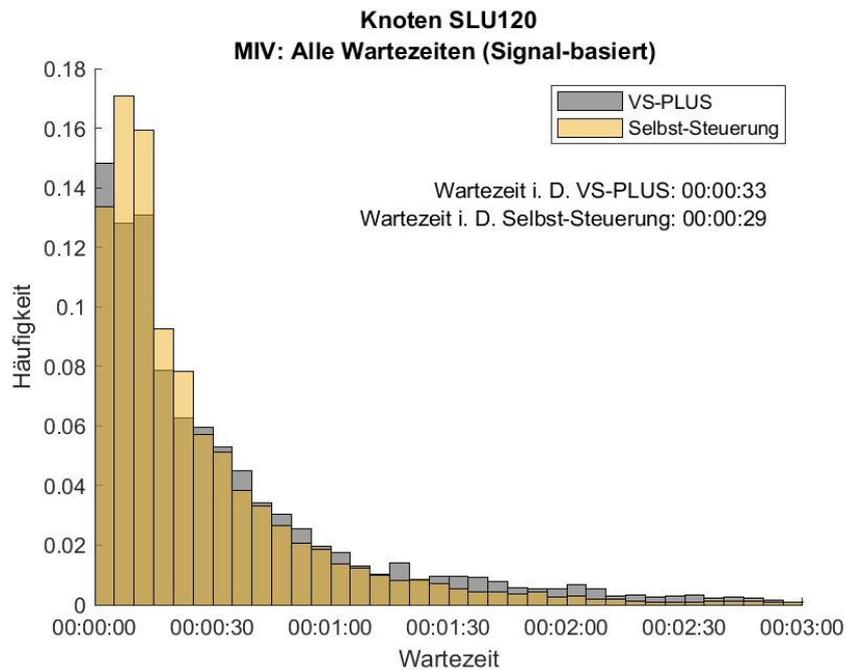


Abbildung 138: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Donnerstag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

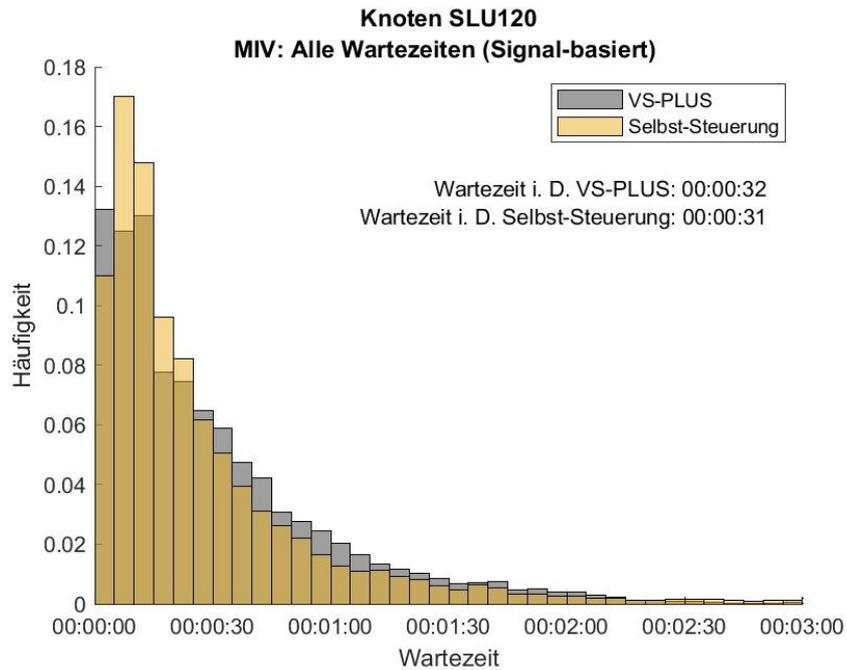


Abbildung 139: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Freitag, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

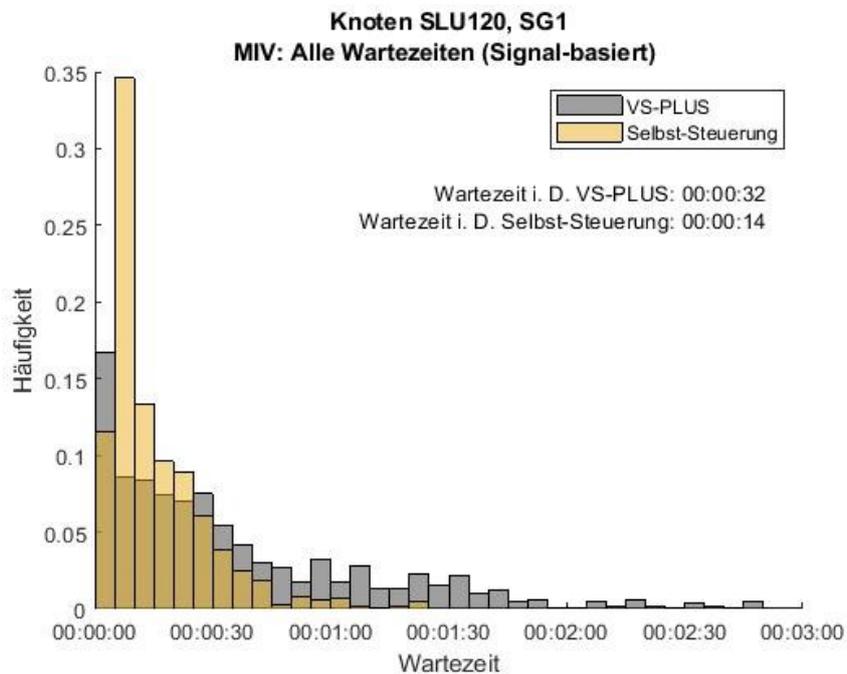


Abbildung 140: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 1, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

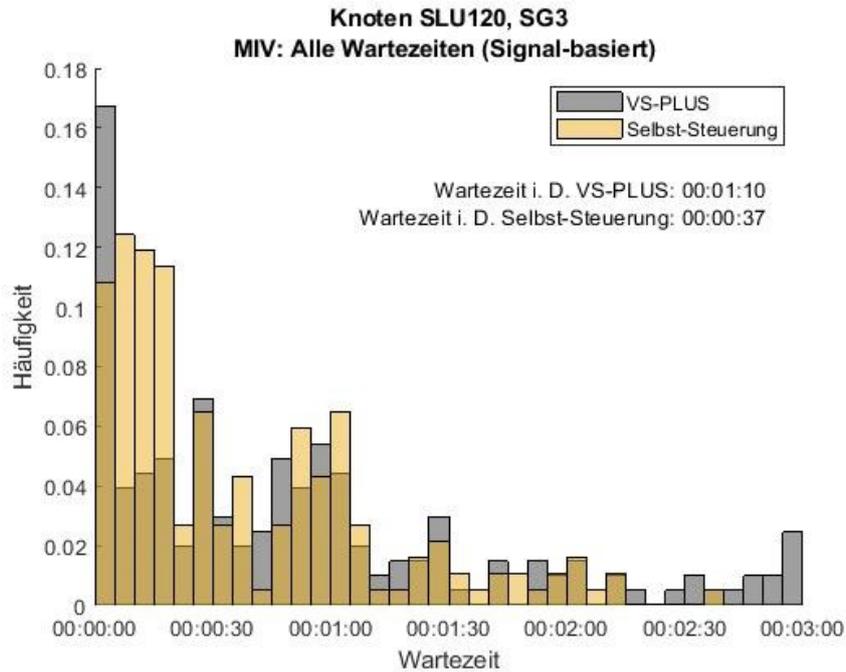


Abbildung 141: : Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 3, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

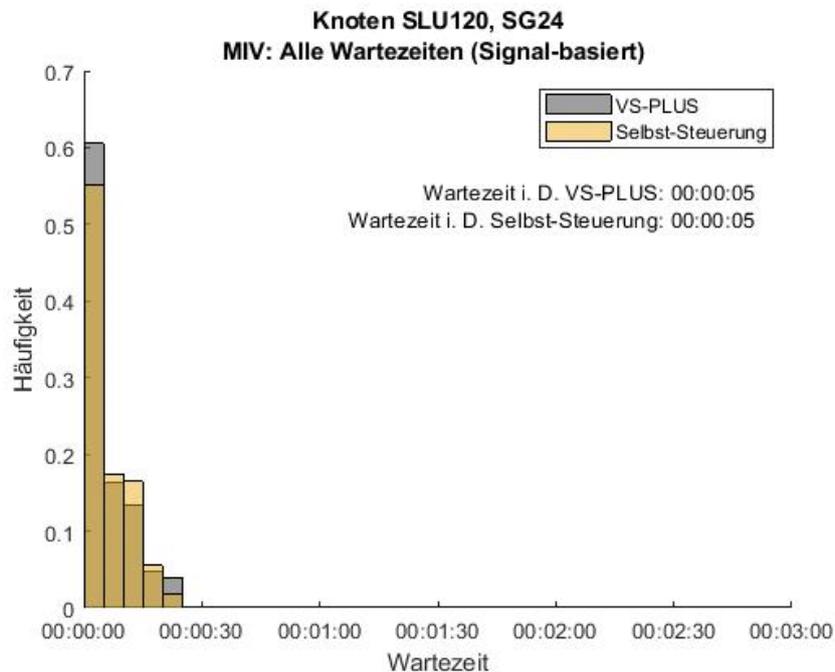


Abbildung 142: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 24, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

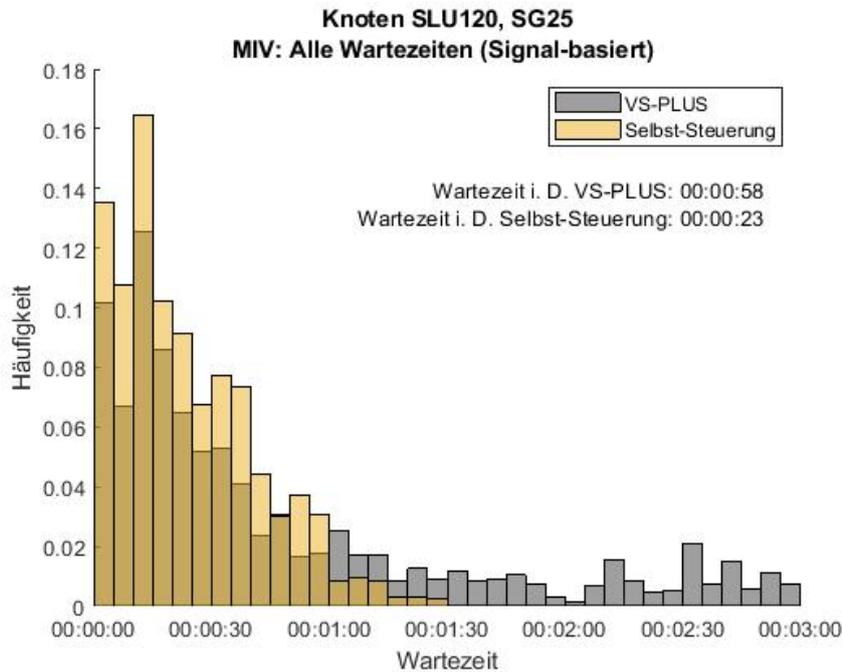


Abbildung 143: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 25, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

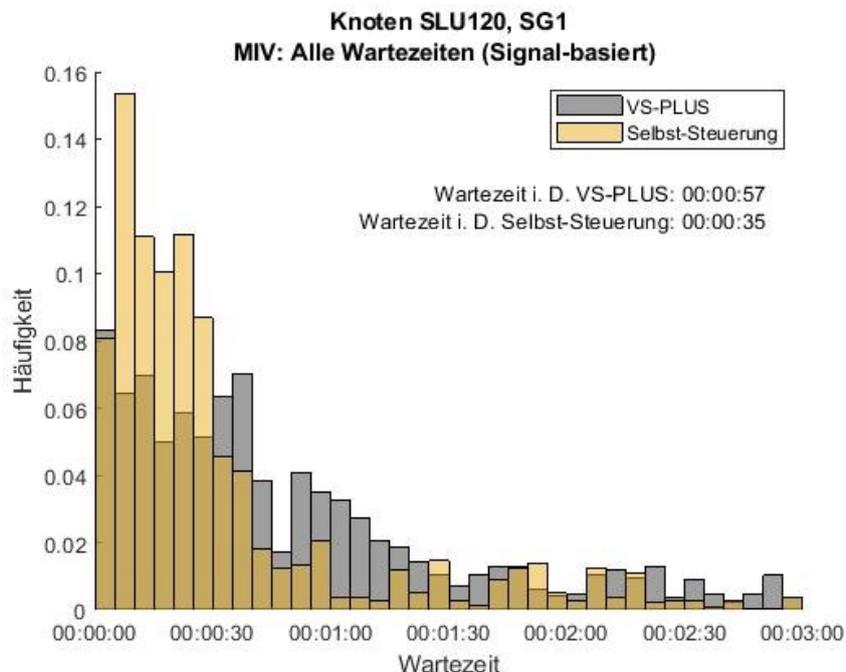


Abbildung 144: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 1, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

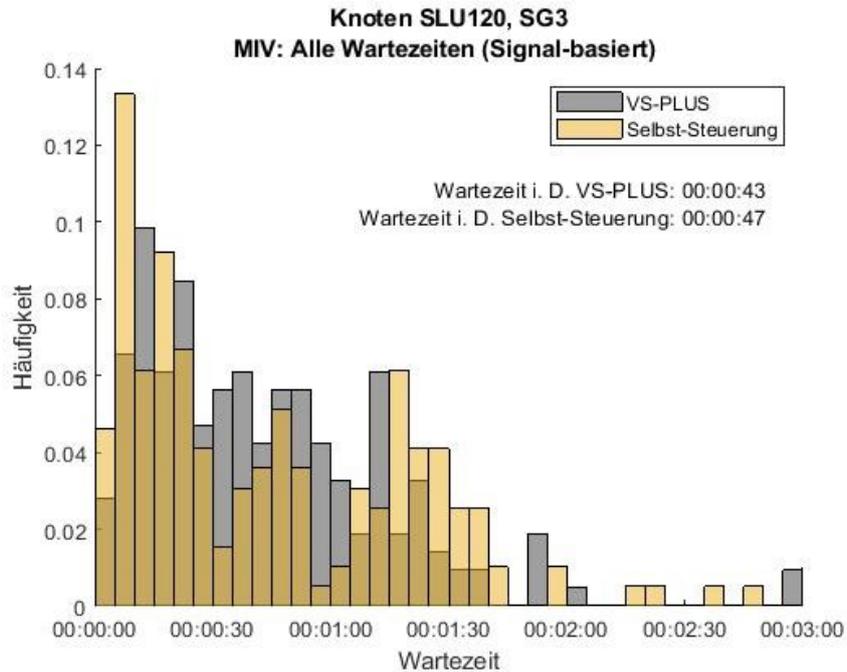


Abbildung 145: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 3, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

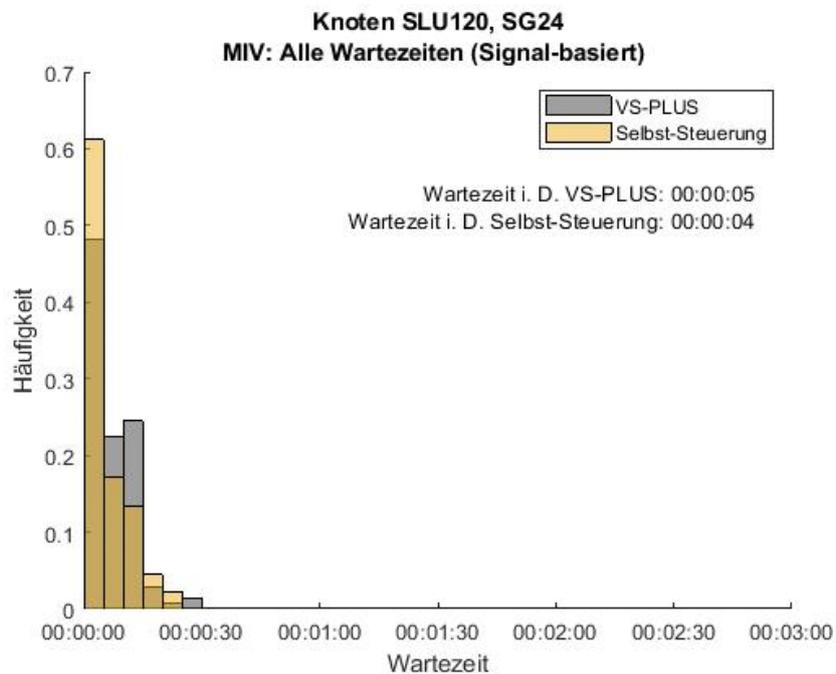


Abbildung 146: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 24, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

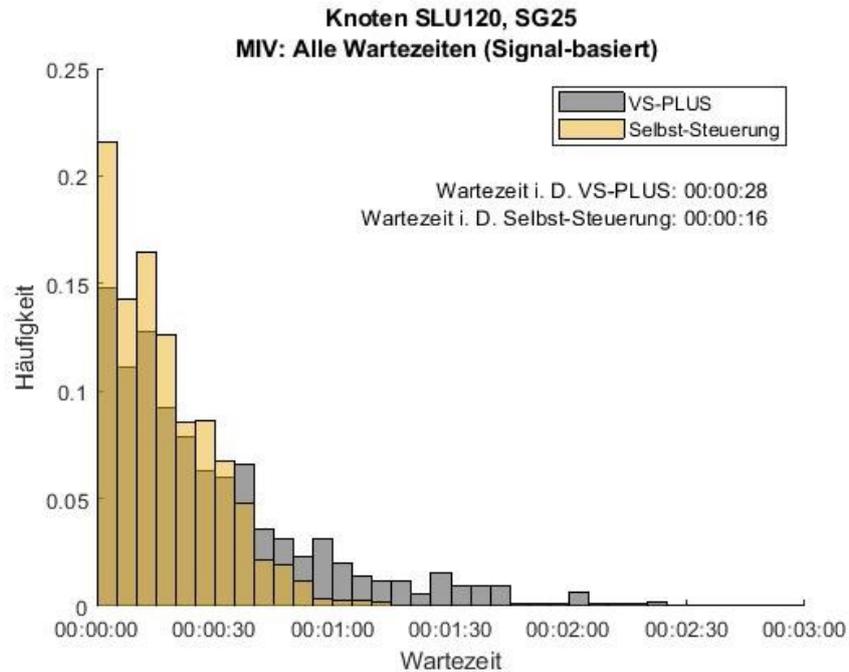


Abbildung 147: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 25, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

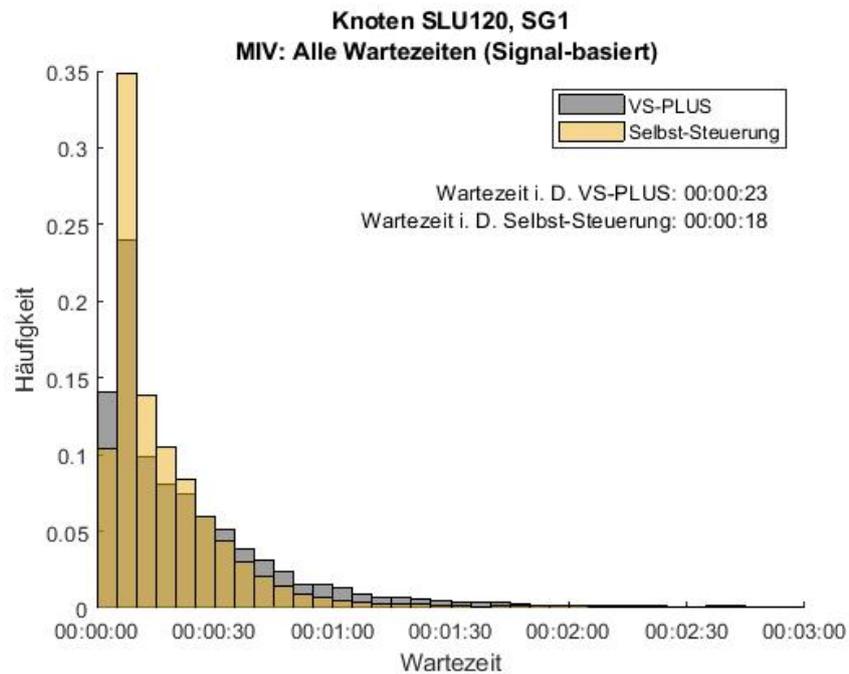


Abbildung 148: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV, Signalgeber 1, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

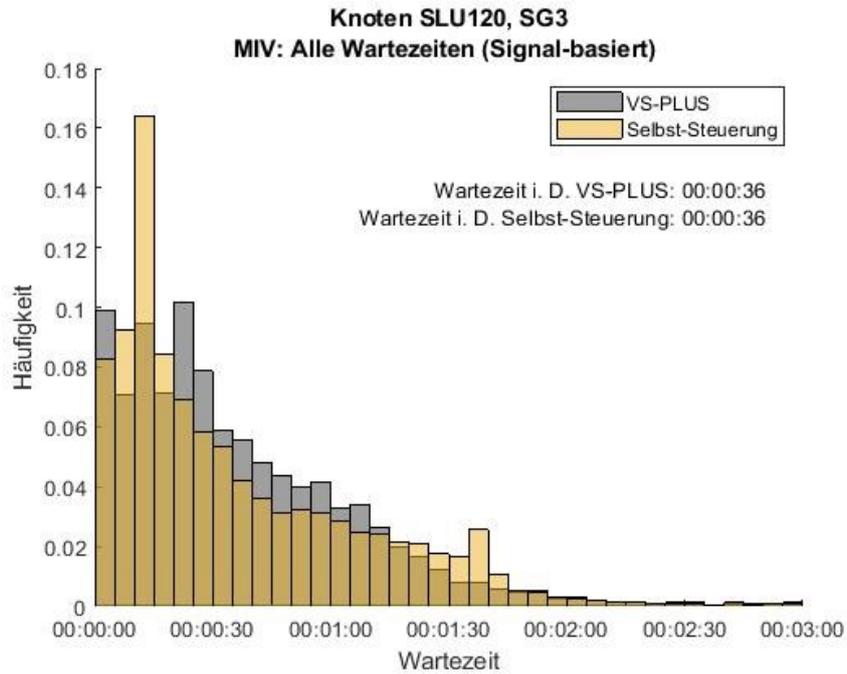


Abbildung 149: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV, Signalgeber 3, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

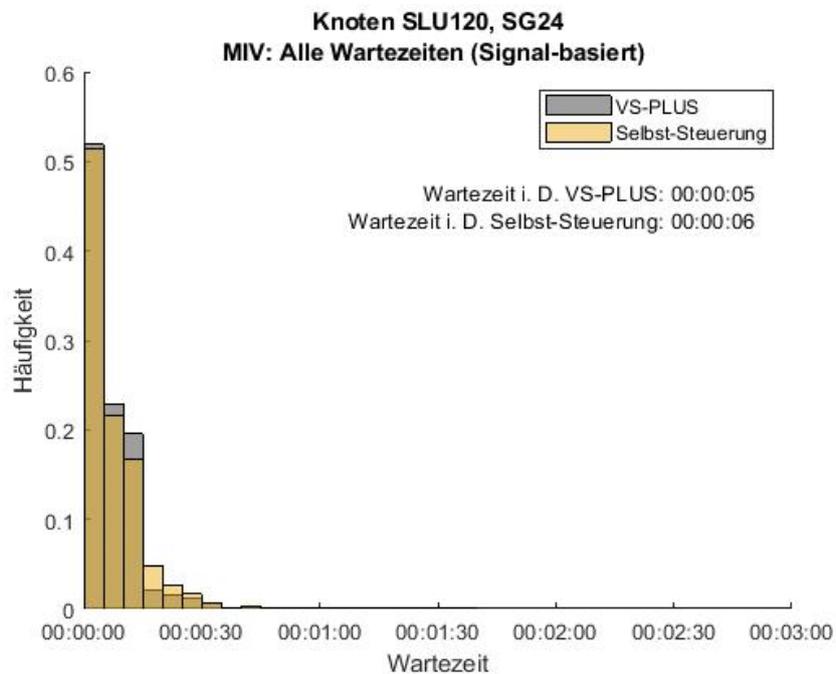


Abbildung 150: : Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV, Signalgeber 24, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

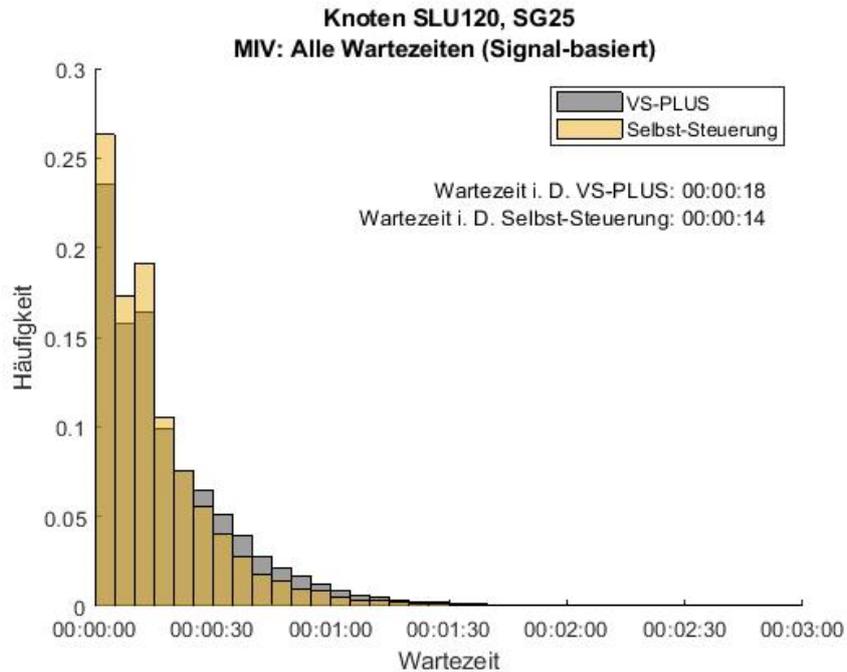


Abbildung 151: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV, Signalgeber 25, Knoten SLU120. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

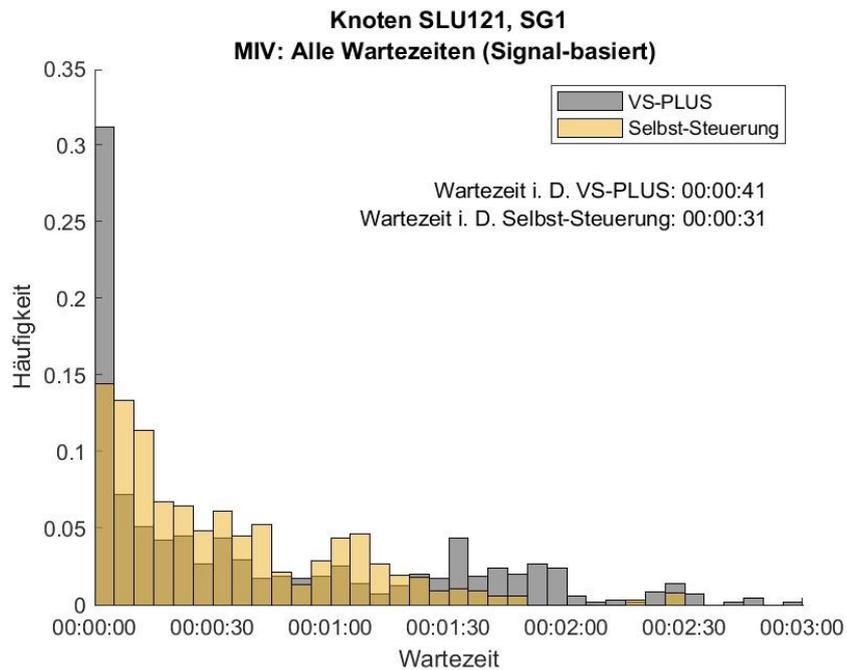


Abbildung 152: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 2, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

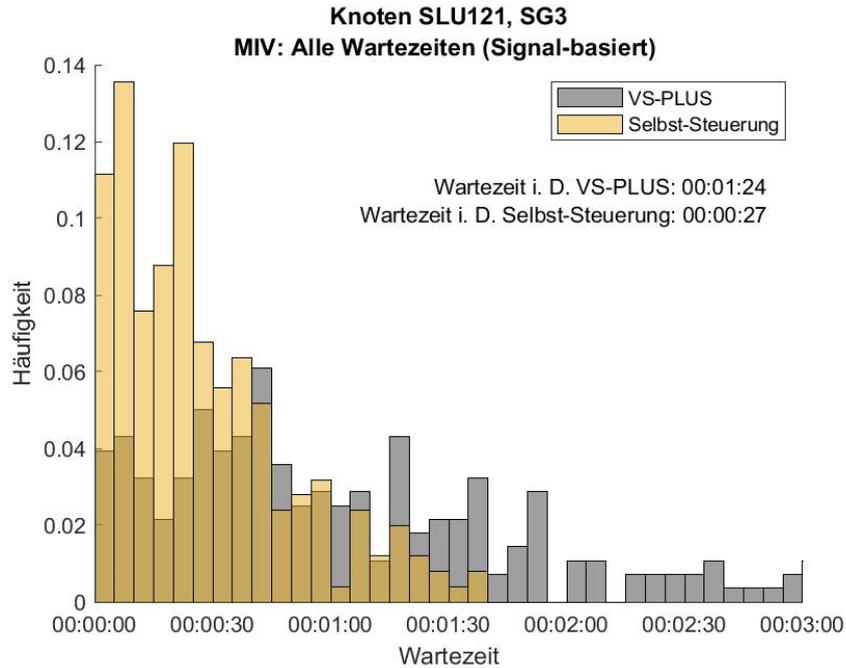


Abbildung 153: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 3, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

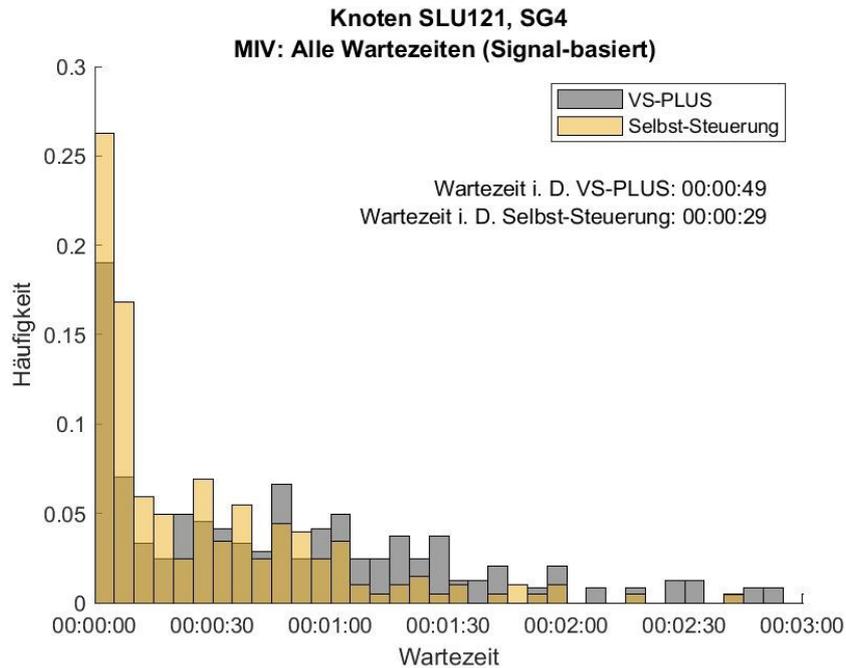


Abbildung 154: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 4, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

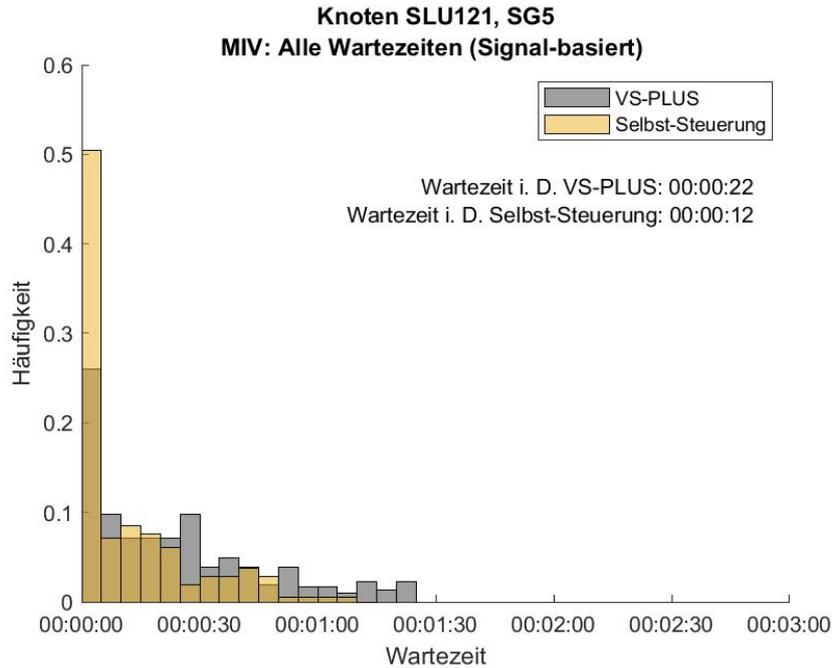


Abbildung 155: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Morgenspitze, Signalgeber 5, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

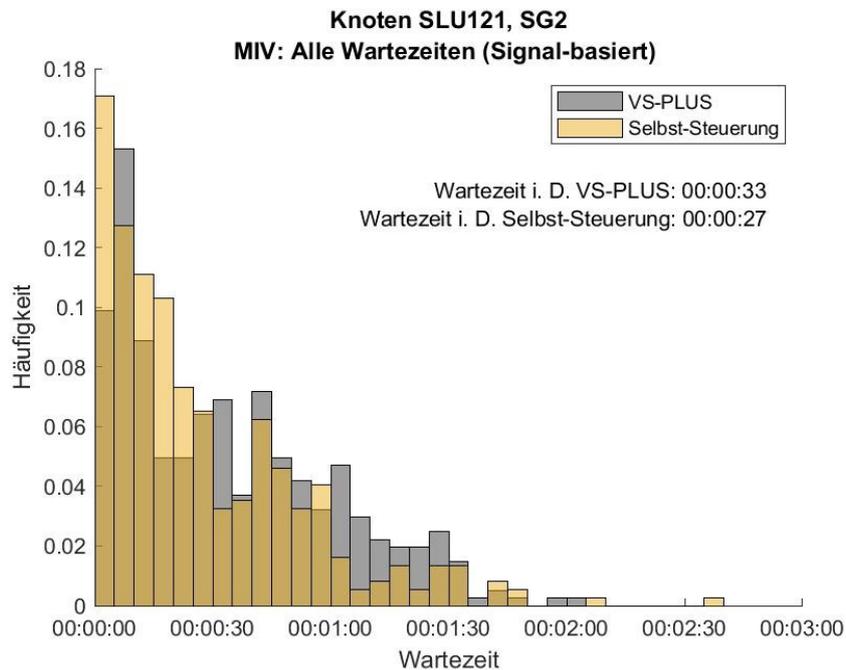


Abbildung 156: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 2, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

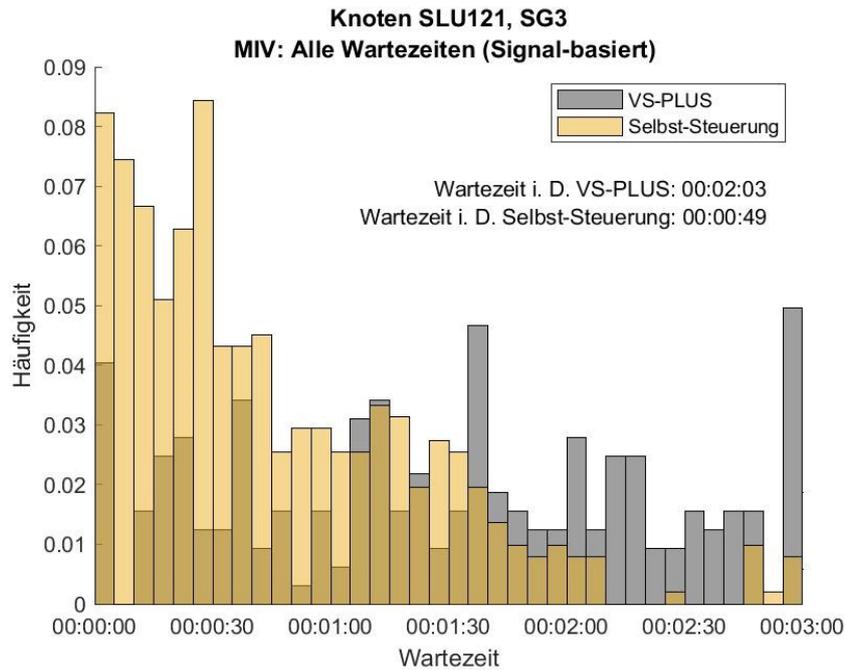


Abbildung 157: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 3, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

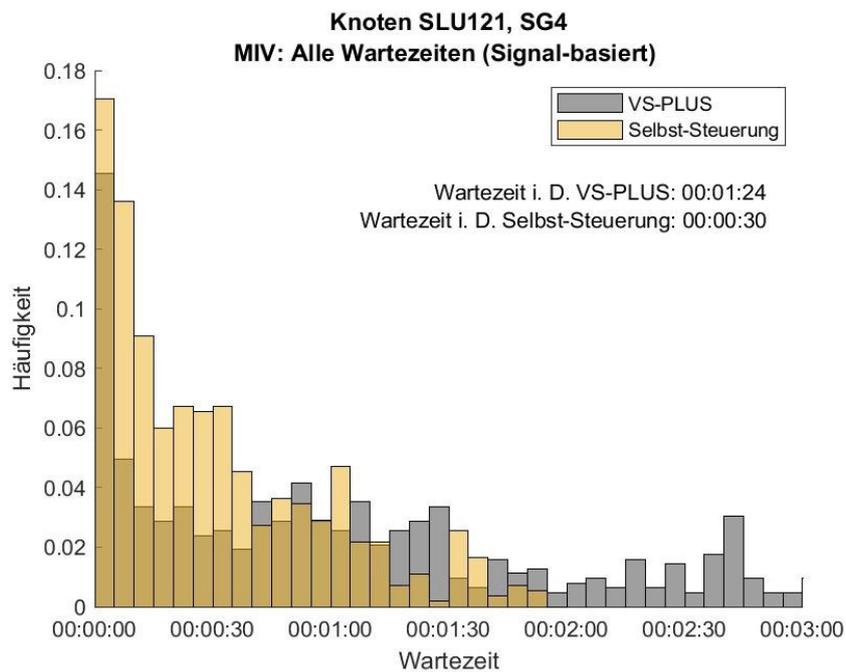


Abbildung 158: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 4, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

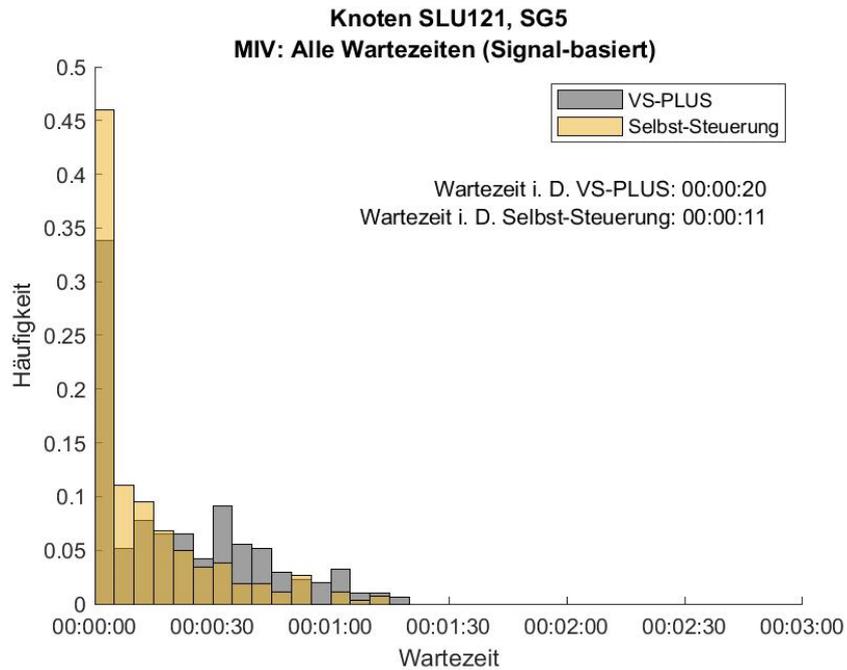


Abbildung 159: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV in der dienstags Abendspitze, Signalgeber 5, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

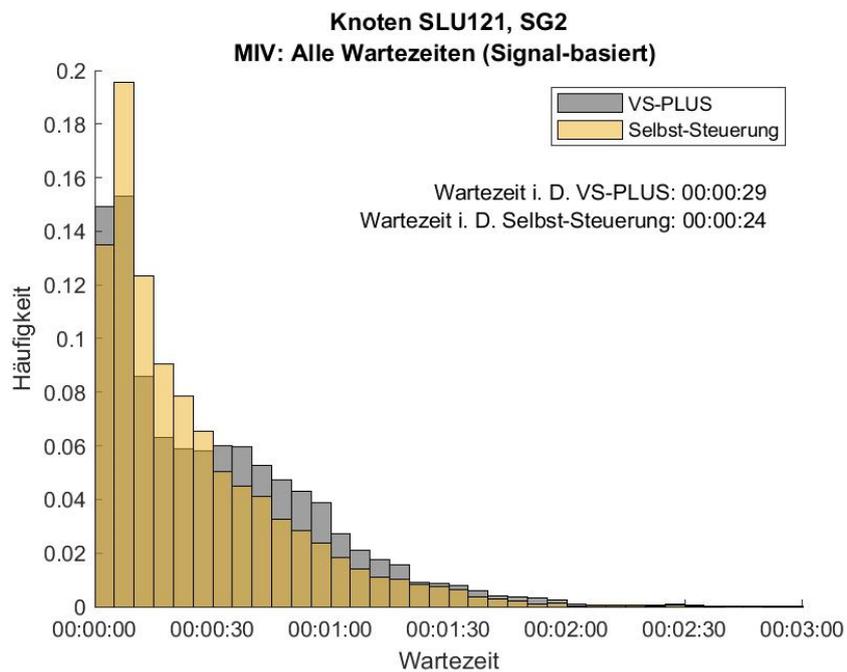


Abbildung 160: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV im gesamten Messzeitraum, Signalgeber 2, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

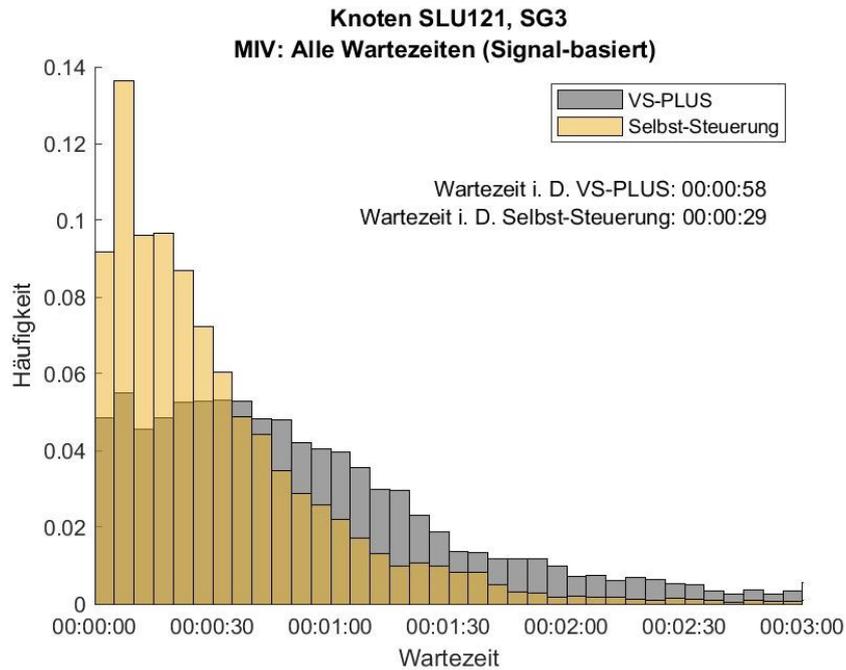


Abbildung 161: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV im gesamten Messzeitraum, Signalgeber 3, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

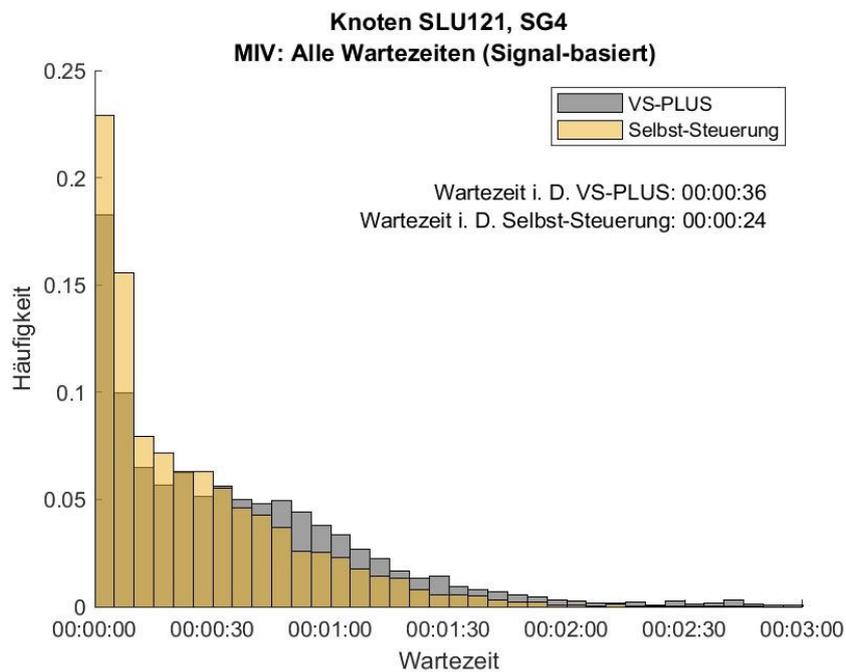


Abbildung 162: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV im gesamten Messzeitraum, Signalgeber 4, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

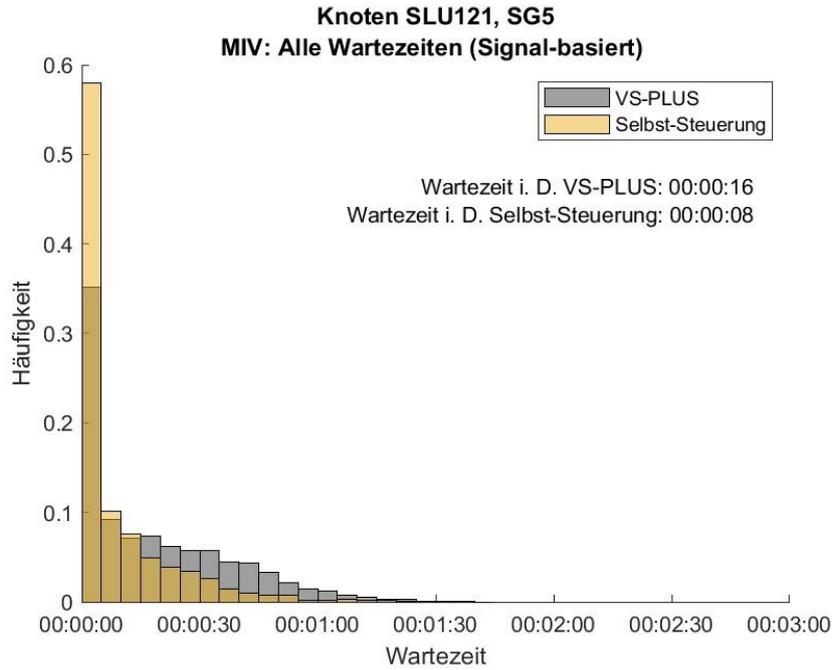


Abbildung 163: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV im gesamten Messzeitraum, Signalgeber 5, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

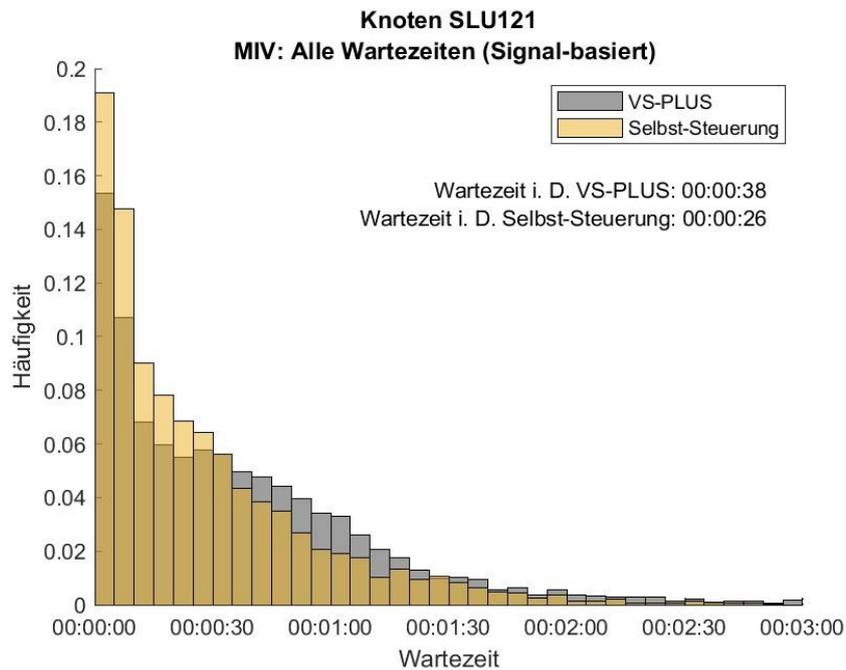


Abbildung 164: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Mittwoch, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

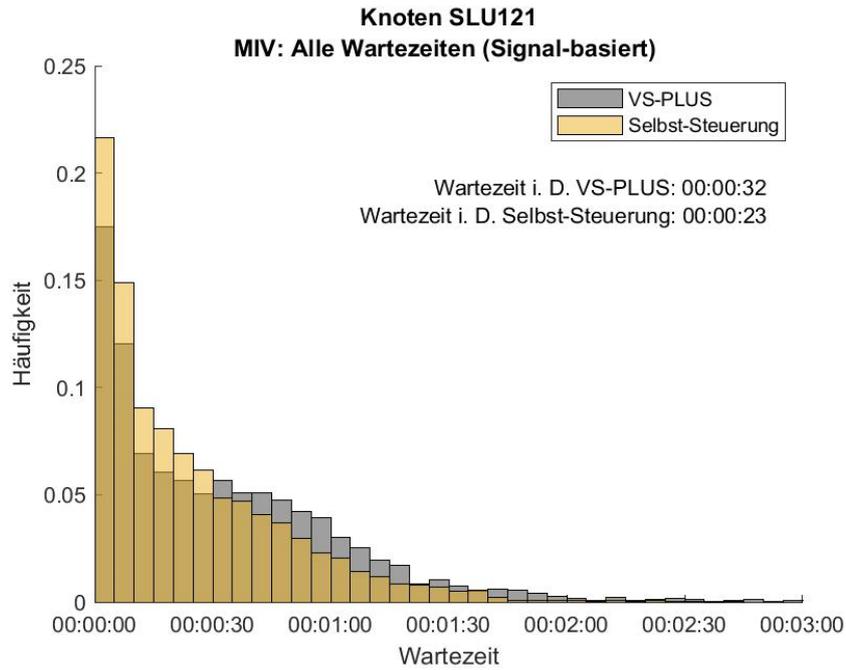


Abbildung 165: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Donnerstag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

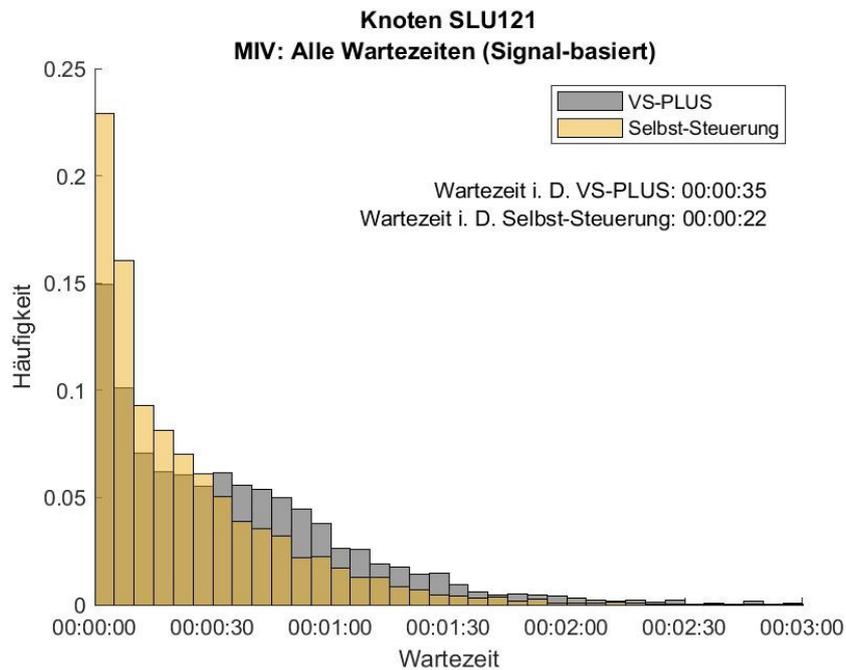


Abbildung 166: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten für den MIV am Freitag, Knoten SLU121. In Grau ist die Verteilung des Nullfalles (VS-PLUS) und in Gelb die der Selbst-Steuerung abgebildet.

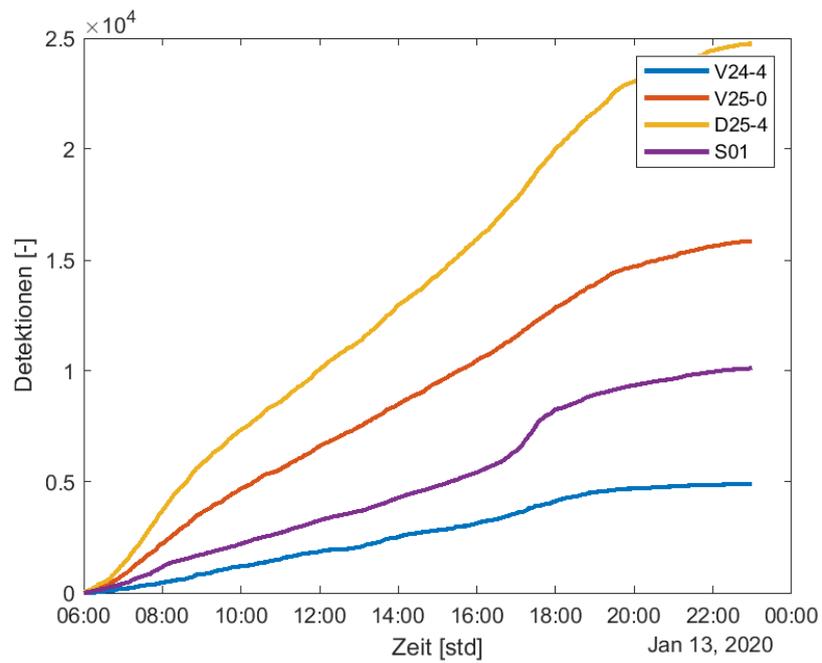


Abbildung 167: Kumulierte Detektionen für die Detektoren V24-4, V25-0, D25-4 und S01 am Knoten SLU120.

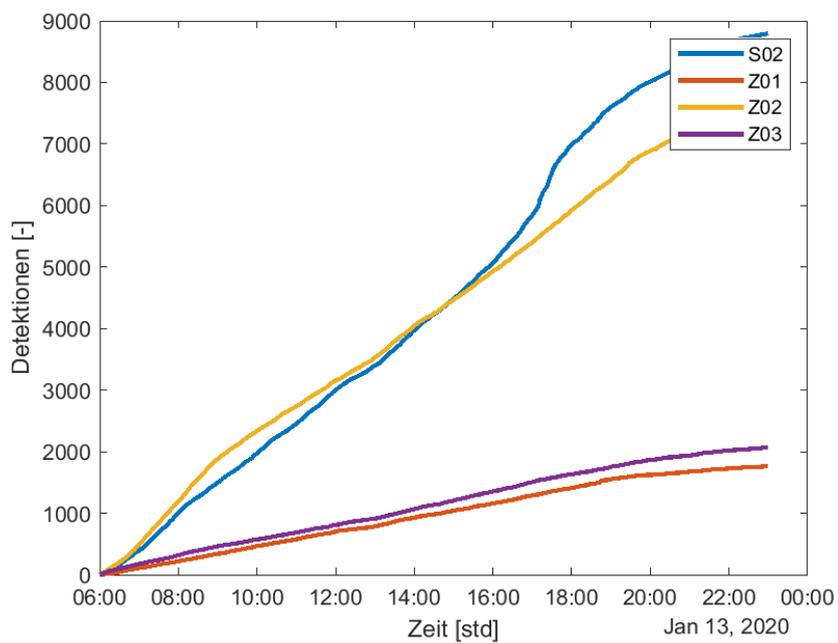


Abbildung 168: Kumulierte Detektionen für die Detektoren S02, Z01, Z02 und Z03 am Knoten SLU120.

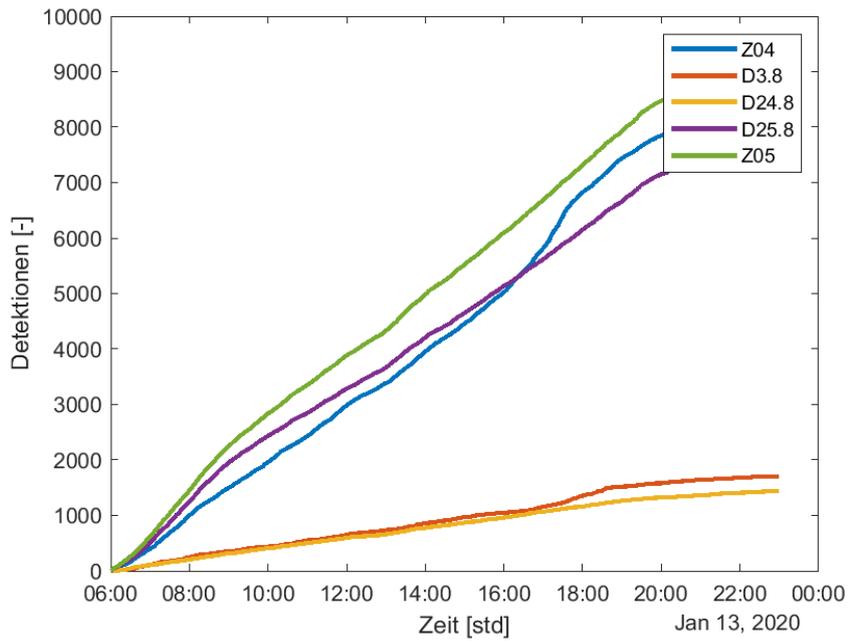


Abbildung 169: Kumulierte Detektionen für die Detektoren Z04, D3.8, D24.8, D25.8 und Z05 am Knoten SLU120.

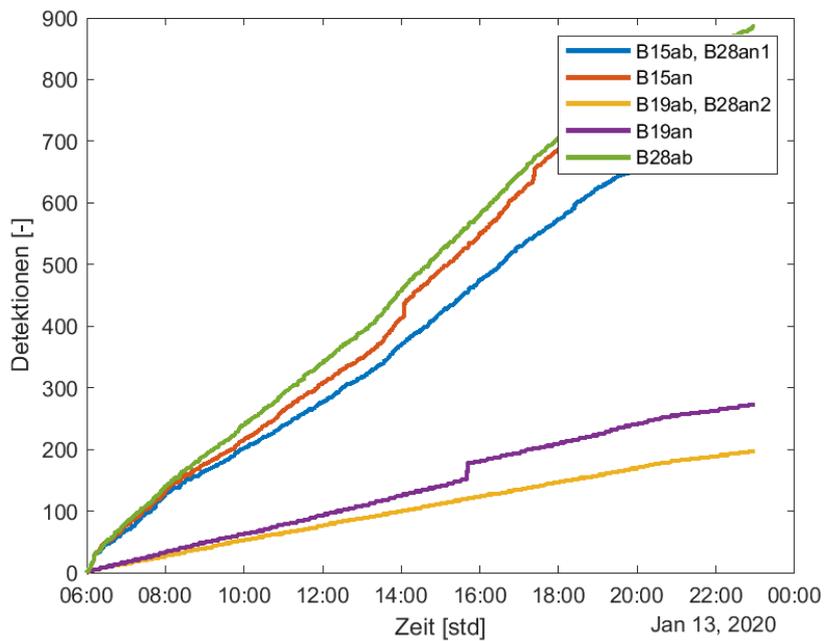


Abbildung 170: Kumulierte Detektionen für die Detektoren B15an, B28an1; B15an; B19an, B28an2; B19an und B28ab am Knoten SLU120.

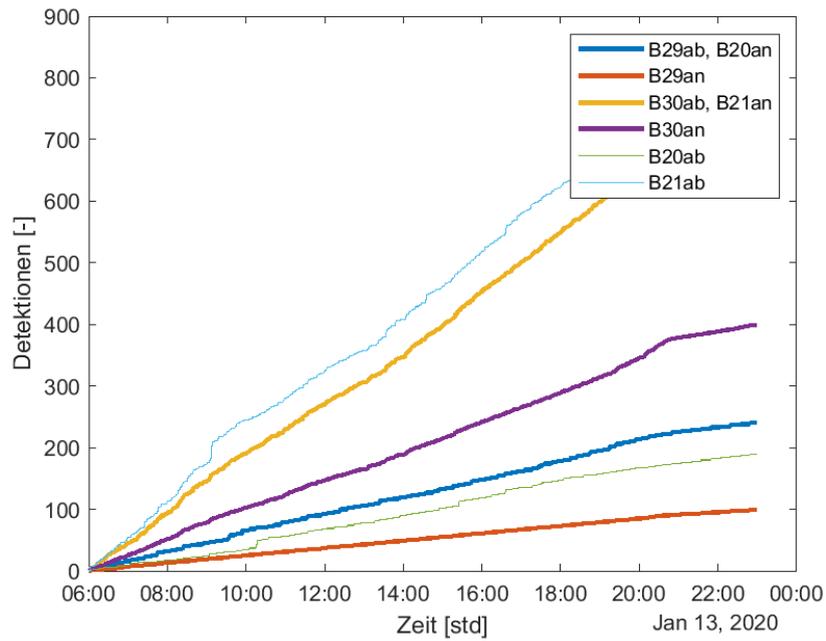


Abbildung 171: Kumulierte Detektionen für die Detektoren B29an, B20an; B29an; B30an, B21an; B30an; B20ab; B21ab am Knoten SLU120.

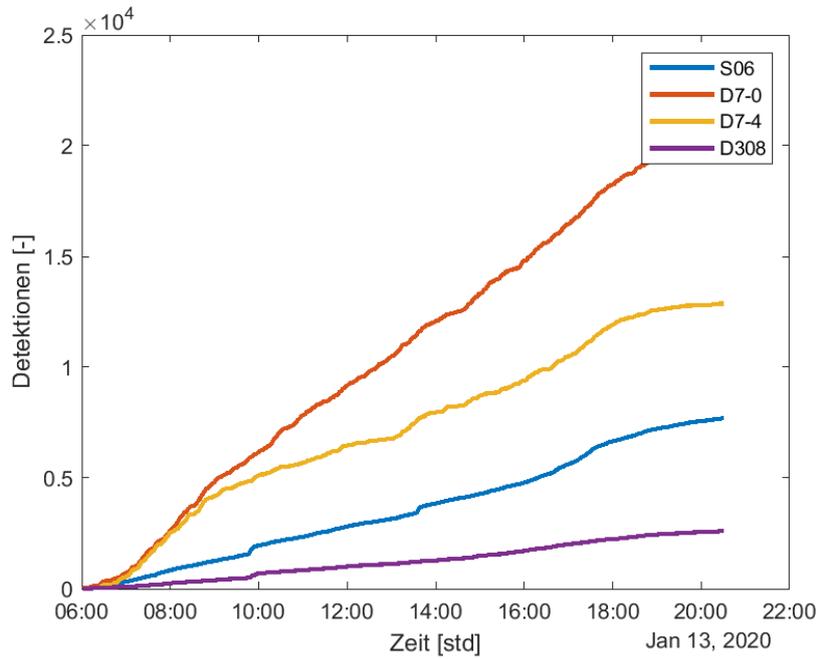


Abbildung 172: Kumulierte Detektionen für die Detektoren S06, D 7-0, D7-4 und D308 am Knoten SLU121.

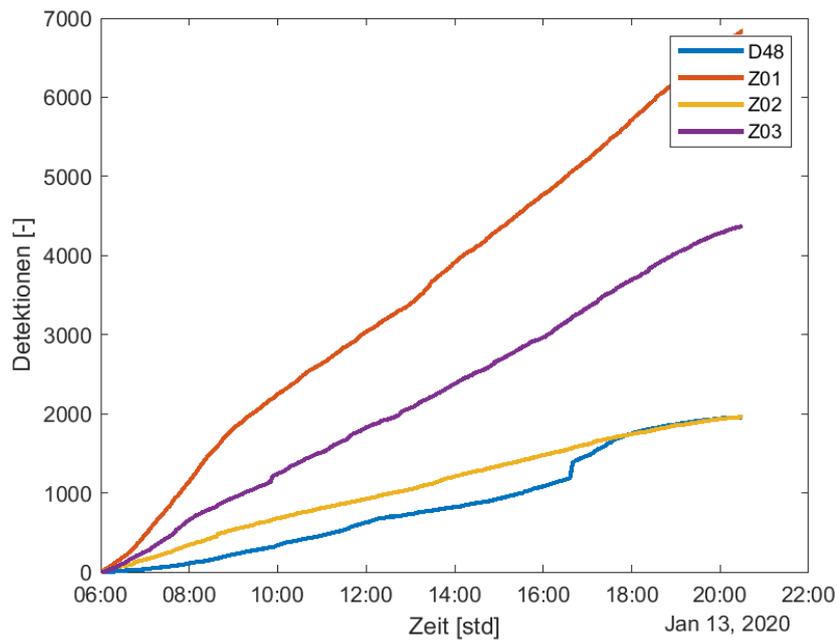


Abbildung 173: Kumulierte Detektionen für die Detektoren D48, Z01, Z02 und Z03 am Knoten SLU121.

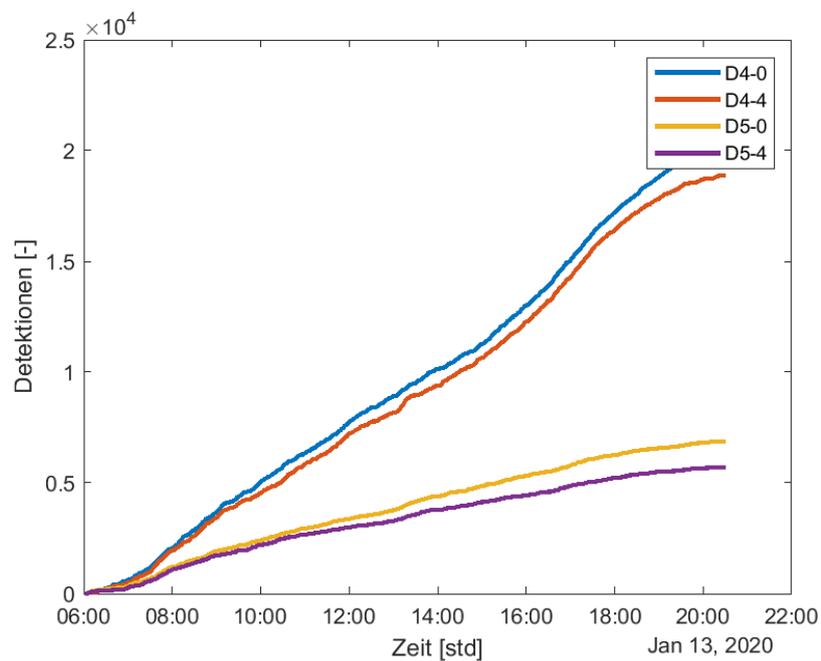


Abbildung 174: Kumulierte Detektionen für die Detektoren D 4-0, D 4-4, D 5-0 und D 5-4 am Knoten SLU121.

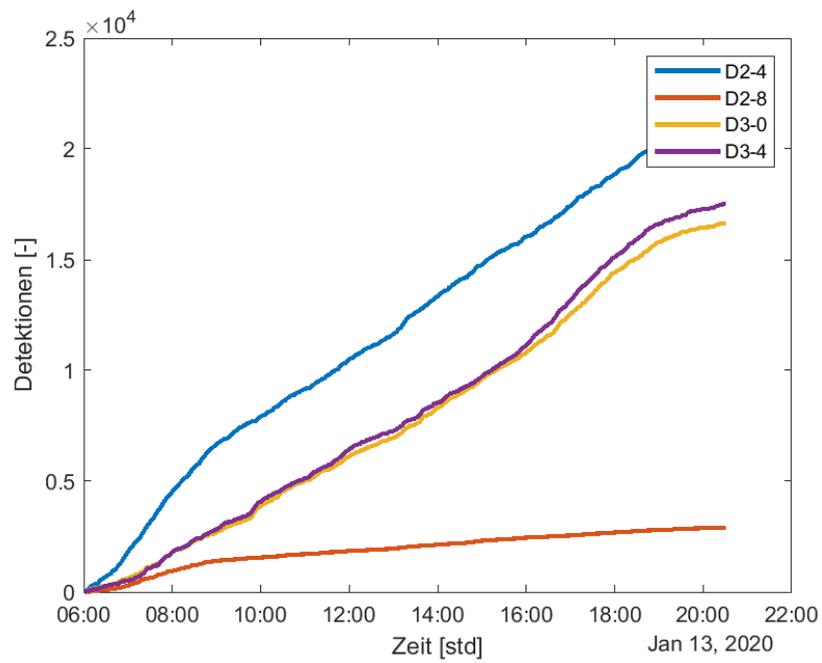


Abbildung 175: Kumulierte Detektionen für die Detektoren D 2-4, D 2-8, D 3-0 und D 3- am Knoten SLU121.