

Simulation hochbelasteter Kreisel

DISSERTATION

DER WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTLICHEN
FAKULTÄT
DER UNIVERSITÄT ZÜRICH

zur Erlangung der Würde
eines Doktors der Informatik

vorgelegt von

Alexander Poeffel

aus Österreich

genehmigt auf Antrag von

Prof. Dr. Helmut Schauer

Prof. Dr. Harald Gall

August 2006

Die Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät der Universität Zürich, Lehrbereich Informatik, gestattet hierdurch die Drucklegung der vorliegenden Dissertation, ohne damit zu den darin ausgesprochenen Anschauungen Stellung zu nehmen.

Zürich, den 28. Juni 2006*

Der Lehrbereichsvorsteher: Prof. Dr. Gerhard Schwabe

**Datum der Promotionsfeier*

Schlüsselwörter

Mehrstreifige Kreiseln, mehrstreifige Einfahrten, zeitorientierte Simulation, parallele Prozesse, Grenzzeitlücke, Folgezeitlücke, Fahrstreifenwechsel, Einfahrproblem

Zusammenfassung

Diese Dissertation befasst sich zentral mit der Modellierung und Simulation von Verkehrsabläufen an ein- und mehrstreifigen Kreiseln. Der Fokus wird dabei auf das Anwendungsgebiet der Beurteilung der Verkehrsqualität bei hochbelasteten Kreiseln und der Ermittlung der Leistungsgrenze gelegt.

Die ermittelten Ergebnisse dienen dazu, an Verkehrsknotenpunkten eine möglichst optimale Form der Verkehrsführung zu erreichen, die einerseits den Anforderungen gegebener Verkehrsströme gewachsen ist und andererseits auch zukünftige Steigerungen verkraftet. Verkehrsknoten können somit bedarfsgerecht ausgestaltet werden, was zu einem reibungslosen Verkehrsfluss und geringen Verzögerungen und Staus führt. Dies führt dazu, dass weniger Abgase und Lärm die betroffenen Gebiete belasten. Allerdings kann durch das grössere Angebot an Kapazität eine Verschiebung der Verkehrsströme erfolgen, welche sich wiederum negativ auf den Effekt auswirken.

In der Verkehrsplanung der Gemeinden werden andere Interessen aber häufig höher gewichtet, so dass eine für den Verkehrsfluss optimale Kreiselform nur selten realisiert wird. So spielen unter anderem gestalterische Vorstellungen, sowie gegebene Platzverhältnisse aufgrund bestehender Bauten oft eine grosse Rolle. Auch gibt es Situationen, wo absichtlich der Verkehrsfluss behindert wird, um den Verkehr in bestimmten Gebieten zu reduzieren. Trotzdem ist es wichtig die Leistungsfähigkeit eines Kreisels im Voraus abschätzen zu können um diese in der Verkehrsplanung optimal berücksichtigen zu können.

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Computerprogramm entwickelt, welches die Möglichkeit bietet Verkehrsabläufe an Kreiseln zu simulieren und auszuwerten. Es lassen sich dabei alle heute in der Schweiz existierenden Kreiselformen abbilden, mit Ausnahme von Bypassen. Diese entflechten einen Verkehrstrom und führen ihn ausserhalb des Kreisels vorbei. Das Programm erlaubt die Abbildung von ein- bis vierspurigen Einfahrten, Kreisfahrbahnen und Ausfahrten. Zusätzlich können Fussgängerstreifen, Busspuren und Tramdurchfahrten definiert werden, welche den Verkehrsfluss im Kreisel beeinflussen.

Um die Modellierung des Verhaltens der Fahrzeuge offen zu gestalten, wurde eine interpretierbare Sprache entwickelt und implementiert, in welcher die Verhaltensregeln beschrieben werden können. Diese Anweisungen werden von den Fahrzeugobjekten zur Laufzeit interpretiert und bestimmen deren Verhalten.

Die Ermittlung der Leistungsgrenze erfolgt über eine Wiederholung von Simulationen mit der Möglichkeit deren Parameter zu verändern. Durch das Festlegen einer steigenden Verkehrsstärke kann der Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der Durchflussmenge, bzw. der Staulänge und der Wartezeit ermittelt werden. Simulationen an verschiedenen Kreiseln haben ergeben, dass dieser Zusammenhang nur für einen bestimmten kreiselindividuellen Bereich gegeben ist und bei weiterer Erhöhung der Verkehrsstärke verloren geht. Dieser Übergang zeigt sich in der Simulation durch Überlastung der Einfahrten bzw. Rückstaus, welche die Länge der gegebenen Stauräume überschreiten und führt deshalb zu einem vorzeitigen Abbruch des Simulationslaufes.

Nach jedem Simulationslauf können durch das Programm im Voraus definierte Kriterien überprüft werden, ob die Leistungsgrenze bereits erreicht ist und somit eine Weiterführung der Simulationsreihe noch sinnvoll ist.

Die Auswertung der gemessenen Rückstaulängen und Wartezeiten kann ebenfalls im Simulationsprogramm erfolgen. Verschiedene graphische und tabellenartige Werkzeuge ermöglichen die detaillierte Analyse der Ergebnisse.

Entscheidend für die Verwendbarkeit und Realitätsnähe der Simulation ist die Modellierung der Einfahrt in den Kreisel und des Fahrstreifenwechsels. Beide Situationen beschreiben eine Zusammenführung verschiedener Verkehrsströme. Dabei lässt sich aus praktischen Untersuchungen und Messungen ableiten, dass die Beurteilung der Zeitlücke im neuen Verkehrsstrom durch den Fahrzeuglenker des einmündenden Verkehrsstroms entscheidend ist. Im Rahmen der Modellierung des Fahrzeugverhaltens wird der Begriff der Grenzzeitlücke verwendet, um die minimale Grösse der Zeitlücke im neuen Verkehrsstrom zu definieren. Die Grenzzeitlücke ist eine variable Grösse und für jeden Fahrzeuglenker verschieden. Auch haben Untersuchungen gezeigt, dass diese Grösse von der Art des Einmündungsvorgangs abhängig ist. Messungen haben Mittelwerte für verschiedene Fahrsituationen ergeben, welche in der Simulation mittels einer Normalverteilung auf das einzelne Fahrzeug umgelegt werden. In der Modellierung werden Grenzzeitlücken für die Einfahrt und den Fahrstreifenwechsel verwendet. Dabei wird unterschieden, ob es sich um das erste oder um ein nachfolgendes Fahrzeug im Verkehrsstrom handelt.

Daraus ergibt sich die Kernaussage für die Modellierung jedes Einmündungsvorgangs: Ist die Zeitlücke im neuen Verkehrsstrom grösser als die Grenzzeitlücke, wird sich der Fahrzeuglenker für die Einfahrt entscheiden und das Fahrzeug somit einfahren. Daraus kann wiederum folgende Verhaltensregel abgeleitet werden: Ein Fahrzeuglenker sucht vor der Einmündung die nächste genügend grosse Zeitlücke im neuen Verkehrsstrom, um sich darin einzufügen. Durch Anpassen der Geschwindigkeit steuert der Lenker sein Fahrzeug, um die Zeitlücke zu erreichen. Daraus folgt für Zeitlücken weiter hinten im Verkehrsstrom eine Verlangsamung oder ein Anhalten vor der Einmündungsstelle, woraus Wartezeiten und Rückstaus resultieren.

Einmündungsvorgänge bei Fahrstreifenwechsel unterscheiden sich durch die höhere Dynamik von dem Vorgang der Einfahrt in den Kreisel. Dieser Umstand resultiert aus der geringeren Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Verkehrsströmen und impliziert somit ein grösseres Sicherheitsgefühl bei den Fahrzeuglenkern. Dadurch verringert sich der Mittelwert der Grenzzeitlücke. In der Modellierung wurde zusätzlich zur geringeren Grenzzeitlücke für die Berechnung der Zeitlücke die relative Geschwindigkeit berücksichtigt. Diese wird aus der Differenz der Geschwindigkeit der beiden Verkehrsströme ermittelt und ermöglicht einen fließenden Fahrstreifenwechsel bei sich gleichförmig bewegenden Fahrzeugkolonnen.

Die erstellte Simulationsanwendung und die definierten Parameter und Regeln wurden an drei Beispielen aus der Praxis getestet. Dabei wurde jeweils die Leistungsgrenze für die bestehende Kreiselgeometrie ermittelt und die Auswirkungen verschiedener Einflussfaktoren untersucht.

Keywords

Multilane roundabout, multilane approach, multithreading, limitation timeslot, follow up timeslot, lane changes, insertion problem

Abstract

This paper deals mainly with modelling and simulation of traffic flows on single and multi lane roundabouts. The focus has thereby the area of judgement of traffic quality and the determination of capacity of heavily used roundabouts.

Results are used to reach the most fluent traffic flow which on the one side can handle the existing traffic and on the other side matches future requirements. Therefore traffic crossings can be built adequately what leads to a fluent traffic flow and less delays and hold-ups. The consequence will be less pollution and noise in the affected areas. Although as result of the bigger capacity a transfer of traffic from other overloaded areas can occur which again decreases the benefit.

Though, often other interests count more in the traffic planning of communities so that a perfect roundabout in the view of traffic flow is seldom built. Design criteria or limitations of space because of existing objects are often the main aspects to select the shape of a roundabout. Also willingly disruption of the traffic flow is possible to reduce the traffic in a specific area. Never the less it's important to determine the capacity of a roundabout in advance to use these results in traffic planning.

During this dissertation a computer program was built to simulate and analyse traffic flows on roundabouts. All kind of roundabout shapes existing in Switzerland can be modelled with the exception of bypasses, i.e. lanes between two approaches which bypass the roundabout. There are possibilities in the program to model from single up to four lane inlets, roundabout carriage ways and outlets. In addition crosswalks, bus lanes and tramway crossings can be defined to influence the traffic flow in the roundabout.

To keep the modelling of the vehicle behaviour open an interpretable programming language was created and implemented to describe the rules of behaviour. These statements will be interpreted from the vehicle objects during runtime and defines their behaviour.

The determination of traffic quality and capacity is done by repetition of simulations with the possibility to change the parameters in between. With the predefinition of an increasing traffic volume it is possible to determine the interrelation between traffic volume and flow rate through the roundabout respectively the length of traffic hold-up and the queue time. Simulations with different roundabouts have shown that this interrelation is only given for a roundabout specific range and gets lost with additional increase of traffic volume. This changeover is shown in the simulation as overload of the approaches respectively longer traffic hold-ups than given retaining capacity and leads to early termination of the simulation run.

After each simulation run the program can check predefined conditions whether the capacity is reached and therefore a continuation of the simulation is still reasonable.

Analyse of the measured length of the traffic hold-up and the queue time can also be done in the simulation program. Different graphic and spreadsheet tools allow a detailed analyse of the results.

Crucial for the usability and the reality of the simulation is the modelling of the vehicle insertion in the roundabout and the lane change. Both situations are describing a combination of different traffic flows. From practical surveys and measuring it was derived that the judgement of timeslot through the driver of the discharged flow is essential. Within the framework of modelling of the vehicle behaviour the concept of the limitation time slot is used to define the minimal quantity of time slot in the target traffic flow. Limitation time slot is a variable quantity and different for each driver. Other surveys have shown that this quantity is dependant from the kind of intersection. Measurements have resulted in different average values for different driving situations which are translated during the simulation with a Gaussian distribution to each single vehicle. Different ave-

rage values of limitation time slots are used in the modelling for the insertion and the lane change. In addition it is distinguished between the first and the following vehicles in the traffic flows.

Out of these conditions the core statement for the modelling of the insertion processes can be defined: If the time slot in the target traffic flow is bigger than the limitation time slot, the judging driver will decide to insert and the vehicle will drive into the new traffic flow. Out of this the following rule of behaviour can be derived: Each driver searches in front of the junction the next time slot in the target traffic flow which is big enough (bigger than its limitation time slot) for its insertion. With adaptation of speed the driver controls his vehicle to reach the target time slot. From this it follows for later time slots a slowdown of traffic speed or a stop in front of the junction point which leads to queue time and traffic hold-ups.

Insertion processes at lane changes differ from the process at the intersection in the higher dynamic. This circumstance results from the smaller speed difference between the two traffic flows and implicates therefore a bigger safety feeling of the drivers. Therefore the average value of the limitation time slot decreases. In addition in the modelling the relative speed is used for the calculation of the time slot. These values result from the difference of the speed of the two traffic flows and enable the fluent change of lanes at steady moving traffic convoys.

The created simulation program and the defined parameters and rules were tested and calibrated with three realistic examples. For each the capacity and the influence of different factors was determined and analysed.

Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Lindenmann vom Institut für Verkehrsplanung der ETH Zürich für die Beantwortung meiner Fragen in der Verkehrstechnik und für das Material der Fallbeispiele. Ein besonderer Dank gebührt meiner Frau für die Hilfe bei der Durchsicht, beim Layout und für die moralische Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	ZIEL UND ZWECK VON SIMULATIONEN DES VERKEHRSABLAUFES.....	3
2.1	AUSGANGSLAGE	3
2.2	GENERELLE AUFGABE	3
2.3	ZIEL DER DISSERTATION	3
2.4	BESONDERE ASPEKTE UND RANDBEDINGUNGEN BEI DER AUFGABENSTELLUNG	3
2.5	LÖSUNGSANSATZ.....	4
3	STATE OF THE ART MODELLE UND SIMULATIONEN	5
3.1	EMPIRISCHE LÖSUNGSANSÄTZE.....	5
3.2	MATHEMATISCHE MODELLE.....	5
3.3	SIMULATIONSMODELLE	6
3.3.1	<i>Ereignisorientierte Modelle</i>	<i>6</i>
3.3.2	<i>Transaktionsorientierte Modelle.....</i>	<i>6</i>
3.3.3	<i>Prozessorientierte Modell.....</i>	<i>7</i>
3.3.4	<i>Zeitorientierte Modelle.....</i>	<i>7</i>
4	GRUNDLAGEN DES MODELLS KREISEL.....	9
4.1	VERKEHRSREGELN.....	9
4.2	GEOMETRIE	10
4.2.1	<i>Kreisfahrbahn</i>	<i>10</i>
4.2.2	<i>Zubringer</i>	<i>12</i>
4.2.3	<i>Fussgängerstreifen.....</i>	<i>14</i>
4.2.4	<i>Fahrzielsignalisation in der Einfahrt.....</i>	<i>15</i>
4.2.5	<i>Busspur.....</i>	<i>15</i>
4.2.6	<i>Tramlinien.....</i>	<i>16</i>
4.3	FAHRZEUGE	17
4.4	VERHALTEN DER FAHRZEUGE.....	19
4.5	VERKEHRSSTÄRKE.....	19
4.6	VERKEHRSABLAUF	20
4.7	ZUSAMMENHÄNGE GEOMETRIE UND VERKEHRSABLAUF.....	21
4.7.1	<i>Quelle.....</i>	<i>21</i>
4.7.2	<i>Fussgängerstreifen.....</i>	<i>23</i>
4.7.3	<i>Busverkehr</i>	<i>24</i>
4.7.4	<i>Tramverkehr.....</i>	<i>25</i>
5	INFORMATIKKONZEPT ZUR MODELLIERUNG DES VERKEHRSSYSTEMS KREISEL	26
5.1	MULTIPROZESSANWENDUNG	26
5.2	SPEICHERUNG DER DATEN UND PARAMETER.....	27
5.3	GEOMETRIEOBJEKTE.....	28
5.3.1	<i>Oberklasse TGeometrie.....</i>	<i>30</i>
5.3.2	<i>Klasse TQuelle.....</i>	<i>30</i>
5.3.3	<i>Klasse TSenke</i>	<i>30</i>
5.3.4	<i>Klasse TGerade.....</i>	<i>30</i>
5.3.5	<i>Klasse TZEinfahrt</i>	<i>31</i>
5.3.6	<i>Klasse TBogen, TEinfahrt und TAusfahrt.....</i>	<i>31</i>
5.3.7	<i>Klasse TKomponente.....</i>	<i>31</i>
5.3.8	<i>Subklassen von TKomponente.....</i>	<i>31</i>
5.3.9	<i>Weitere Subklassen von TGeometrie.....</i>	<i>31</i>
5.4	FUSSGÄNGERSTREIFEN	31
5.5	VISUELLE MANIPULATIONEN AN DER KREISELGEOMETRIE.....	32
5.6	STRUKTUR UND PERSISTENZ VON PARAMETERN.....	32
5.7	VERÄNDERBARKEIT DER EIGENSCHAFTEN UND REGELN DER MODELLIERUNG	33
5.7.1	<i>Einstellungs Umgebung</i>	<i>33</i>
5.7.2	<i>Definition von Regeln.....</i>	<i>34</i>

5.7.3	<i>Regeln</i>	35
5.8	ENTWICKLUNG EINER INTERPRETIERBAREN SPRACHE ZUR BESCHREIBUNG DES FAHRZEUGVERHALTENS.....	36
5.8.1	<i>Definition der Sprache</i>	37
5.8.2	<i>Beschreibung der Regelsprache</i>	38
5.8.3	<i>Syntaxprüfung und Compiler</i>	38
5.8.4	<i>Interpretierbarer Code</i>	40
5.8.5	<i>Interpretation zur Laufzeit</i>	43
5.8.6	<i>Objekte und Funktionen</i>	43
5.8.7	<i>Implementierung in der Simulation</i>	51
5.9	AUSWERTUNGEN.....	54
5.9.1	<i>Auswertungen pro Fahrzeug</i>	54
5.9.2	<i>Auswertungen pro Fussgänger</i>	56
5.9.3	<i>Abbildung und Ermittlung des Fahrzeugzustandes 'Stau'</i>	56
6	MODELLIERUNG DER FAHRZEUGE IM VERKEHRSSYSTEM KREISEL.....	57
6.1	GRUNDLEGENDES FAHRZEUGVERHALTEN.....	57
6.1.1	<i>Geschwindigkeit der Fahrzeuge bei freiem Verkehrsablauf</i>	58
6.1.2	<i>Beschleunigung der Fahrzeuge im freien Verkehrsablauf</i>	60
6.1.3	<i>Interaktionen zwischen Fahrzeugen im gleichen Verkehrsstrom</i>	61
6.1.4	<i>Interaktionen zwischen Fahrzeugen in unterschiedlichen Verkehrsströmen</i>	65
6.1.5	<i>Interaktion zwischen dem Fahrzeug und der Fahrbahn</i>	65
6.1.6	<i>Interaktionen zwischen Fahrzeugen und Komponenten</i>	66
6.2	WECHSEL DES FAHRSTREIFENS.....	66
6.2.1	<i>Bestimmung des Fahrstreifens aufgrund des Fahrzieles</i>	67
6.2.2	<i>Zeitlückenwahl beim Fahrstreifenwechsel</i>	69
6.2.3	<i>Fahrstreifenwechsel als Folgefahrzeug</i>	70
6.2.4	<i>Aufweitung der Einfahrt</i>	70
6.2.5	<i>Ablauf des Fahrstreifenwechsels</i>	70
6.2.6	<i>Überbreite Fahrbahnen</i>	71
6.2.7	<i>Fahrlinie beim Fahrstreifenwechsel</i>	73
6.2.8	<i>Ausfahren aus überbreiten Fahrbahnen</i>	76
6.2.9	<i>Überholen auf überbreiten Fahrbahnen</i>	76
6.3	EIN- UND AUSFAHREN IN UND AUS DEM KREISEL.....	77
6.3.1	<i>Einfahren in den Kreisel</i>	77
6.3.2	<i>Wahl des Fahrstreifens im Kreisel bei der Einfahrt</i>	78
6.3.3	<i>Entscheidung vor der Einfahrt</i>	79
6.3.4	<i>Erkenntnisse aus der Praxis</i>	79
6.3.5	<i>Stadien des Fahrzeuges beim Einfahren</i>	80
6.3.6	<i>Zeitlücken</i>	80
6.3.7	<i>Ausfahren aus dem Kreisel</i>	82
6.3.8	<i>Bestimmung des Fahrstreifens im Kreisel für die Ausfahrt</i>	82
6.3.9	<i>Stadien beim Ausfahren</i>	82
6.3.10	<i>Überbreite Fahrbahnen</i>	83
6.4	HINDERNISSE IN DER FAHRBAHN, FUSSGÄNGER UND TRAM.....	84
6.4.1	<i>Fussgängerstreifen</i>	84
6.4.2	<i>Tramdurchfahrt</i>	86
6.4.3	<i>Reaktionen der Fahrzeuge</i>	87
6.5	ABTRENNUNG DES LINIENVERKEHRS DURCH EINE BUSSPUR.....	88
7	MODELLIERUNG DER FUSSGÄNGER IM VERKEHRSSYSTEM KREISEL.....	89
7.1	ERZEUGUNG DER FUSSGÄNGER.....	90
7.2	STEUERUNG DER FUSSGÄNGER.....	91
8	SIMULATION DES VERKEHRSABLAUFES IN KREISELN.....	92
8.1	SIMULATION.....	92
8.1.1	<i>Simulationsparameter</i>	92
8.1.2	<i>Ende der Simulation</i>	92
8.1.3	<i>Zeitraffer Simulation</i>	93
8.2	QUALITÄT DES VERKEHRSABLAUFES.....	93

8.2.1	<i>Definition von Stau</i>	93
8.2.2	<i>Definition der Qualität des Verkehrsablaufes</i>	94
8.2.3	<i>Aufbereitung der Daten</i>	95
8.2.4	<i>Darstellung</i>	95
8.3	LEISTUNGSGRENZEN.....	97
8.3.1	<i>Simulation mit konstanter Verkehrsstärke und konstanter Kreiselgeometrie</i>	98
8.3.2	<i>Simulation mit wachsender Verkehrsstärke und konstanter Kreiselgeometrie</i>	98
8.3.3	<i>Simulation mit variabler Kreiselgeometrie und konstanter Verkehrsstärke</i>	99
8.3.4	<i>Simulation mit wachsender Verkehrsstärke und variabler Kreiselgeometrie</i>	99
9	DARSTELLUNG DES VERKEHRSSYSTEMS KREISEL	100
9.1	DARSTELLUNG ALS ABSTRAKTE SKIZZE	100
9.1.1	<i>Kreisel</i>	100
9.1.2	<i>Zubringer</i>	101
9.1.3	<i>Fussgängerstreifen</i>	103
9.1.4	<i>Busspur</i>	104
9.1.5	<i>Tramlinie</i>	105
9.2	DARSTELLUNG ALS PROJEKTPLAN	106
9.3	DARSTELLUNG ALS LUFTAUFNAHME.....	107
9.4	DARSTELLUNG DER SIMULATIONSOBJEKTE	107
9.4.1	<i>Darstellung der Fahrzeuge (inkl. Bus und Tram)</i>	107
9.4.2	<i>Darstellung der Fussgänger</i>	107
10	BEURTEILUNG DES MODELLEINSATZES UND DER SIMULATIONSERGEBNISSE ANHAND VON BEISPIELEN	108
10.1	KREISEL ALLMEND.....	108
10.1.1	<i>Simulationen</i>	110
10.1.2	<i>Ermittlung der Leistungsgrenze</i>	110
10.1.3	<i>Leistungspotenzial bei zweistreifigen Einfahrten</i>	112
10.1.4	<i>Leistungssteigerung bei zweistreifigen Einfahrten und Kreisfahrbahn</i>	114
10.2	KREISEL MATTENHOF.....	116
10.2.1	<i>Simulation</i>	118
10.2.2	<i>Ermittlung der Leistungsgrenze</i>	118
10.2.3	<i>Einfluss einer überbreiten Kreisfahrbahn auf die Leistung</i>	120
10.3	KREISEL SIHLBRUGG	122
10.3.1	<i>Simulation</i>	123
10.3.2	<i>Ermittlung der Leistungsgrenze</i>	123
10.3.3	<i>Einfluss der Fussgänger auf die Leistung</i>	125
10.4	BEURTEILUNG.....	126
10.5	UNGELOSTE FRAGEN ZUR MODELLIERUNG	127
10.5.1	<i>Annahmen zur vorliegenden Modellierung</i>	127
10.5.2	<i>Kollisionen</i>	127
10.5.3	<i>Kreiselformen</i>	128
10.5.4	<i>Einfluss von Wegweisungszielen auf die Leistungsfähigkeit</i>	128
10.5.5	<i>Leistungsmerkmale beim zeitweisen Anhalten des Verkehrs</i>	128
11	AUSBLICK	129
12	LITERATURVERZEICHNIS	130
	ANHÄNGE	136
A 1	BEGRIFFSDEFINITIONEN	137
A 2	HERLEITUNGEN UND FORMELN	139
A 2.1	DARSTELLUNG DES VERKEHRSSYSTEMS KREISEL ALS ABSTRAKTE SKIZZE.....	139
A 2.1.1	<i>Kreisel</i>	139
A 2.1.2	<i>Zubringer</i>	139
A 2.1.3	<i>Fussgängerstreifen</i>	140
A 2.1.4	<i>Busspur</i>	141

A 2.1.5	<i>Tramlinie</i>	141
A 2.2	WICHTIGE ATTRIBUTE DER GEOMETRIEOBJEKTE	141
A 2.3	FORMELN UND VERTEILUNGEN FÜR DAS VERHALTEN DER FAHRZEUGE	143
A 2.3.1	<i>Hyperlang Verteilung nach Dawson</i>	143
A 2.3.2	<i>Bestimmung des Fahrzeugtyps</i>	143
A 2.3.3	<i>Ermittlung einer Log-Normalen Zufallszahl</i>	144
A 2.3.4	<i>Ermittlung des Fahrziels</i>	144
A 2.3.5	<i>Fahrvermögen und Erfahrung</i>	144
A 2.3.6	<i>Fahrzeugabstand</i>	145
A 2.3.7	<i>Fahrgeschwindigkeit bei gebundenem Verkehrsablauf</i>	145
A 2.3.8	<i>Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Kurvenradius</i>	146
A 2.3.9	<i>Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Durchfahrtsbreite</i>	146
A 2.3.10	<i>Beschleunigung</i>	147
A 2.3.11	<i>Erforderliche Bremsverzögerung</i>	148
A 2.3.12	<i>Aus- und einfahren in einen Verkehrsstrom</i>	148
A 2.3.13	<i>Abhängigkeit des Einschlagwinkels von der Fahrgeschwindigkeit</i>	149
A 2.3.14	<i>Fahrlinie beim Einfahren in den Kreisel</i>	149
A 2.3.15	<i>Fahrlinie beim Ausfahren aus dem Kreisel</i>	150
A 2.3.16	<i>Fahrlinie beim Ausfahren aus überbreiten Kreiseln</i>	151
A 2.3.17	<i>Fahrlinie beim Überholen auf überbreiten Fahrbahnen</i>	151
A 2.3.18	<i>Fahrstreifen im Kreisel</i>	151
A 2.3.19	<i>Fahrstreifen im Kreisel für die Ausfahrt</i>	151
A 2.3.20	<i>Zeitlücken beim Einfahren in den Kreisel</i>	152
A 2.4	FORMELN ZUR BESCHREIBUNG DES VERHALTEN VON FUSSGÄNGERN UND TRAMS	153
A 2.4.1	<i>Zeitlücken</i>	153
A 2.4.2	<i>Strassenseite</i>	153
A 2.4.3	<i>Zeitlücken der Fahrzeuge vor dem Fussgängerstreifen</i>	153
A 2.4.4	<i>Startpunkte der Fussgänger</i>	154
A 2.4.5	<i>Erreichen des Fahrbahnrandes</i>	154
A 3	GENERELLE FUNKTIONEN UND FORMELN	155
A 3.1	FUNKTION CCW (A, B, C).....	155
A 3.2	FUNKTION WINKEL_NCW (W1, W2)	155
A 3.3	FUNKTION ZL_FZ (FzA, FzB, v)	156
A 3.4	FUNKTION GETPREVFZ (EZKN).....	157
A 3.5	FUNKTION KREISWINKEL (P, M).....	157
A 3.6	FUNKTION WINKELDIFFERENZ (δ , γ_C).....	158
A 4	REGELN ZUR ABBILDUNG VON VERKEHRSABLÄUFEN	159
A 4.1	MODELLIERUNG DES FAHRSTREIFENWECHSELS.....	159
A 4.1.1	<i>Bestimmung des Fahrstreifens aufgrund des Fahrziels</i>	159
A 4.1.2	<i>Überprüfung der Zeitlücke auf Höhe des Fahrzeuges</i>	159
A 4.1.3	<i>Überprüfung der Zeitlücken weiter zurück im Verkehrsstrom</i>	160
A 4.1.4	<i>Fahrstreifenwechsel als Folgefahrzeug</i>	160
A 4.1.5	<i>Überholen auf überbreiter Fahrbahn</i>	161
A 4.2	EINFAHREN IN DEN KREISEL	161

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Kreisfahrbahngeometrie	11
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Zubringers und dessen geometrischer Größen	12
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Fussgängerstreifens und dessen geometrischer Größen	14
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Busspur und deren geometrischer Größen.....	15
Abbildung 5: Tramlinie mit Schnitt durch Zubringer	16
Abbildung 6: Zeitlückenverteilung bei freien und abhängigen Fahrzeugen.....	22
Abbildung 7: Log-Normalverteilung für $\sigma = 0.5$ und $\mu = 0$	23
Abbildung 8: Situation Fussgänger bei Fussgängerstreifen.....	23
Abbildung 9: Normalverteilung für $\sigma = 0.5$ und $\mu = 0$	24
Abbildung 10: Situationen beim Beginn der Busspur	25
Abbildung 11: ERM der Datenbank.....	28
Abbildung 12: Geometrieobjekte im Kreisel	29
Abbildung 13: Klassendiagramm der Geometrieobjekte	30
Abbildung 14: Grobes ERM der Daten.....	33
Abbildung 15: Schematische Übersicht über die Einbettung der Regelsprache	37
Abbildung 16: Baum von Beispielprogramm	40
Abbildung 17: Objekte des Programmcodes	43
Abbildung 18: Aufruf einer Funktion	46
Abbildung 19: Berechnete Zeitlücke der Funktion CalcTimeSlot	47
Abbildung 20: Berechneter Winkel der Funktion FrontAngle	48
Abbildung 21: Ermitteltes Fahrzeug der Funktion GetNearestVehKr	48
Abbildung 22: Ermitteltes Fahrzeug der Funktion GetNearestVehLiZuf	49
Abbildung 23: Ermitteltes Fahrzeug der Funktion GetNearestVehFS	50
Abbildung 24: Ermittelte Zeitlücke der Funktion CalcTimeSlotFSW.....	50
Abbildung 25: Ermitteltes Fahrzeug der Funktion GetNextID	50
Abbildung 26: Ergebnis der Funktion FzIsBetweenWink	51
Abbildung 27: Prüfsektor der Funktion CheckFSWBlock	51
Abbildung 28: Freitexteditor	52
Abbildung 29: Fehlermeldung aus dem Checker.	52
Abbildung 30: Interpreter durchläuft den kompilierten Code	53
Abbildung 31: Testwerkzeug für den kompilierten Code.....	53
Abbildung 32: Debugger für den kompilierten Code	54
Abbildung 33: Zustandsdiagramm der Fahrzeuge	57
Abbildung 34: Kurvengeschwindigkeit in Abhängigkeit des Parameters gFz bzw. gFa	59
Abbildung 35: Einflussfaktor der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Durchfahrbreite.....	60
Abbildung 36: Abstandmessung zwischen den Fahrzeugen.....	61
Abbildung 37: Zusammenhang zwischen der Veränderung des Abstands und der Beschleunigung.....	62
Abbildung 38: Ausfahren aus dem geraden Verkehrsstrom.....	63
Abbildung 39: Einfahren in einen geraden Verkehrsstrom.....	64
Abbildung 40: Ausfahrt aus einem Verkehrsstrom im Kreisel	64
Abbildung 41: Einfahren in einen Verkehrsstrom im Kreisel	65
Abbildung 42: Aktualisierung des Fahrzeuges auf der Kreisfahrbahn	66
Abbildung 43: Abhängigkeit des Fahrstreifens in der Einfahrt vom Fahrziel ohne Signalisation.....	67
Abbildung 44: Berechnung der Zeitlücken auf gerader Fahrbahn.....	69
Abbildung 45: Zeitlücke auf Höhe des Fahrzeuges.....	70
Abbildung 46: Rückstau in einer überbreiten Fahrbahn bei der Ausfahrt; Vorbeifahren möglich.....	71
Abbildung 47: Veränderung der Liste beim Überholen in überbreiten Fahrbahnen	72
Abbildung 48: Rückstau in einer überbreiten Fahrbahn; kein Vorbeifahren möglich	72
Abbildung 49: Fahrlinie beim Fahrstreifenwechsel auf der geraden Strecke	73

Abbildung 50: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Winkel für den Fahrstreifenwechsel	74
Abbildung 51: Fahrstreifenwechsel auf der Kreisfahrbahn.....	74
Abbildung 52: Kreuzen eines Fahrstreifens beim Einfahren	75
Abbildung 53: Kreuzen eines Fahrstreifens beim Ausfahren	75
Abbildung 54: Einspuren und Ausfahren auf überbreiten Fahrbahnen	76
Abbildung 55: Überholen auf überbreiten Fahrbahnen	77
Abbildung 56: Beispiele von Zeitlücken für die Einfahrentscheidung in einen Kreisel Typ 2/2	78
Abbildung 57: Blockierung eines Fahrstreifens während dem Einfahren in den Kreisel	79
Abbildung 58: Fahrzeug blockiert die Einfahrt.....	81
Abbildung 59: Bestimmung des Fahrstreifens im Kreisel für die Ausfahrt	82
Abbildung 60: Ausfahren aus dem Kreisel von einer inneren Fahrspur	83
Abbildung 61: Prozesse Erzeugen und Steuerung der Fussgänger	90
Abbildung 62: Startpositionen der Fussgänger	91
Abbildung 63: Beispiel einer Ogive der Wartezeiten	96
Abbildung 64: Beispiel einer Häufigkeitstabelle der Wartezeiten	97
Abbildung 65: Beispiel eines Streuungsdiagramms der Wartezeiten.....	98
Abbildung 66: Parameter der Kreisfahrbahn	101
Abbildung 67: Berechnete Punkte und Winkel im Zubringer.....	102
Abbildung 68: Berechnete Punkte am Ende des Zubringers	102
Abbildung 69: Berechnete Punkte beim Fussgängerstreifen	104
Abbildung 70: Berechnete Punkte der Busspur	105
Abbildung 71: Berechnet Punkte der Tramlinie.....	106
Abbildung 72: Übersicht Verkehrssituation Kreisel Allmend	108
Abbildung 73: Detailplan Kreisel Allmend	109
Abbildung 74: Initiale Verkehrsstärken für Kreisel Allmend.....	110
Abbildung 75: Ogive der Wartezeiten bei initialer Verkehrsstärke Kreisel Allmend	110
Abbildung 76: Ogive der Staulängen bei initialer Verkehrsstärke Kreisel Allmend	111
Abbildung 77: Wartezeiten (Mittelwert(MW) und 25% Streuung(St)) der Simulationsreihe Kreisel Allmend	111
Abbildung 78: Staulängen (MW und 25% St) der Simulationsreihe Kreisel Allmend	111
Abbildung 79: Staulängen (MW und 25% St) an der Leistungsgrenze Kreisel Allmend	112
Abbildung 80: Wartezeiten (MW und 25% St) an der Leistungsgrenze Kreisel Allmend	112
Abbildung 81: Erweiterte Einfahrten Kreisel Allmend.....	113
Abbildung 82: Wartezeiten (MW und 25% St) Kreisel Allmend, 2-streifige Einfahrten.....	113
Abbildung 83: Staulängen (MW und 25% St) Kreisel Allmend, 2-streifige Einfahrten.....	114
Abbildung 84: Erweiterte Einfahrten und Kreisfahrbahn im Kreisel Allmend.....	114
Abbildung 85: Wartezeiten (MW und 25% St) Kreisel Allmend, komplett 2-streifig	115
Abbildung 86: Staulängen (MW und 25% St) Kreisel Allmend, komplett 2-streifig	115
Abbildung 87: Übersicht Verkehrssituation Kreisel Mattenhof	116
Abbildung 88: Detailplan Kreisel Mattenhof	117
Abbildung 89: Initiale Verkehrsstärken für Kreisel Mattenhof.....	118
Abbildung 90: Ogive der Wartezeiten bei initialer Verkehrsstärke Kreisel Mattenhof	118
Abbildung 91: Ogive der Wartezeiten bei initialer Verkehrsstärke Kreisel Mattenhof	119
Abbildung 92: Wartezeiten (MW und 25% St) Kreisel Mattenhof.....	119
Abbildung 93: Staulängen (MW und 25% St) Kreisel Mattenhof.....	119
Abbildung 94: Wartezeiten (MW und 25% St) Kreisel Mattenhof ohne UBFB	120
Abbildung 95: Staulängen (MW und 25% St) Kreisel Mattenhof ohne UBFB	120
Abbildung 96: Wartezeiten (MW und 25% St) Kreisel Mattenhof 2-streifiger Kreisel	121
Abbildung 97: Staulängen (MW und 25% St) Kreisel Mattenhof 2-streifiger Kreisel.....	121
Abbildung 98: Übersicht Verkehrssituation Kreisel Sihlbrugg	122
Abbildung 99: Detailplan Kreisel Sihlbrugg (Vorprojekt)	122
Abbildung 100: Initiale Verkehrsstärken für Kreisel Sihlbrugg	123
Abbildung 101: Ogive der Wartezeiten bei initialer Verkehrsstärke Kreisel Sihlbrugg	123
Abbildung 102: Ogive der Staulängen bei initialer Verkehrsstärke Kreisel Sihlbrugg	124

Abbildung 103: Wartezeiten (MW und 25% St) Kreisel Sihlbrugg.....	124
Abbildung 104: Staulängen (MW und 25% St) Kreisel Sihlbrugg.....	124
Abbildung 105: Ogive der Staulängen einer 2-streifigen Einfahrt, Kreisel Sihlbrugg	125
Abbildung 106: Effektive Staulängen einer 2-streifigen Einfahrt, Kreisel Sihlbrugg	125
Abbildung 107: Wartezeiten (MW und 25% St) Fussgänger Kreisel Sihlbrugg.....	126
Abbildung 108: Staulängen (MW und 25% St) Fussgänger Kreisel Sihlbrugg.....	126
Abbildung 109: Zusammenhang Fahrzeugmenge - Wartezeit.....	127
Abbildung 110: Prüfung der Drehrichtung der Punkte.....	155
Abbildung 111: Berechnung des Winkels zwischen W1 und W2 im Gegenuhrzeigersinn...	155
Abbildung 112: Ermittlung der Zeitlücke.....	156
Abbildung 113: Ermittlung des nächsten Fahrzeuges vor dem Einfahrtspunkt.....	157
Abbildung 114: Berechneter Winkel der Funktion Kreiswinkel.....	157
Abbildung 115: Berechneter der Winkeldifferenz	158

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zustände eines Fussgängerstreifens	11
Tabelle 2: Allgemeine geometrische Grössen des Zubringers.....	13
Tabelle 3: Geometrische Grössen der Einfahrt.....	13
Tabelle 4: Geometrische Grössen der Ausfahrt	14
Tabelle 5: Geometrische Grössen der Mittelinsel und der Messpunkte.....	14
Tabelle 6: Geometrische Grössen des Fussgängerstreifens	15
Tabelle 7: Grössen der Signalisation	15
Tabelle 8: Geometrische Grössen der Busspur	16
Tabelle 9: Allgemeine Grössen von Tramlinien.....	16
Tabelle 10: Geometrische Grössen von Punkten der Tramlinien.....	17
Tabelle 11: Geometrische Grössen von Haltepunkten der Tramlinien.....	17
Tabelle 12: Fahrzeugparameter	19
Tabelle 13: Matrix der Verkehrsstärken	20
Tabelle 14: Matrix des Taktverkehrs Tram.....	20
Tabelle 15: Allgemeine Eigenschaften des Verkehrsablaufes	21
Tabelle 16: Zustände eines Fussgängerstreifens	24
Tabelle 17: Beschreibung der Regeldefinitionen.....	36
Tabelle 18: TVarList, Liste mit den verwendeten Variablen	41
Tabelle 19: TMainList, Liste mit den internen Kommandozeilen.....	41
Tabelle 20: TVarList, Liste mit den verwendeten Variablen nach Schritt 5	42
Tabelle 21: TObjektList, Liste mit den verwendeten Objekten nach Schritt 5	42
Tabelle 22: TArgList, Liste mit den verwendeten Bedingungen nach Schritt 5	42
Tabelle 23: Attribute und Methoden der Objekte vom Typ Fahrzeug.....	44
Tabelle 24: Attribute und Methoden der Objekte vom Typ Zufahrt	45
Tabelle 25: Attribute und Methoden der Objekte vom Typ Kreisel.....	45
Tabelle 26: Attribute und Methoden der Objekte vom Typ Zustand	45
Tabelle 27: Attribute und Methoden der Objekte vom Typ Koordinate	45
Tabelle 28: Attribute und Methoden der Objekte vom Typ Globale Eigenschaften.....	46
Tabelle 29: Attribute und Methoden der Objekte vom Typ Fussgängerstreifen	46
Tabelle 30: Definierte Funktionen	47
Tabelle 31: Aufbau der Datenbanktabelle zur Sicherung der Simulationsergebnisse der Fahrt jedes Fahrzeuges.....	55
Tabelle 32: Beispiel Eintrag in der Statistiktablelle.	55
Tabelle 33: Leistungsgrenzen von Fahrzeugen und Erfahrungsbereiche von Fahrern (nach Hackenberg und Heißenberg)	59
Tabelle 34: Zusammenhang zwischen Gesamtbelastung und der Anzahl der Fahrzeuge auf den Fahrstreifen nach Brilon (aus Formel (5)).....	68
Tabelle 35: Fahrstreifenwahl in der Kreisfahrbahn (3 Zufahrtsstreifen, 2 Kreisfahrbahnen)..	78
Tabelle 36: Fahrstreifenwahl in der Kreisfahrbahn (3 Zufahrtsstreifen, 3 Kreisfahrbahnen)..	78
Tabelle 37: Fahrstreifenwahl in der Kreisfahrbahn (2 Zufahrtsstreifen, 3 Kreisfahrbahnen)..	79

Tabelle 38: Reaktionen der Fahrzeuge auf die Belegungszustände eines Fussgängerstreifens	85
Tabelle 39: Reaktionen der Fahrzeuge auf Übergänge der Belegungszustände eines Fussgängerstreifens	86
Tabelle 40: Reaktionen der Fahrzeuge auf die Belegungszustände einer Tramdurchfahrt ...	86
Tabelle 41: Reaktionen der Fahrzeuge auf Übergänge der Belegungszustände einer Tramdurchfahrt	87
Tabelle 42: Mittlere Anfangsverzögerung in Abhängigkeit vom Ort des Verzögerungsbeginns nach Hoffmann	87
Tabelle 43: Effektive Bremsverzögerung in Abhängigkeit zur notwendigen Bremsverzögerung	88
Tabelle 44: Reaktionen der Fahrzeuge auf eine Busspur	88
Tabelle 45: Simulationsparameter	92
Tabelle 46: Parameter zur Definition von Stau	93
Tabelle 47: Einteilung zur Beurteilung der Verkehrsqualität nach SN 640 022	95
Tabelle 48: Fragestellungen und Lösungsansätze für die Auswertung von hoch belasteten Kreiseln	98
Tabelle 49: Grössen zur Darstellung des Kreisels	100
Tabelle 50: Grössen zur Darstellung des Hintergrundbildes zum Kreisel	106
Tabelle 51: Darstellungsformen der Fahrzeuge	107
Tabelle 52: Darstellungsformen der Fussgänger	107
Tabelle 53: Begriffsdefinitionen	138

1 Einleitung

Diese Dissertation befasst sich zentral mit der Modellierung und Simulation von Verkehrsabläufen an Kreiseln. Dabei setzt sie auf den Ergebnissen meiner Diplomarbeit¹ von 1998 auf. Sie zeigt Lösungen für die damals aufgezeigten Fragen und erweitert das gewählte Simulationsmodell.

Es werden folgende Ziele verfolgt:

- Abbildung aller in der Schweiz bekannten Kreiselformen (ohne Bypass) und deren Verkehrsflüsse
- Loslösung von festen Formeln und Regeln für die Abbildung der Prozesse
- Beliebige Erweiterbarkeit um neuere Erkenntnisse aus der Verkehrstechnik zu berücksichtigen
- Bereitstellung von Tools um speziell hoch belastete Kreisverkehrssituationen zu simulieren und auszuwerten

Diese Simulation unterscheidet sich von den bisherigen bekannten Programmen, welche fast ausschliesslich von festen Formeln und Regeln für das Fahrzeugverhalten ausgehen. Dadurch entstanden, ausgehend meistens von Instituten, für unterschiedliche Forschungsergebnisse verschiedene Simulationsprogramme. Alle diese Simulationen verwenden den Stand des Wissens zum Zeitpunkt der Programmerstellung. Wenn später neue Erkenntnisse dazukommen, muss das Programm angepasst oder neu erstellt werden.

In der vorliegenden Modellierung des Verkehrsablaufs sind viele Einstellungen, Formeln und Regeln variabel, d.h. sie können vom Benutzer beliebig verändert und angepasst werden. Jederzeit können neue Forschungserkenntnisse in die Simulation einfließen und sind sofort in den Auswertungsergebnissen ersichtlich.

1.1 Abgrenzung zur Diplomarbeit von 1998

Die oben erwähnte Diplomarbeit zum Thema Kreiselsimulation dient als Basis für diese Arbeit. Das darin verwendete Modell wurde für diese Arbeit erheblich erweitert. Nachfolgend werden die wesentlichen Punkte kurz erläutert:

- Die Fahrbahnen der Zufahrten und des Kreisels werden um bis zu vier Fahrstreifen erweitert. Dadurch müssen die Warteschlangen-Modelle und die Modellierung der Ein- und Ausfahrt komplett neu definiert werden. Zusätzlich werden Fahrstreifenwechsel, welche bisher noch nie in einer Mikrosimulation modelliert worden sind, auf den Zufahrten und im Kreisel abgebildet.
- In das Modell Kreisel sind neu auch Busse und Tram integriert. Dafür können Busfahrstreifen und/oder Tramdurchfahrten definiert werden.
- Die Neugestaltung der Benutzeroberfläche umfasst Funktionen um Manipulationen der Kreiselgeometrie mit Hilfe der Maus durchzuführen.
- Um das Fahrverhalten der Fahrzeuge grundlegend zu beeinflussen, existieren Programmschnittstellen, womit wichtige Verhaltensregeln durch den Benutzer abgeändert oder neu definiert werden können.
Die neu programmierten Regeln werden mittels Compiler in eine interpretierbare Form übersetzt und zur Laufzeit von den Fahrzeugen abgearbeitet.

¹ Vgl. [POEFFEL98]

- Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Kreisels existieren Werkzeuge um Simulationsreihen durchzuführen und dabei Parameter automatisch oder manuell zu verändern. Simulationsreihen können bis zum Erreichen der Leistungsgrenze durchgeführt oder als fixe Anzahl vorgegeben werden. Bei erster Variante wird vom System eine Beurteilung des Verkehrsablaufes durchgeführt.
- Die grafische Darstellung der Ergebnisse erfolgt in der Statistikkomponente. Dafür werden neue Darstellungsformen (z.B. Streudiagramme) entwickelt und bestehende erweitert.
- Um die Vielzahl von Werten und Parametern zu verwalten, wird das relationale Datenbanksystem Borland Paradox angebunden und die Daten in entsprechenden Tabellen gespeichert.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass gewisse Ideen und Grundformen der Kreiselsimulation aus der Diplomarbeit übernommen wurden, der grosse Teil des Modells für die vorliegende Arbeit jedoch grundlegend überarbeitet und ergänzt werden musste.

2 Ziel und Zweck von Simulationen des Verkehrsablaufes

2.1 Ausgangslage

Die Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes ist heute in zunehmendem Masse eine vordringliche Aufgabenstellung im Verkehrsingenieurwesen. Zur quantifizierten Bearbeitung der Verkehrsingenieuraufgabe wurden bisher vorwiegend makroskopische Verfahren zur Modellierung des Verkehrsablaufes herangezogen. Die makroskopische Modellierung und die analytische Beschreibung des Verkehrsablaufes hat im Grenzbereich der Funktionen oft nur noch beschränkte Aussagekraft und führt zum Teil zu ungenauen oder sogar ungültigen bzw. unrealistischen Ergebnissen. Gerade dieser Bereich, namentlich der Grenzbereich der Leistungsfähigkeit, ist aber in der Verkehrstechnik von vorrangigem Interesse. Aus diesem Grund wird heute und in Zukunft die mikroskopische Modellierung des Verkehrsablaufes bevorzugt, weil sie bedeutend leistungsfähiger und zuverlässiger ist in diesen Grenzbereichen. Allerdings ist diese Modellierung, die eine Simulation des Verkehrsablaufes erlaubt und damit die Realität in Grenzbereichen besser nachbildet, mit der Bedingung verknüpft, dass zur Kalibrierung des Modells Stützwerte aus empirischen Erhebungen am realen Verkehrsablauf erforderlich sind, die meistens fehlen resp. nur mit grossem Aufwand zu erfassen sind.

Eine durch die verschiedenen möglichen Betriebsformen äusserst komplexe Modellierung besteht beim freien Verkehrsablauf bei Kreiseln. Dazu sind bisher nur wenige Ansätze bekannt geworden.

2.2 Generelle Aufgabe

Für Kreisel mit ein- und mehrstreifigen Fahrbahnen (Ein-, Ausfahrten und Kreisfahrbahn) ist ein mikroskopisches Modell des Verkehrsablaufes zu definieren, das durch Simulation des Verkehrsablaufes erlaubt, die Grössen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit (Auslastungsgrad) und Qualität des Verkehrsablaufes (Wartezeiten und Rückstaus) zu ermitteln. Dabei sind die Einflüsse der Verkehrszusammensetzung und der Fussgänger zu berücksichtigen.

2.3 Ziel der Dissertation

Das Ziel der Arbeit besteht darin, das Verhalten der Fahrzeuge im komplexen System des Kreisels, namentlich im Einfahrtsbereich, beim Einmündungsvorgang, beim Fahrstreifenwechsel und beim Ausfahren jeweils mit ein- und mehrstreifigen Fahrbahnen möglichst realitätsnah zu beschreiben. Weiter ist es in Modellen durch geeignete Grössen so zu definieren und damit abzubilden, dass eine Simulation des Verkehrsablaufes ermöglicht wird. Genauigkeit und Plausibilität des Modells sind an realen Beispielen zu verifizieren.

Das Resultat soll ein einsatzfähiger Prototyp eines Informatikwerkzeuges sein, welches gestattet, die Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes von Kreiseln mit beliebiger Betriebsform zu bestimmen sowie die Simulation grafisch auf Kartenhintergrund (Situation oder Projekt) darzustellen.

Zusätzlich sind Werte- und bereiche von Parametern und Einstellungen zu diskutieren und kalibrieren.

2.4 Besondere Aspekte und Randbedingungen bei der Aufgabenstellung

Es sind folgende speziellen Aspekte und Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Betriebsformen ein- und zweistreifige Kreisfahrbahnen, ein- und zweistreifige Einfahrten sowie ein- und zweistreifige Ausfahrten
- Busfahrstreifen bei zweistreifigen Einfahrten auf dem rechten Fahrstreifen
- Einfahrtsbedingungen: freier Verkehrsablauf, teilgebundener und gebundener Verkehrsablauf
- Unterschiedliche Auslastungsgrade bei zweistreifigen Einfahrten und bei zweistreifigen Kreisfahrbahnen
- Einfluss der Fussgänger auf den Fussgängerstreifen gesondert nach Ein- und Ausfahrt
- Einfluss des Blinkens beim Ausfahren aus dem Kreisel
- Einfluss von Eingriffen in den Verkehrsablauf durch Bedarfs-LSA (Tramdurchfahrt)
- Berechnung der Qualität des Verkehrsablaufes für Motorfahrzeuge und Fussgänger
- Darstellung der Berechnungsergebnisse in numerischen Tabellen sowie in Grafiken (Häufigkeitsverteilungen, etc.)
- Darstellung der Simulation (zeitgerafft) auf Kartenhintergrund (Situation) bzw. Projektplan (Situation)

2.5 Lösungsansatz

Wie schon in der erwähnten Diplomarbeit wird auch diese Simulation auf der Microsoft Windows Plattform entwickelt. Es werden wiederum die Multitasking Eigenschaften verwendet, um eine quasi parallele Simulation zu erreichen.

Um eine gute Unterstützung beim Erstellen der Eingabemasken und Menüs zu haben, wurde die Programmiersprache Delphi 7.0 von Borland gewählt.

Delphi stellt eine grosse Anzahl von Klassenbibliotheken für die Entwicklung von Windows Programmen zur Verfügung. Weiter erleichtern die integrierte Entwicklungsumgebung, der schnelle Compiler und der Debugger die Programmierung.

Als Programmiertechnik wurde der objektorientierte Ansatz aus folgenden Gründen gewählt:

- Objektorientierte Modellierungen erleichtern die Umsetzung von verschiedenartigen Objekten.
- Durch Vererbung der Klassen kann der Kreisel mit seinen Elementen einfach repräsentiert werden.
- Durch dynamisches (spätes) Binden von Methoden an das Objekt², ist die Schnittstelle zwischen Fahrzeugen und Kreisel einfacher zu modellieren.
- Delphi unterstützt eine hybride objektorientierte Programmierung, das bedeutet, nicht alle Datentypen sind Objekte. Es existieren einfache Datentypen und Objekttypen nebeneinander.
- Alle Windowskomponenten sind Objekte.

² Da die Unterscheidung zwischen Objekt und Klasse in der Literatur nicht immer eindeutig ist, werde ich in dieser Arbeit folgende Bezeichnungen verwenden. Ein Objekt ist die Instanz einer Klasse. Eine Klasse kann somit in einem Programm nur einmal vorkommen, hingegen können beliebig viele Objekte einer Klasse erzeugt werden. Das Erzeugen eines Objektes wird deshalb auch instanzieren einer Klasse genannt.

3 State of the Art Modelle und Simulationen

Heute existieren verschiedene Untersuchungsansätze zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Kreiseln. Grundsätzlich werden ingenieurmässige Untersuchungen in der Strassenverkehrstechnik in die folgenden drei Gruppen unterteilt³:

- empirische Lösungsansätze
- mathematische Modelle
- Simulationsmodelle

3.1 Empirische Lösungsansätze

Verkehrstechnische Untersuchungen, die zu praktisch anwendbaren Ergebnissen führen sollen, müssen sich immer auf empirische Untersuchungen abstützen. Durch empirische Studien werden diejenigen Werte ermittelt, die das Verhalten der Verkehrsteilnehmer kennzeichnen.

Um aus den gesammelten Daten vorhersagen über andere Verkehrssituationen treffen zu können, wird mittels Regression⁴ versucht, ein Zusammenhang in Form einer mathematischen Gleichung aufzustellen. Dabei spricht man von linearer Regression, falls es sich bei der Gleichung um eine Gerade handelt. Meistens liefern aber nichtlineare Funktionen genauere Ergebnisse.

Den "Grad der Anschmiegung" oder die "Strammheit des Zusammenhanges" zwischen den zugrunde liegenden Werten und den Punkten der Regressionsgleichung wird dabei durch den Korrelationskoeffizienten gemessen.

Bei der Entwicklung eines Simulationsmodells sind die Kennwerte des Modells auf derartige empirische Untersuchungen abgestützt. Die Ergebnisse des Modells werden mit den empirisch erfassten Zusammenhängen verglichen und so das Modell kalibriert und seine realistische Funktionsweise nachgewiesen.

3.2 Mathematische Modelle

Mathematische Modelle besitzen einen sehr hohen Abstraktionsgrad. Sie bestehen aus Beziehungen zwischen einzeln betrachteten Variablen, die sich aus der Struktur der Verkehrserscheinung ergeben, aus numerischen Konstanten und einer Rechenanweisung. Die behandelten Modellansätze sind entweder stochiastisch, d.h. die Variablen werden als Zufallsgrösse angesehen, deren Verteilung bestimmend ist, oder deterministisch, d.h. es wird nur eine bestimmte statistische Grösse, z.B. der Mittelwert, als repräsentativer Wert betrachtet.

Von einem deterministischen Zusammenhang gehen die statistischen Methoden zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Kreiseln aus. In diesem Berechnungsmodell werden mit Hilfe von Warteschlangenmodellen versucht, die mittleren Verkehrsaufkommen zu modellieren. Aufgrund von Formeln können daraus die mittleren Wartezeiten und Staulängen berechnet werden. Prof. Dr. Brilon hat in einem Programm und im dazugehörigen Handbuch⁵ verschiedenste dieser Formeln implementiert und erklärt. Die Verschiedenartigkeit der Formeln rührt von unterschiedlichen Fahrverhalten in verschiedenen Ländern her. So benötigt beinahe jedes Land eine eigene Formel oder zumindest Anpassungen dieser.

Mathematische Modelle haben den Vorteil, dass sie eine sehr geringe Zeitdauer zur Ermittlung des Resultats benötigen, vor allem wenn sie in einem Computerprogramm

³ Vgl. [MUNAVAR94] Seite 6ff

⁴ Vgl. [BOLEY92] Seite 205ff

⁵ Vgl. [BRILON92]

verwendet werden. Dafür beschränkt sich dieses auf einen Mittelwert oder ein Intervall und gibt nur wenig Einblick in das Verhalten der Fahrzeuge im Kreisel.

In der Simulation hingegen werden verschiedene stochastische Variablen benötigt, um z.B. den Abstand zwischen zwei erzeugten Fahrzeugen zu bestimmen.

3.3 Simulationsmodelle

Neben den empirischen und mathematischen Modellen wird zunehmend die Simulation zur Nachbildung von zufälligen Prozessen mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode angewendet. Die Simulation kann dann vorteilhaft eingesetzt werden, wenn einerseits die mathematischen Modelle bei der Berücksichtigung aller wesentlichen Einflüsse zu kompliziert werden, oder eine geschlossene Lösung nicht möglich ist, und wenn andererseits zahlreiche verschiedene Eingangsparameter untersucht werden sollten. Unter dem Begriff Simulation versteht man die Nachbildung eines realen Geschehens durch ein Modell. Das reale Geschehen wird durch mathematische Beziehungen zwischen Variablen und durch bestimmte Konstanten repräsentiert. Diese Beziehungen werden durch ein Rechenprogramm dargestellt, das auf einem Computer abläuft. Wenn das Programm durch die Verwendung von geeigneten Zufallszahlen auch die zufälligen Einflüsse des abgebildeten Geschehens einbezieht, spricht man von einer stochastischen Simulation.

Grundsätzlich werden die Simulationsmodelle in die folgenden Gruppen unterteilt:

- Ereignisorientierte Modelle
 - Transaktionsorientierte Modelle
 - Prozessorientierte Modelle
- Zeitorientierte Modelle

3.3.1 Ereignisorientierte Modelle

Ereignisorientierte Simulationen eignen sich ausschliesslich zur Behandlung diskreter Modelle. Zu jedem Zeitpunkt, an dem ein Ereignis eintritt, werden die erforderlichen Rechenoperationen prozessiert und die nächsten Folgeereignisse berechnet. Zwischen den Ereignissen wird keine Aktualisierung durchgeführt. Der Vorteil dieser Simulationstechnik ist, dass nur im Bedarfsfall Rechenleistung benötigt wird. Deshalb können die Rechenzeiten und Speicherplatzbelegung reduziert werden. Andererseits wird die Darstellung der Simulation auf dem Bildschirm durch die unterschiedlichen Aktualisierungsraten ungleichmässig und sprunghaft. Die Fahrzeuge legen im gleichen Zeitintervall bei wenigen Ereignissen grosse Strecken und bei häufigen Ereignissen entsprechend kleinere zurück.

Brilon und Grossmann⁶ entwickelten ein Simulationsmodell KNOSIMO für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlagen. Es handelt sich um ein ereignisorientiertes Programm. Demgemäss gibt es hier keinen bestimmten Zeitschritt. Die Zeitabschnitte ohne Aktivitäten werden übersprungen, während im Bedarfsfall mit beliebiger zeitlicher Genauigkeit vorgegangen werden kann.

3.3.2 Transaktionsorientierte Modelle

Friedmann Mattern⁷ beschreibt diese Art der Modellierung wie folgt: *"Eine Unterklasse der ereignisorientierten Simulation stellt die transaktionsorientierte Simulation dar, die besonders gut zur Modellierung von Warteschlangensystemen geeignet ist. Hierbei werden in einem System vernetzter Stationen Arbeitseinheiten ("Transaktionen") von einer Station zu einer anderen weitergereicht, wobei es aufgrund unterschiedlicher*

⁶ Vgl. [BRILON88]

⁷ Vgl. [MATTE95] S. 4f

Verweilzeiten bei den Stationen und Konkurrenz bei der dortigen simulierten Betriebsmittelzuteilung zu komplexen Abhängigkeiten der Transaktionen untereinander kommen kann. Durch diese spezielle Weltsicht lassen sich viele betriebswirtschaftlich interessante Systeme einfach beschreiben und modellieren, unter anderem baut die weit verbreitete Simulationssprache GPSS auf diesem Paradigma auf."

3.3.3 Prozessorientierte Modell

Prozessorientierte Modelle lösen das Verhalten der Fahrzeuge in einzelne Prozesse auf. Mattern beschreibt dieses Modell wie folgt:

"Eine andere, wesentlich breiter anwendbare Unterklasse der ereignisorientierten Simulation ist die prozessorientierte Simulation, bei der aus einer gegebenenfalls dynamischen Menge interagierender aktiver Objekte ("Prozesse") gebildet wird. Jedes derartige Objekt besitzt einen Zustand in Form lokaler Daten und durchläuft in programmierter Weise eine Folge von Ereignissen, die den lokalen Zustand, aber auch den Zustand anderer Objekte oder den globalen Systemzustand, insbesondere die Simulationszeit, ändern. Simscript und Simula stellen bekannte Vertreter prozessorientierter Simulationssprachen dar."

Das Simulationsprogramm "MASTER"⁸ basiert ebenfalls auf dem prozessorientierten Ansatz. Es verwendet ein Modellierungskonzept, welches erlaubt, ein beliebiges System als Netzwerk von Prozessen und Buffern darzustellen.

3.3.4 Zeitorientierte Modelle

Bei einer zeitorientierten Simulation wird die Zeitachse in Schritte konstanter Dauer (z.B. 1 Sekunde) eingeteilt. Zu jedem Zeitschritt wird das simulierte System betrachtet. Dabei werden nach Ablauf jedes Zeitintervalls alle Parameter aktualisiert und der Zustand des Systems wird für den nächsten Zeitschritt vorbereitet. Die Modellabläufe sind überschaubar und nachprüfbar. Die Probleme liegen hauptsächlich in der Wahl des optimalen Zeitschritts. Zu grosse Intervalle lassen die Berechnungen ungenau werden, zu kleine Intervalle ergeben eine hohe Rechenzeit.

Um einen optimalen Kompromiss aus der Ausnutzung der Rechnerleistung und der Genauigkeit zu erhalten, wurde in dieser Simulation kein Zeitschritt vom Benutzer vorgegeben. Die Länge eines Zeitschrittes wird vom System aufgrund der verfügbaren Rechenleistung definiert.

Diese Methode ergibt auf jeden Fall eine Echtzeitsimulation, d.h. eine Sekunde in der Wirklichkeit entspricht einer Sekunde in der Simulation. Es entstehen allerdings Ungenauigkeiten, wenn das System überlastet wird, denn in diesem Fall reduziert sich die Aktualisierungsrate der Prozesse und die Simulation wird ungenau. Des Weiteren kommt es zu unerwünschten Nebeneffekten in der Darstellung. Wenn ein Fahrzeug zum Beispiel nur einmal in mehreren Sekunden aktualisiert wird, legt es in dieser Zeit eine zu grosse Distanz zurück. In dieser Strecke kann aber ein Hindernis oder die Kreiseinfahrt sein und deshalb übersprungen werden. Es scheint, als fahren die Fahrzeuge zufällig über den Bildschirm.

Um dies zu verhindern, wird eine minimale Aktualisierungsrate (Parameter m_{Akt}) definiert, die nicht unterschritten wird. Ist dies aufgrund einer Systemüberlastung der Fall, wird der Benutzer gewarnt und die effektive Zeitdifferenz überschrieben. Somit wird für die Überlastungszeit keine Echtzeitsimulation mehr durchgeführt, sondern mit einem konstanten Zeitschritt verfahren.

⁸ MASTER wurde durch die Firma Swiss Simulation Engineering GmbH [SWISS95] entwickelt und entstand aus einem praxisorientierten Forschungs- und Entwicklungsprojekt, für dessen Entwicklung es 1995 mit dem Wirtschaftsförderpreis „Technologiestandort Schweiz“ ausgezeichnet wurde.

Um eine Simulation im Zeitraffer durchführen zu können, wird ein Zeitfaktor (Parameter tf) für die Berechnung der neuen Position und Geschwindigkeit sowie allen zeitabhängigen Prozessen verwendet. Ein Zeitfaktor 2 bedeutet eine doppelt so schnelle Simulation, eine Sekunde Echtzeit entsprechen zwei Sekunden der Simulationszeit. Der Zeitfaktor wird allerdings durch die minimale Aktualisierungsrate begrenzt.

4 Grundlagen des Modells Kreisel

4.1 Verkehrsregeln

Massgebend für das Verhalten der Fahrzeuge in einem Kreisel sind die gesetzlich verankerten Verkehrsregeln. An diese hat sich jedes Fahrzeug zu halten. Dadurch bilden sie eine gute Grundlage für die Modellierung des Fahrzeugverhaltens.

Im Allgemeinen finden die vom Bundesrat verordneten Verkehrsregeln⁹ in der Schweiz Anwendung. Speziell für diese Modellierung sind zu erwähnen:

Art. 6 Verhalten gegenüber Fussgängern und Benützern von fahrzeugähnlichen Geräten (Art. 33 SVG)

¹ Vor Fussgängerstreifen ohne Verkehrsregelung muss der Fahrzeugführer jedem Fussgänger oder Benutzer eines fahrzeugähnlichen Gerätes, der sich bereits auf dem Streifen befindet oder davor wartet und ersichtlich die Fahrbahn überqueren will, den Vortritt gewähren. Er muss die Geschwindigkeit rechtzeitig mässigen und nötigenfalls anhalten, damit er dieser Pflicht nachkommen kann.

Art. 8 Fahrstreifen, Kolonnenverkehr (Art. 44 SVG)

¹ Auf Strassen mit mehreren Fahrstreifen in der gleichen Richtung ist der äusserste Streifen rechts zu benutzen. Dies gilt nicht beim Überholen, Einspuren, Fahren in parallelen Kolonnen sowie innerorts.

² Das Fahren in parallelen Kolonnen ist bei dichtem Verkehr gestattet, wenn die rechte Fahrbahnhälfte dafür genügend Raum bietet. Mit langsamen Fahrzeugen ist in der äussersten Kolonne rechts zu fahren.

³ Beim Fahren in parallelen Kolonnen sowie innerorts auf Strassen mit mehreren Fahrstreifen in der gleichen Richtung ist das Rechtsvorbeifahren an andern Fahrzeugen gestattet, sofern diese nicht halten, um Fussgängern oder Benützern von fahrzeugähnlichen Geräten den Vortritt zu lassen. Das Rechtsüberholen durch Ausschwenken und Wiedereinbiegen ist jedoch untersagt.

⁴ Benützen mehrspurige Motorfahrzeuge und Radfahrer denselben Fahrstreifen, so müssen die Motorfahrzeuge links, die Radfahrer rechts fahren. Auf Fahrstreifen, die das Linksabbiegen gestatten, können Radfahrer vom Gebot des Rechtsfahrens abweichen.

Art. 13 Einspuren und Abbiegen (Art. 34 Abs. 3, 36 Abs. 1 und 3 SVG)

³ Das Wechseln auf andere Fahrstreifen zum Überholen ist auf Einspurstrecken untersagt, ausgenommen auf Fahrstreifen, die mit den gleichen Fahrzielen bezeichnet sind.

Art. 41b Kreisverkehrsplätze (Art. 57 Abs. 1 SVG)

¹ Vor der Einfahrt in einen Kreisverkehrsplatz (Signal 2.41.1 in Verbindung mit Signal 3.02) muss der Führer die Geschwindigkeit mässigen und den im Kreis von links herannahenden Fahrzeugen den Vortritt lassen.

² Bei der Einfahrt in den Kreisverkehrsplatz und, sofern kein Fahrstreifenwechsel erfolgt, bei der Fahrt im Kreis muss der Führer die Richtung nicht anzeigen. Das Verlassen des Kreises muss angezeigt werden.

Art. 47 Überschreiten der Fahrbahn (Art. 49 Abs. 2 SVG)

² Auf Fussgängerstreifen ohne Verkehrsregelung haben die Fussgänger den Vortritt, ausser gegenüber der Strassenbahn. Sie dürfen jedoch vom Vortrittsrecht nicht

⁹ Vgl. [VRV69]

Gebrauch machen, wenn das Fahrzeug bereits so nahe ist, dass es nicht mehr rechtzeitig anhalten könnte.

Bundesgerichtsurteil 127 IV 220 vom 9. August 2003

Das Bundesgericht beruft sich darin hauptsächlich auf den Art. 41b VRV und stellt folgendes fest:

Art. 41b VRV, Art. 26 Abs. 1 SVG; Vortrittsrecht unter Fahrzeuglenkern auf einer in einen Kreisel einmündenden Strasse mit mehreren Fahrstreifen.

Wenn zwei parallele Fahrstreifen auf den gleichen Fahrstreifen eines Kreisels einmünden, ist der Benutzer des linken Fahrstreifens vortrittsberechtigt, unter Vorbehalt des Vertrauensgrundsatzes (E. 3).

Der Entscheid wird damit begründet, dass der Benutzer des linken Fahrstreifens die grössere Übersicht über den Kreisel hat, hingegen der Blick des Benutzers des rechten Fahrstreifens durch ein Fahrzeug im linken Fahrstreifen behindert wird. Ebenfalls wird angeführt, dass vor der Einfahrt in den Kreisel der Blick immer nach links gerichtet werden muss und somit der Benutzer des rechten Fahrstreifens das andere Fahrzeug mit diesem Vorgang bereits sieht. Bei umgekehrten Vortrittsrechten müsste der Benutzer des rechten Fahrstreifens nach links und nach rechts schauen, was nicht der Sicherheit des Rechts und des Verkehrs entspräche.

"Il serait en effet peu compatible avec la sécurité du droit et du trafic d'imposer au conducteur cherchant à s'engager sur le giratoire d'observer simultanément les véhicules à sa droite sur la voie parallèle et le trafic à sa gauche pour satisfaire son devoir de priorité."

4.2 Geometrie

Die Festlegung der Geometriedaten erfolgt über die Hinterlegung verschiedenster Parameter zur Beschreibung des Kreisels. Aufgrund der erfassten Werte wird der Kreisel im Hauptfenster des Simulationsprogramms grafisch dargestellt.

4.2.1 Kreisfahrbahn

Die Kreisfahrbahn besteht aus einer ringförmig angeordneten Fahrbahn um eine Mittelinsel. Alle Ein- und Ausfahrten schliessen an diese Fahrbahn an.

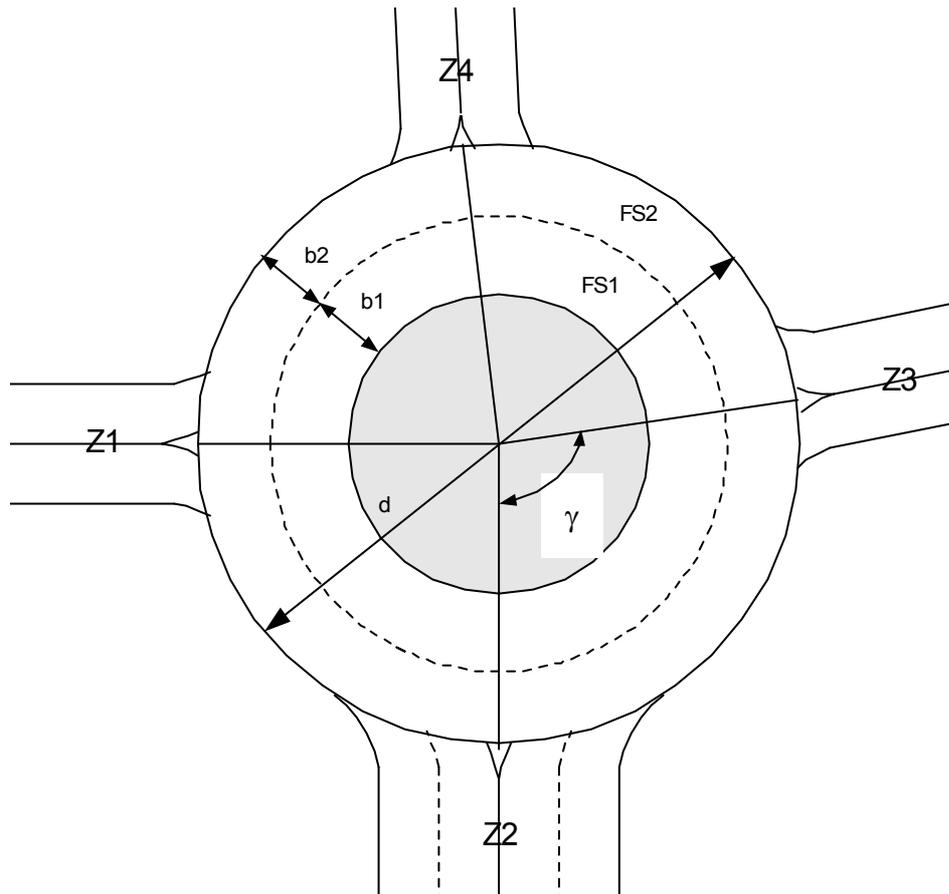


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Kreisfahrbahngeometrie

Nachfolgende Parameter sind zur Identifikation und zur geometrischen Definition notwendig.

Parameter	Abk.	Beschreibung
Nummer des Projektes	PrNr	Fortlaufende eindeutige Nummer zur Identifizierung des Projekts
Name des Projektes	PrNa	Name des Projektes
Anzahl der Zubringer	AZu	Anzahl der Zubringer an den Kreisel
Anzahl der Fahrstreifen	AFk	Anzahl der Fahrstreifen in der Kreisfahrbahn
Aussendurchmesser	d	Grösster Abstand zwischen den Fahrbahnrändern der Kreisfahrbahn
Breite der Fahrstreifen	b1 - bn	Breite für jeden der oben definierten Fahrstreifen
Überbreite Fahrbahn	üb	Wenn nur ein Fahrstreifen der Kreisfahrbahn definiert ist, kann dieser als überbreiter Fahrstreifen ausgebildet werden. Somit ist das Überholen im Kreisel möglich und erlaubt.
Winkel zwischen den Zubringern	γ	Sektor zwischen den Zubringerrachsen

Tabelle 1: Zustände eines Fussgängerstreifens

4.2.2 Zubringer

Als Zubringer wird ein Ast des Kreisels, bestehend aus Ein- und Ausfahrt bezeichnet. Weiter kann ein Zubringer eine Mittelinsel, einen Fussgängerstreifen und eine Busspur aufweisen.

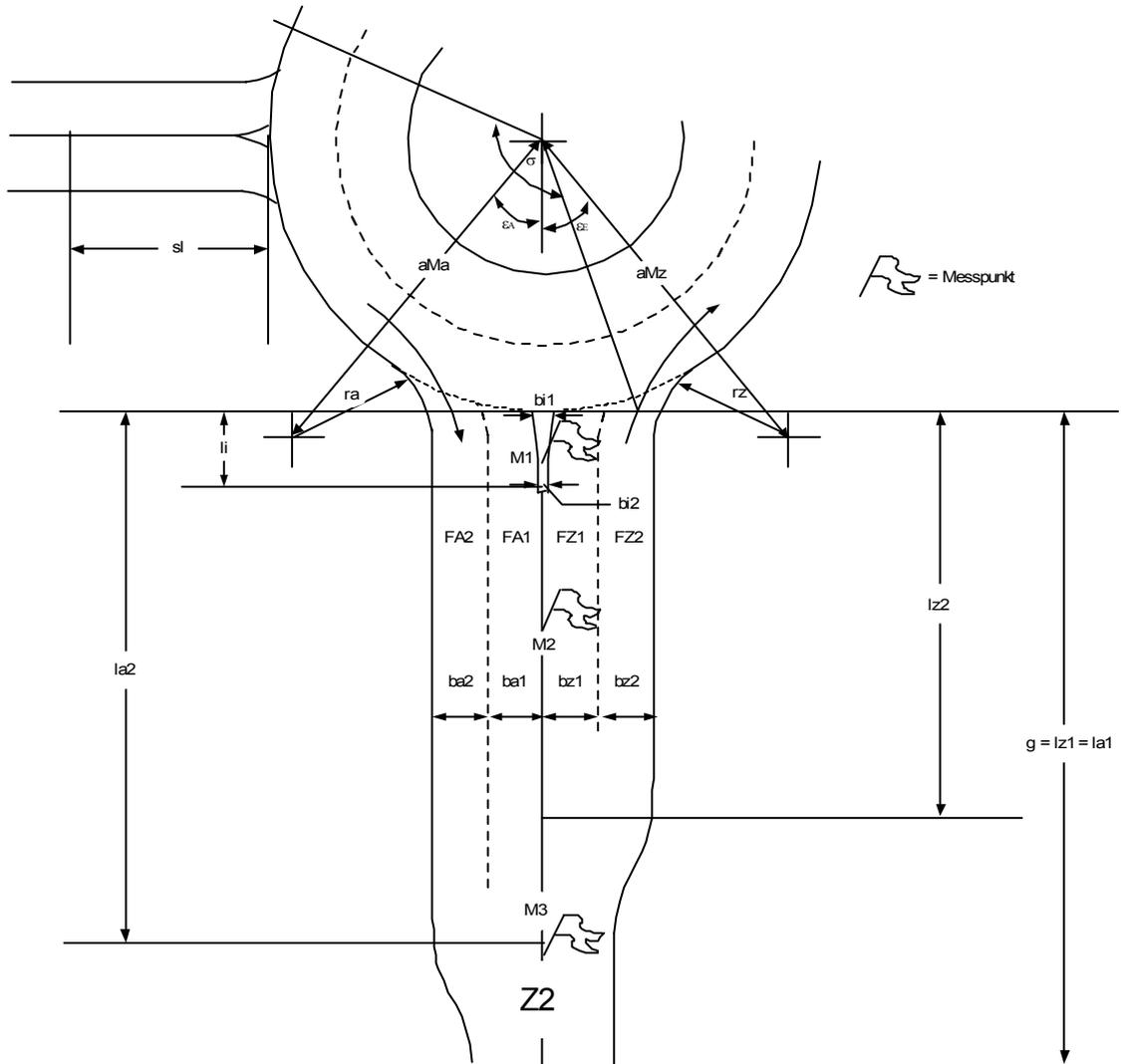


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Zubringers und dessen geometrischer Größen

Zur Definition sind folgende Größen notwendig:

Parameter	Abk.	Beschreibung
Name des Zubringers	ZNa	Name des Zubringers
Gesamtlänge des Zubringers	g	Die Simulationslänge des Zubringers
Knotensichtweite	σ	Bis zu diesem Winkel auf der Kreisfahrbahn zum Einmündungspunkt kann ein Fahrzeug gesehen werden. Alle Fahrzeuge, die weiter entfernt sind, sind für die Einfahrtsentscheidung des wartenden Fahrzeuges nicht relevant. Bei mehrstreifigen Kreisfahrbahnen wird der Winkel auf allen zu kreuzenden und auf dem Ziel-fahrbahnen berücksichtigt.

Parameter	Abk.	Beschreibung
Zubringerwinkel	δ	Winkel in dem der Zubringer auf die Tangente der Kreiselaussenseite trifft.
Startgeschwindigkeit	vS	Maximale Geschwindigkeit mit der ein Fahrzeug auf dem Zubringer fährt.
Sichtweite in Einfahrt links	sl	Bis zu dieser Entfernung in der Einfahrt links vom Einmündungspunkt kann ein Fahrzeug gesehen werden. Alle Fahrzeuge, die weiter entfernt sind, sind für die Einfahrtsentscheidung des wartenden Fahrzeuges nicht relevant.
Alpha	α	Winkel, um den das Fahrzeug beim Eintritt in den Kreisel abgelenkt wird. Dieser Winkel wird vom System aus den anderen Parametern berechnet.
Beta	β	Winkel, um den das Fahrzeug durch die Mittelinsel von der geraden Weiterfahrt abgelenkt wird. Dieser Winkel wird vom System aus den anderen Parametern berechnet.

Tabelle 2: Allgemeine geometrische Größen des Zubringers

Einfahrt:

Parameter	Abk.	Beschreibung
Anzahl Fahrstreifen der Einfahrt	AFz	Anzahl Fahrstreifen der Einfahrt
Länge der Fahrstreifen der Einfahrt	lz1 – lzn	Beginn der Teilung der Fahrstreifen, wenn diese erst später in der Einfahrt erfolgt
Breite der Fahrstreifen der Einfahrt	bz1 – bzn	Breite je definierten Fahrstreifen
Aufsplittung Einfahrt	AUZ1 – AUZn	Trennt sich der Fahrstreifen nach rechts, nach links oder in der Mitte
Einfahrtradius	rz	Kurvenradius der Einfahrt
Abstand Mittelpunkt Einfahrtkreis von Kreiselmittelpunkt	aMz	Abstand zwischen Mittelpunkt des Einfahrtkreises und Kreiselmittelpunkt (optional)
Winkel Mittelpunkt Einfahrtkreis von Zubringerwinkel	ε_E	Winkel zwischen Mittelpunkt des Einfahrtkreises und Zubringerwinkel (optional)

Tabelle 3: Geometrische Größen der Einfahrt

Ausfahrt:

Parameter	Abk.	Beschreibung
Anzahl Fahrstreifen der Ausfahrt	AFa	Anzahl Fahrstreifen der Ausfahrt
Länge der Fahrstreifen der Ausfahrt	la1 – lan	Vereinigung der Fahrstreifen, wenn diese in der Ausfahrt erfolgt
Breite der Fahrstreifen der Ausfahrt	ba1 – ban	Breite je definierten Fahrstreifen
Aufsplittung Ausfahrt	AUA1	Trennt sich der Fahrstreifen nach rechts, nach

Parameter	Abk.	Beschreibung
	– AU- An	links oder in der Mitte
Ausfahrtradius	ra	Kurvenradius der Ausfahrt
Abstand Mittelpunkt Ausfahrtkreis von Kreiselmittelpunkt	aMa	Abstand zwischen Mittelpunkt des Ausfahrtkreises und Kreiselmittelpunkt (optional)
Winkel Mittelpunkt Ausfahrtkreis von Zubringerwinkel	ε_A	Winkel zwischen Mittelpunkt des Ausfahrtkreises und Zubringerwinkel (optional)

Tabelle 4: Geometrische Grössen der Ausfahrt

Mittelinsel und Messpunkte:

Parameter	Abk.	Beschreibung
Abmessungen der Insel zwischen der Ein- und Ausfahrt	li, bi1 u. bi2	Länge, Breite in der Einfahrt und an der Kreisfahrbahn
Messpunkte	M1 – M3	Punkte zur Festlegung besonderer Mess- und Auswertungsschnitte

Tabelle 5: Geometrische Grössen der Mittelinsel und der Messpunkte

4.2.3 Fussgängerstreifen

Der Fussgängerstreifen befindet sich meistens kurz vor der Einfahrt zum Kreisel am Ende des Zubringers.

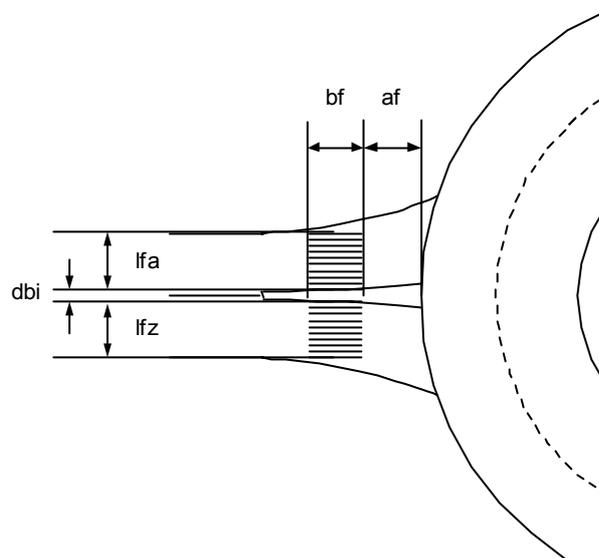


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Fussgängerstreifens und dessen geometrischer Grössen

Zur Definition sind folgende Grössen notwendig:

Parameter	Abk.	Beschreibung
Abstand von der Einfahrt	af	Abstand zwischen dem Einmündungspunkt des Zubringers und dem Fussgängerstreifen, gemessen auf der Mittelachse
Breite	bf	Breite des Fussgängerstreifens (FGS)

Parameter	Abk.	Beschreibung
Länge Einfahrt	lfz	Länge des FGS über die Einfahrt
Länge Ausfahrt	lfa	Länge des FGS über der Ausfahrt
Durchschnittliche Breite der Insel	dbi	Falls eine Insel vorhanden ist

Tabelle 6: Geometrische Grössen des Fussgängerstreifens

4.2.4 Fahrzielsignalisation in der Einfahrt

Wenn bei der Kreiseleinfahrt eine spezielle Signalisation betreffend des Fahrziels besteht, kann diese mit den folgenden Grössen angegeben werden:

Parameter	Abk.	Beschreibung
Wahrscheinlichkeit der Verwendung	WSig	Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug sich an die Signalisation hält
Anteil Fahrzeuge pro Fahrstreifen und Ziel	AFSnm	Anteil Fahrzeuge, welche die Kombination Ziel n – Fahrstreifen m verwenden.
Anteil Fahrzeuge pro Fahrstreifen	AFSn	Wenn keine Signalisation angegeben ist, kann hier der Anteil der Fahrzeuge, die den entsprechenden Fahrstreifen benutzen, eingegeben werden.

Tabelle 7: Grössen der Signalisation

4.2.5 Busspur

Eine Busspur ist für den öffentlichen Busverkehr vorgesehen und ermöglicht diesem eine vortrittsberechtigte Fahrt.

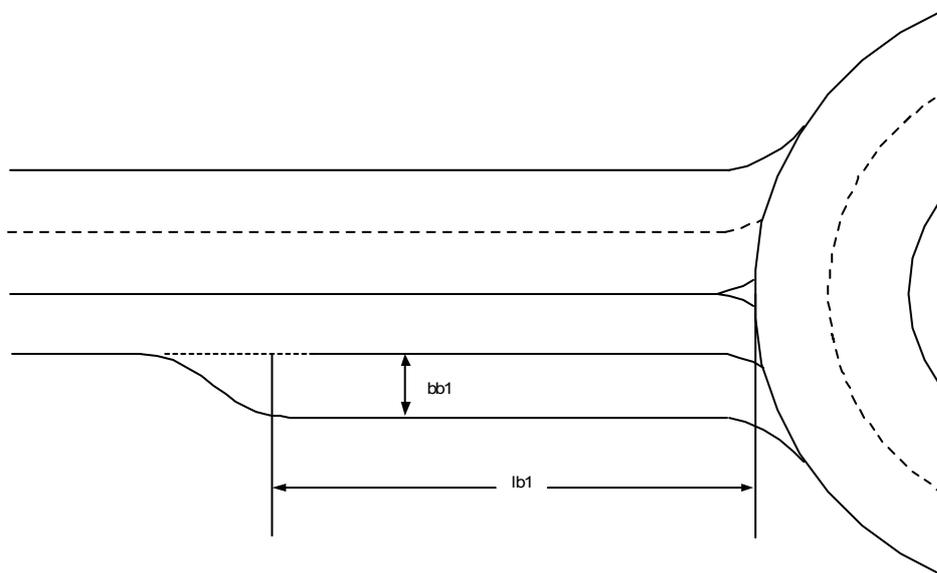


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Busspur und deren geometrischer Grössen

Zur Definition sind folgende Grössen notwendig:

Parameter	Abk.	Beschreibung
Länge	lb	Abstand von der Aufweitung der Busspur zur Einfahrt in den Kreisell
Breite	bb	Fahrbahnbreite

Tabelle 8: Geometrische Grössen der Busspur

4.2.6 Tramlinien

Tramlinien werden durch Punkte definiert. Für die Darstellung wird immer der kürzeste Weg zwischen den Punkten als Fahrstrecke genommen. Zusätzlich müssen für kreuzende Fahrbahnen Haltepunkte für die Fahrzeuge definiert werden. Grundsätzlich sind bei einer Tramdurchfahrt folgende Fälle denkbar:

- durch Zubringer
- tangential durch Kreisfahrbahn
- zentral durch Kreisfahrbahn

Alle Formen sind durch die entsprechende Positionierung der Trampunkte abbildbar. Stellvertretend für die anderen Fälle wird nachfolgend anhand einer Tramdurchfahrt durch den Zubringer die Modellierung beschrieben.

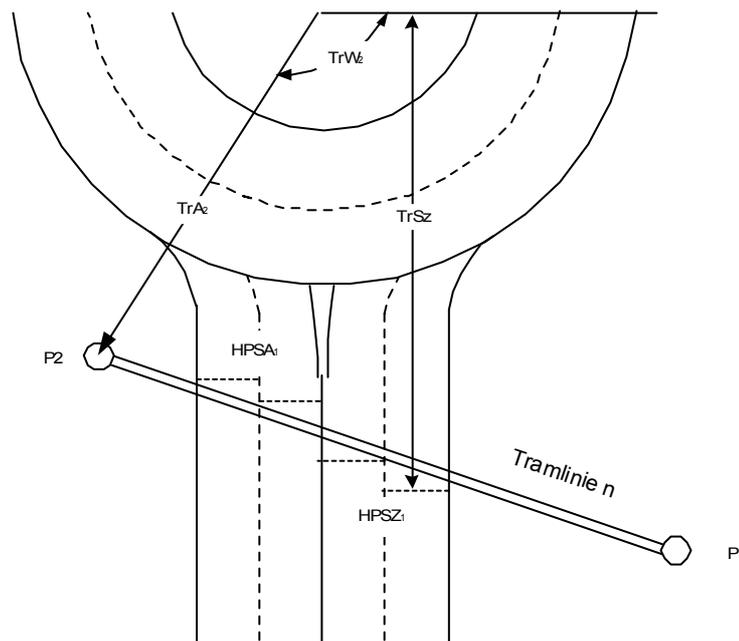


Abbildung 5: Tramlinie mit Schnitt durch Zubringer

Zur Definition sind folgende Grössen notwendig:

Parameter	Abk.	Beschreibung
Anzahl der Linien	AL	Anzahl unabhängiger Tramlinien in der Modellierung
Tram fährt in beide Richtungen	TrBr	Ein Tram kann von beiden Endpunkten der Linie starten

Tabelle 9: Allgemeine Grössen von Tramlinien

Punkte:

Parameter	Abk.	Beschreibung
Nr	TrNr	Nummer, Bezeichnung des Punktes
Winkel	TrW _n	Winkel des Punktes in Bezug auf den Mittelpunkt des Kreisels
Abstand	TrA _n	Abstand des Punktes vom Mittelpunkt des Kreisels
Wartezeit	TrWz _n	Wartezeit des Trams an diesem Punkt, z.B. für Haltestelle
Fahrzeit	TrFz _m	Fahrzeit des Trams zwischen dem Punkt n-1 und n

Tabelle 10: Geometrische Grössen von Punkten der Tramlinien

Haltepunkte:

Parameter	Abk.	Beschreibung
Schnittpunkte mit Kreisel	HPSKn	Winkel des Punktes in Bezug auf den Mittelpunkt des Kreisels für jeden Fahrstreifen.
Schnittpunkte mit der Einfahrt	HPSZn	Abstand des Punktes vom Mittelpunkt des Kreisels für jeden Fahrstreifen der Einfahrt.
Schnittpunkte mit der Ausfahrt	HPSAn	Abstand des Punktes vom Mittelpunkt des Kreisels für jeden Fahrstreifen der Ausfahrt.

Tabelle 11: Geometrische Grössen von Haltepunkten der Tramlinien

Der Begriff der „Linie“ wird eingeführt, weil es verschiedene Tramdurchfahrten geben kann, die unabhängig voneinander bedient werden. Mit der Definition von mehreren Linien können so völlig unabhängige Elemente geschaffen werden.

Die Fahrzeuge der Simulation werden an den Haltepunkten stoppen, falls eine Tramlinie besetzt ist. Sie warten solange, bis die Linie wieder frei wird, d.h. die Ampel über der Haltelinie die Fahrbahn die Durchfahrt freigibt. Deshalb müssen für jede Kreuzung einer Linie mit einem Zubringer oder dem Kreisel Haltepunkte definiert werden.

4.3 Fahrzeuge

Fahrzeuge unterscheiden sich durch ihren Typ. Parameter zur Beschreibung von Fahrzeugen werden für jeden Typ definiert. Fahrzeugtypen können beliebig viele erfasst werden, dadurch kann die benötigte Differenzierung zwischen den Fahrzeugen erreicht werden.

Folgende Fahrzeugtypen wurden vordefiniert:

- Personenwagen (PW)
- Motorräder (MR)
- Lastwagen (LW)
- Bus

Für jeden Fahrzeugtyp existieren folgende Parameter:

Parameter	Abk.	Beschreibung
Länge	fzl	Fahrzeuglänge über alles
Breite	fzb	Breite des Fahrzeuges
Maximale Geschwindigkeit	vmax	Maximale Geschwindigkeit, die ein Fahrzeug erreicht.
Maximale Beschleunigung	amax	Maximale Beschleunigung, die ein Fahrzeug erreicht.
Maximales Bremsen	bmax	Maximale Bremsbeschleunigung, die ein Fahrzeug erreicht.
Bremsbeschleunigung ohne Bremsbetätigung	bo	Bremsbeschleunigung, welche das Fahrzeug erfährt, wenn es ohne zu Bremsen ausrollt.
Minimalabstand	mAbst	Minimalabstand zwischen zwei Fahrzeugen (vorne und hinten)
Minimalabstand seitlich	mAbsts	Minimalabstand seitlich zu einem anderen Fahrzeug oder Hindernis
Maximale Querschleunigung des Fahrers	gFz	Mittelwert des Vielfachen des eigenen Gewichtes, das durch den Fahrer in der Kurve gewählt wird.
Standardabweichung	gFza	Standardabweichung zum normal verteilten Parameter gFz
Maximale Querschleunigung des Fahrzeuges	gFa	Mittelwert des Vielfachen des eigenen Gewichtes, das vom Fahrzeug bzw. von den Reifen in seitlicher Richtung ohne wegzurutschen geleistet werden kann.
Standardabweichung	gFaa	Standardabweichung zum normal verteilten Parameter gFa
Fahrvermögen und Erfahrung	FuE	Mittleres Fahrvermögen (vgl. Kap. 4.4)
Standardabweichung	FuEa	Standardabweichung zum normal verteilten Parameter FuE
Maximaler Winkel beim Fahrstreifenwechsel	swma	Maximaler Einschlagwinkel beim Fahrstreifenwechsel
Minimaler Winkel beim Fahrstreifenwechsel	swmi	Minimaler Einschlagwinkel beim Fahrstreifenwechsel
Grenzzeitlücke	GZL	Minimale Zeitlücke beim Einfahren in den Kreisel ¹⁰
Standardabweichung	sGZL	Standardabweichung zur Grenzzeitlücke
Folgezeitlücke	FGZL	Minimale Zeitlücke beim Einfahren in den Kreisel als Folgefahrzeug
Standardabweichung	sFGZL	Standardabweichung zur Folgegrenzzeitlücke
Grenzzeitlücke Fahrstreifenwechsel	GZLS	Minimale Zeitlücke beim Fahrstreifenwechsel

¹⁰ Zur Vereinfachung werden in dieser Modellierung unterschiedliche Grenzzeitlücken je Fahrstreifen nicht berücksichtigt.

Parameter	Abk.	Beschreibung
Standardabweichung	sGZLS	Standardabweichung zur Grenzzeitlücke Fahrstreifenwechsel
Folgezeitlücke Fahrstreifenwechsel	FGZLS	Minimale Zeitlücke beim Fahrstreifenwechsel als Folgefahrzeug
Standardabweichung	sFGZLS	Standardabweichung zur Folgegrenzzeitlücke Fahrstreifenwechsel

Tabelle 12: Fahrzeugparameter

4.4 Verhalten der Fahrzeuge

Grundsätzlich verhält sich jedes Fahrzeug in der Realität unterschiedlich. In gewissen Bandbreiten, die durch äussere Einflüsse (z.B. Eigenschaften des Fahrzeuges) gegeben sind, kann der Fahrer als Individuum frei über sein Verhalten entscheiden.

Untersuchungen in der Praxis haben aber gezeigt, dass sich dieses Verhalten oft sehr ähnlich ist. Dadurch ist eine computergestützte Simulation überhaupt erst möglich.

Um dieses individuelle Verhalten der Fahrzeuge abbilden zu können, werden beim Erzeugen des Fahrzeuges verschiedene Parameter zufällig ermittelt. Zufällig heisst, dass innerhalb einer Bandbreite (z.B. Standardabweichung) mittels einer vorgegebenen Zufallsverteilung (z.B. Normalverteilung) Werte ermittelt werden. Die Art der Verteilung und die Parameter dazu sind in den Einstellungen (vgl. Kap.4.3) definiert.

Speziell in diesem Kapitel zu erwähnen, sind so genannte Verhaltensparameter die direkten Einfluss auf das Fahrverhalten des Fahrzeuges haben.

Dabei wird ein zufällig individueller Wert für das Fahrvermögen und die Erfahrung des Fahrers ermittelt. Dieser Wert gibt auf einer Scala von null bis zehn an, wie gut das Fahrvermögen und wie gross die Erfahrung des Fahrer ist. Null ist dabei der schlechteste Wert und zehn der beste.

Die Verteilung dieses Parameters ist in den Einstellungen definiert.

In der Modellierung sind folgende Werte vom Fahrvermögen abhängig¹¹:

- Reaktionsfaktor beim Bremsen und Beschleunigen (r_a):
Abhängig vom Fahrvermögen und dem Einschätzungsvermögen wird anders auf eine Änderung der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeuges reagiert.
- Einflussfaktor der Durchfahrtsbreite auf die Geschwindigkeit (e_{bv}):
Abhängig vom Fahrvermögen und dem Einschätzungsvermögen ergibt sich ein unterschiedlicher Einfluss der Durchfahrtsbreite auf die Geschwindigkeit.

4.5 Verkehrsstärke

Verkehrsstärken werden über eine Matrix stromweise mit folgenden Attributen festgelegt:

- Intervallgrösse für die eingegebenen Mengen
- Verkehrsstärke pro Einfahrt und Fahrziel
- Anteil pro Fahrzeugtyp
- Anzahl Fussgänger
- Takt der Trams pro Linie
- Standardabweichung Takt der Trams pro Linie

¹¹ Details und Formeln werden im Anhang A 2.3.5 beschrieben.

Somit ergibt sich beispielhaft folgende Matrix:

	Einfahrt 1	Einfahrt 2	Einfahrt 3	Einfahrt 4	Total
Einfahrt 1	0	100	400	100	600
Einfahrt 2	100	0	400	50	550
Einfahrt 3	200	100	0	150	450
Einfahrt 4	200	300	200	0	700
Total	500	500	1000	300	2300
Fussgänger	70	40	10	10	130
Anteil PW in %	80	80	70	80	75.7
Anteil MR in %	5	5	5	0	4.3
Anteil LW in %	10	10	15	10	12.2
Anteil LZ in %	5	5	10	10	7.8
Total	100	100	100	100	100

Tabelle 13: Matrix der Verkehrsstärken

	Takt(Min.)	Std. Abw.
Tramlinie 1	5	0.5
Tramlinie 2	8	0.5
Tramlinie 3	2	0.5

Tabelle 14: Matrix des Taktverkehrs Tram

Summen pro Einfahrt werden bei der Eingabe automatisch berechnet. Bei der Summe der Anteile je Fahrzeugtyp wird jede Einfahrt mit der Anzahl der Fahrzeuge gewichtet.

4.6 Verkehrsablauf

Zur Steuerung des Verkehrsablaufes werden unter allgemeinen Eigenschaften Größen definiert, welche das Fahrzeugverhalten als Kollektiv (makroskopisch) beschreiben:

Parameter	Abk.	Beschreibung
Mittlere Sichtweite	ms	Distanz, welche ein Fahrer im Mittel voraus schauen kann, um auf Ereignisse zu reagieren.
Standardabweichung	msa	Da die mittlere Sichtweite mittels einer normalverteilten Zufallszahl für jedes Fahrzeug individuell festgelegt wird, muss zusätzlich die Standardabweichung angegeben werden.
Wahrscheinlichkeit Blinker	WB	Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug beim Wechseln des Fahrstreifens und beim Ausfahren den Blinker setzt.
Wahrscheinlichkeit Halt vor FGS	WHF	Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug vor dem Fussgängerstreifen oder der Tramdurchfahrt anhält.

Parameter	Abk.	Beschreibung
Mittlere Geschwindigkeit eines Fussgängers	MVFG	Mittlere Geschwindigkeit, die ein Fussgänger beim Überqueren des Fussgängerstreifens verwendet.
Standardabweichung	MVFGA	Standardabweichung zum normalverteilten Parameter MVFG
Mittlere Zeitlücke eines Fussgängers	MZLFG	Zeitlücke, die ein Fussgänger benötigt, um die Fahrbahn zu queren.
Standardabweichung	MZLFGA	Standardabweichung zum normalverteilten Parameter MZLFG

Tabelle 15: Allgemeine Eigenschaften des Verkehrsablaufes

4.7 Zusammenhänge Geometrie und Verkehrsablauf

4.7.1 Quelle

Eine Quelle erzeugt mittels einer Hyperlang-Verteilung die eingegebene Anzahl Fahrzeuge. Diese werden sofort am Startpunkt des Geometrieobjektes positioniert und beginnen von dort ihre Reise durch den Kreisel.

Abstand zwischen den Fahrzeugen beim Eintritt

Dawson¹² entwickelte 1968 ein Modell, das als Hyperlang-Verteilung¹³ bezeichnet wird. Dieses Modell ist eine lineare Kombination aus einer verschobenen Exponentialverteilung und einer verschobenen Erlangverteilung. Diese beschreiben jeweils die ungestörte (freie) und gestörte (abhängige) Zeitlückenverteilung.

Aufgrund der Fahrzeugmenge pro Zeitintervall wird die mittlere Freizeit zwischen den Fahrzeugen errechnet. Die Verteilung setzt sich aus einer Verteilung für freie Fahrzeuge und einer Verteilung für abhängige Fahrzeuge zusammen. Die Zeitlücke der freien Fahrzeuge wird mit einer verschobenen Exponentialverteilung berechnet, die der abhängigen Fahrzeuge mit einer verschobenen Erlang-Verteilung.

¹² Vgl. [DAWSON68].

¹³ Details und Herleitung der Hyperlang-Verteilung sind im Anhang A 2.3.1 beschrieben.

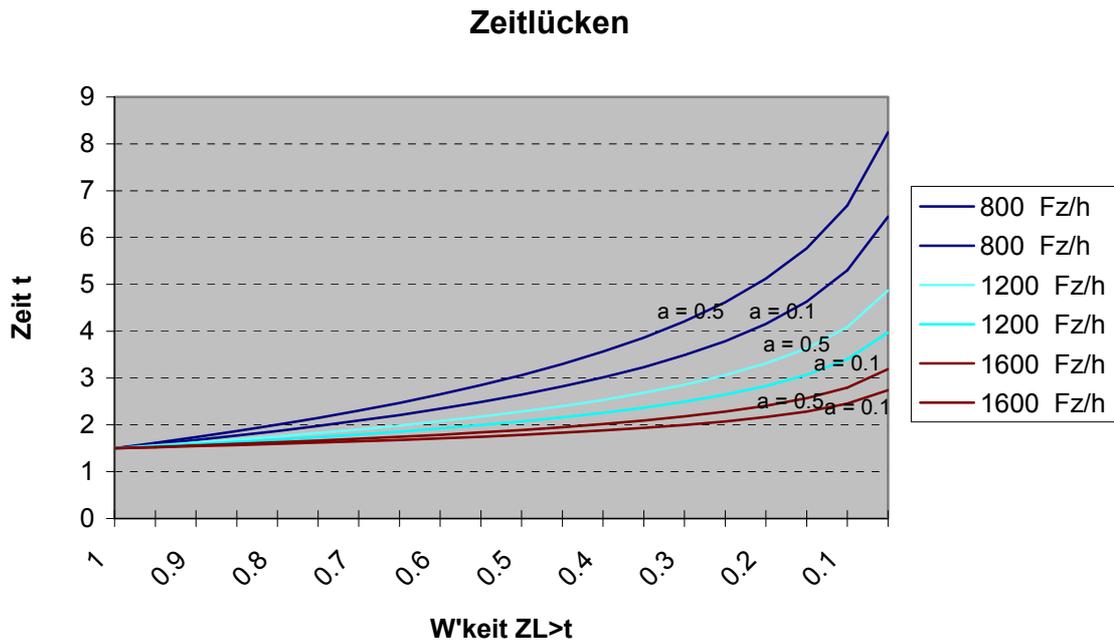


Abbildung 6: Zeitlückenverteilung bei freien und abhängigen Fahrzeugen

Um die Verzögerung zwischen der Erzeugung zweier Fahrzeuge zu steuern, wird eine Zeitlücke berechnet. Diese Zeitdauer wird verwendet, um den Erzeugungsprozess der Quelle zu verzögern.

Ist die Zeit abgelaufen, wird die Quelle wieder aktiv und erzeugt ein Fahrzeug. Dabei wird der Typ zufällig im Verhältnis der angegebenen Anteile ermittelt.

Fahrzeugtyp

Als Fahrzeugtypen werden Gruppen von Fahrzeugen mit ähnlichen Eigenschaften verstanden, z.B. PW, LW, etc.

Der Fahrzeugtyp wird gemäss den eingegebenen Anteilen gleichverteilt errechnet¹⁴.

Geschwindigkeit:

Für jedes Fahrzeug wird beim Eintreten in die Simulation eine Wunschgeschwindigkeit festgelegt. Das Fahrzeug versucht diese Geschwindigkeit in einem freien Verkehrsablauf zu erreichen.

Brilon¹⁵ hat 1976 gezeigt, dass eine Log-Normalverteilung¹⁶ eine brauchbare Annäherung an die Ausprägungen der Wunschgeschwindigkeit darstellt.

¹⁴ Details der Berechnung sind im Anhang A 2.3.2 beschrieben.

¹⁵ Vgl. [BRILON76].

¹⁶ Details, bzw. Formeln zur Log-Normalverteilung sind im Anhang A 2.3.3 beschrieben.

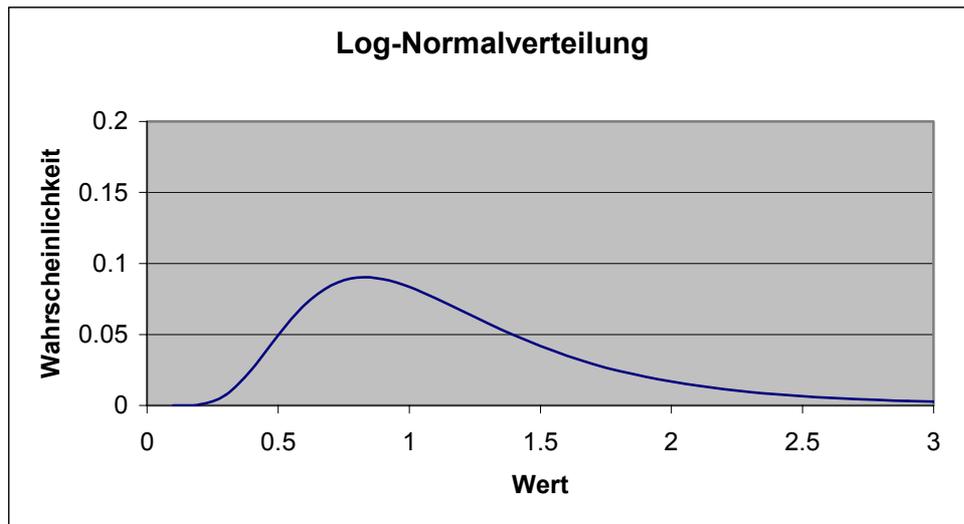


Abbildung 7: Log-Normalverteilung für $\sigma = 0.5$ und $\mu = 0$

Fahrziel

Für die Modellierung ist für jedes Fahrzeug das Fahrziel bereits bei der Erzeugung zu bestimmen. Dabei wird aufgrund der eingegebenen Verkehrsstärken abhängig vom Fahrzeugtyp das Ziel zufällig bestimmt¹⁷, d.h. es gibt keine systematische Bildung von Fahrzeugkolonnen mit gleicher Fahrrichtung¹⁸.

4.7.2 Fussgängerstreifen

Die eingegebene Anzahl Fussgänger wird mittels einer Normalverteilung zufällig auf der linken und rechten Seite der Fahrbahn erzeugt. Diese warten am Rand der Fahrbahn bis die Fahrbahn frei¹⁹ wird. Anschliessend queren Sie die Fahrbahn bis zur anderen Seite.

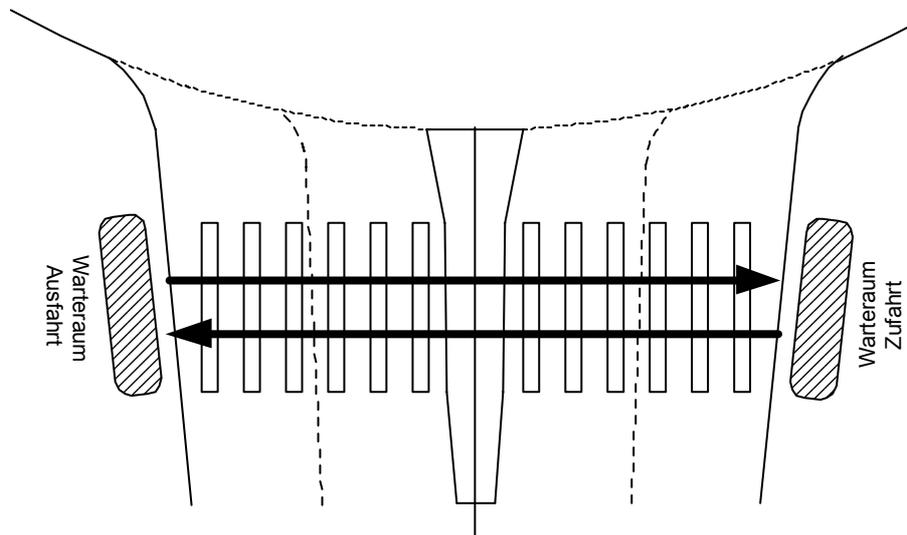


Abbildung 8: Situation Fussgänger bei Fussgängerstreifen

¹⁷ Details sind im Anhang A 2.3.4 beschrieben.

¹⁸ Vgl. auch [MUNAWAR94] S.56f.

¹⁹ Fussgänger sind gegenüber Fahrzeugen vortrittsberechtigt. Trotzdem wird ein Fussgänger überprüfen, ob das nächste Fahrzeug anhalten kann (bzgl. seines Abstands und seiner Geschwindigkeit) und nur dann die Fahrbahn betreten, wenn eine unfallfreie Querung möglich ist.

Ein Fussgängerstreifen kann folgende Zustände einnehmen:

Es existieren	Zustand des Fussgängerstreifens
keine Fussgängerobjekte	frei
nur Fussgängerobjekte im Warteraum	warten
Fussgängerobjekte auf dem Fussgängerstreifen und evtl. im Warteraum	besetzt

Tabelle 16: Zustände eines Fussgängerstreifens

Zeitlücken zwischen der Erzeugung von Fussgängerobjekten

Die Berechnung der Zeitlücke zum nächsten Fussgänger benutzt eine Normalverteilung. Aus eingegebenen Fussgängermengen wird eine durchschnittliche Zeitlücke errechnet²⁰, die den Mittelwert und die Standardabweichung der Normalverteilung bildet.

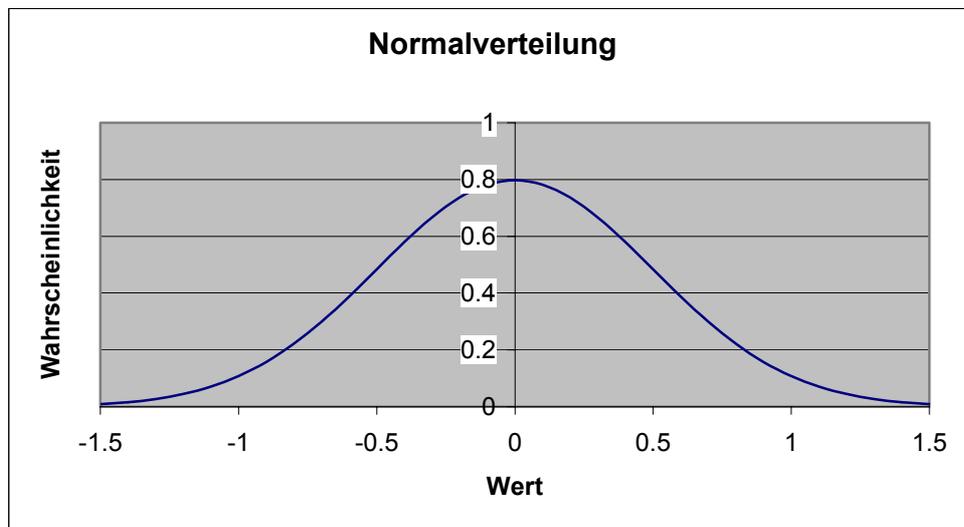


Abbildung 9: Normalverteilung für $\sigma = 0.5$ und $\mu = 0$

Ist diese Zeit abgelaufen wird das Fussgängerstreifenobjekt aktiv und erzeugt ein Fussgängerobjekt zufällig²¹ für die Ein- oder Ausfahrt auf der Seite der Strasse. Dieses versetzt den Fussgängerstreifen in den Zustand „Warten“.

Ist die Erzeugung abgeschlossen, berechnet das Fussgängerstreifenobjekt die neue Zeitlücke und inaktiviert sich selber für diese Zeitspanne.

Der gesamte Prozess der Fussgängersimulation wird im Kapitel 7 im Detail beschrieben.

4.7.3 Busverkehr

Die Modellierung des Busverkehrs kennt grundsätzlich zwei Möglichkeiten für den Eintritt in die Simulation. Einerseits, wenn eine Busspur vorhanden ist und bis an den Rand der Simulationsumgebung reicht, werden Busse direkt in der Busspur erzeugt (vgl. Abbildung 10, Situation 1). Auf der anderen Seite kann keine oder eine nur kurze Busspur, welche nicht bis zum Rand der Simulationsumgebung reicht, dazu führen, dass Busse in der normalen Fahrbahn erzeugt werden (vgl. Abbildung 10, Situation 2).

²⁰ Details zur Berechnung sind im Anhang A 2.4.1 beschrieben.

²¹ Die Ermittlung der Strassenseite ist im Anhang A 2.4.2 beschrieben

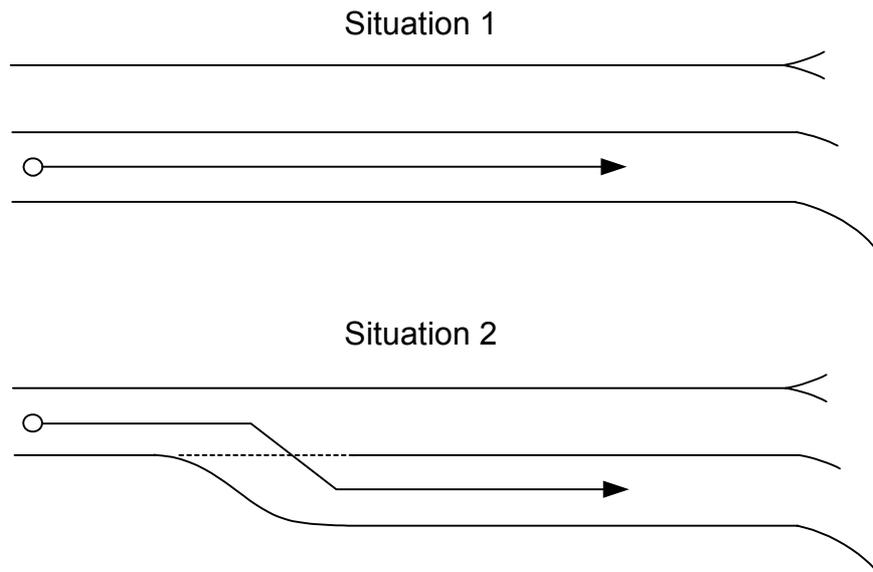


Abbildung 10: Situationen beim Beginn der Busspur

In beiden Fällen erzeugt das Fahrzeugquellenobjekt den Bus und entscheidet aufgrund der Situation über den Startpunkt. Dabei wird mittels der Hyperlangverteilung (vgl. Kap. 4.7.1) die Zeitlücke berechnet unter Berücksichtigung des Anteils der Busse am Verkehrsaufkommen.

4.7.4 Tramverkehr

Für die Modellierung des Tramverkehrs wird ein analoges Quellenobjekt (vgl. Kap. 4.7.1) verwendet, welches das Tramobjekt am Startpunkt seiner Linie erzeugt und startet. Im Unterschied zu den „normalen“ Fahrzeugen handelt es sich dabei aber um Linienverkehr, der nur in beschränkter Masse der zufälligen Unregelmässigkeit unterliegt. Da diese Abweichungen vom Fahrplan bei der geringen Anzahl keinen Einfluss auf den Verkehrsfluss der Fahrzeuge haben, wird von einer Normalverteilung²² zur Modellierung der Tramobjekte ausgegangen. Das heisst, der Abstand zwischen den Trams ist pro Linie annähernd gleich gross.

Wenn die Grösse VKR (Verkehr in beiden Richtungen) festgelegt ist, wird zufällig am Startpunkt oder Endpunkt ein Tram gestartet, ansonst immer nur am Startpunkt.

²² Details zur Berechnung der Zeitlücken werden im Anhang A 2.4.1 erläutert.

5 Informatikkonzept zur Modellierung des Verkehrssystems Kreisel

Bei der Modellierung des Verkehrssystems Kreisel ergeben sich mehrere Anforderungen an das Informatikkonzept. Deren Umsetzung tragen entscheidend zu der Verwendbarkeit der Ergebnisse bei:

- Hohe Rechenleistung zur Bewältigung grosser Mengen an Berechnungen
- Speicherung von grossen Datenmengen für Auswertungen
- Einfache Benutzeroberfläche, um die Übersicht über die grosse Menge an Parametern zu gewährleisten

Wie schon Eingangs erwähnt, wurde für diese Modellierung das Betriebssystem Windows und die Programmiersprache Delphi 7.0 verwendet.

5.1 Multiprozessanwendung

Um das erstellte Programm auch auf 'normalen' PCs verwenden zu können, wird die verfügbare Rechenzeit möglichst optimal auf verschiedene benötigte Prozesse (Threads) aufgeteilt.

Die verfügbare Rechenzeit wird vom Prozessscheduler²³ des Betriebssystems den einzelnen Anwendungen zugeteilt. Die der Simulation zur Verfügung stehende Zeit errechnet sich deshalb:

$$(1) \quad pts = ptt - ptu$$

Wobei: pts: Prozessorzeit für die Simulation
 ptt: Gesamte Prozessorzeit
 ptu: anderweitig verwendete Prozessorzeit (Betriebssystem, andere Anwendungen, etc.)

Für jedes aktive Objekt der Simulation wird ein Kindprozess des Programms erzeugt. Der Prozessscheduler des Betriebssystems übernimmt die regelmässige Ausführung, bzw. Aktualisierung der Prozesse. Je mehr aktive Objekte bzw. Kindprozesse benötigt werden, desto seltener werden die Prozesse durch den Scheduler angesprochen.

Wenn ein Prozess angehalten wird, oder auf ein Ereignis wartet, wird die Kontrolle an den Prozessscheduler des Betriebssystems abgegeben. Dadurch wird unnötiger Rechenaufwand vermieden. Nach der vorbestimmten Wartezeit gibt der Prozessscheduler dem Prozess die Kontrolle zur Fortsetzung zurück.

Da der Scheduler zwar eine periodische aber nicht regelmässige Aktualisierung der Prozesse gewährleistet, wird die Zeit zwischen den Aktualisierungen gemessen, und als Grundlage für die Aktualisierung genommen. Ein Beispiel zur Illustration:

Der Prozess Fahrzeug 107 wurde zuletzt bei Simulationszeit 3'652'100 ms aktualisiert. Bei Simulationszeit 3'652'140 ms wird er erneut aktualisiert. Aus der Differenz von 40 ms werden die neue Position und die Geschwindigkeitsänderung beim Bremsen und Beschleunigen berechnet.

$$\text{Neue Position} = \text{alte Position} + 0.04 \text{ s} * \text{aktuelle Geschwindigkeit}$$

$$\text{Neue Geschwindigkeit} = \text{alte Geschw.} + 0.04 \text{ s} * \text{aktuelle Beschleunigung}$$

Um dem System auch noch Zeit für andere Aufgaben zu geben, ist es sinnvoll die minimale Aktualisierungszeit zu begrenzen. So wird in dieser Modellierung ein Fahrzeug

²³ Betriebssysteminstanz (Programm), welches für die Verwaltung der Prozesse verantwortlich ist.

frühestens nach 10 ms aktualisiert, was eine Aktualisierungsrate von 100-mal pro Sekunde entspricht.

5.2 Speicherung der Daten und Parameter

Zur Modellierung des Verkehrssystems Kreisel werden eine Vielzahl an Parametern benötigt. So müssen Grössen zur Definition der Geometrieobjekte, Fahrzeuge, Fussgänger, etc. gespeichert werden. Dabei fallen verschiedenste Typen von Daten an.

Wesentlich grössere Datenmengen müssen allerdings zur Speicherung der Ergebnisse verarbeitet werden. Vor allem bei langen Simulationen können hier schnell mehrere zehntausend Datensätze entstehen.

Um allen diesen Anforderungen zu entsprechen, werden die Daten in einem relationalen Datenbanksystem²⁴ gespeichert. Borland²⁵ stellt dafür die Datenbankumgebung Paradox zur Verfügung, in welcher sämtliche Tabellen und Beziehungen abgebildet wurden.

Dabei handelt es sich um ein "voll relationales" Datenbanksystem. Es stellt nebst den drei Kernkonzepten auch Klassen von Integritätsbedingungen und zusätzliche Operatoren zur Verfügung.

Zu den Kernkonzepten eines relationalen Datenbanksystems gehören laut Lockemann und Schmidt die folgenden Eigenschaften:

- Die gesamte Information in einer relationalen Datenbank wird einheitlich durch Werte repräsentiert, die in Form von Tabellen dargestellt werden können.
- Der Benutzer sieht keine Verweisstrukturen zwischen diesen Tupeln.
- Es sind zumindest die Operationen zur Selektion und Projektion sowie zur Verbindung von Tabelleneinträgen definiert - in beliebiger, dem Verwendungszweck entsprechender Syntax. Keiner der Operatoren ist jedoch auf Kontrollstrukturen wie Iteration und Rekursion angewiesen oder ist durch vordefinierte Zugriffstrukturen beschränkt.

Alle gespeicherten Informationen sind entsprechend in Tabellen abgelegt. Beziehungen zwischen Sätzen (Tupeln) werden nicht explizit gespeichert, sondern mittels eines Fremdschlüssels abgebildet. Dieser wird durch eine Kopie des Schlüsselwertes des referenzierten Datensatzes im referenzierenden Satz abgebildet.

Dank der identischen Hersteller stehen in Delphi bereits viele Komponenten und Klassenbibliotheken zur Datendefinition und -manipulation zur Verfügung. Zusätzlich wird die Möglichkeit benutzt mittels statischer Einbettung SQL-Anfragen an die Datenbank zu definieren.

Im nachfolgenden Entity Relationship Modell (ERM) werden die verwendeten Tabellen und deren impliziten Beziehungen dargestellt.

²⁴ Vgl. [LOCKEMA87] S. 30ff

²⁵ Herausgeber der Entwicklungsumgebung für die Programmiersprache Delphi.

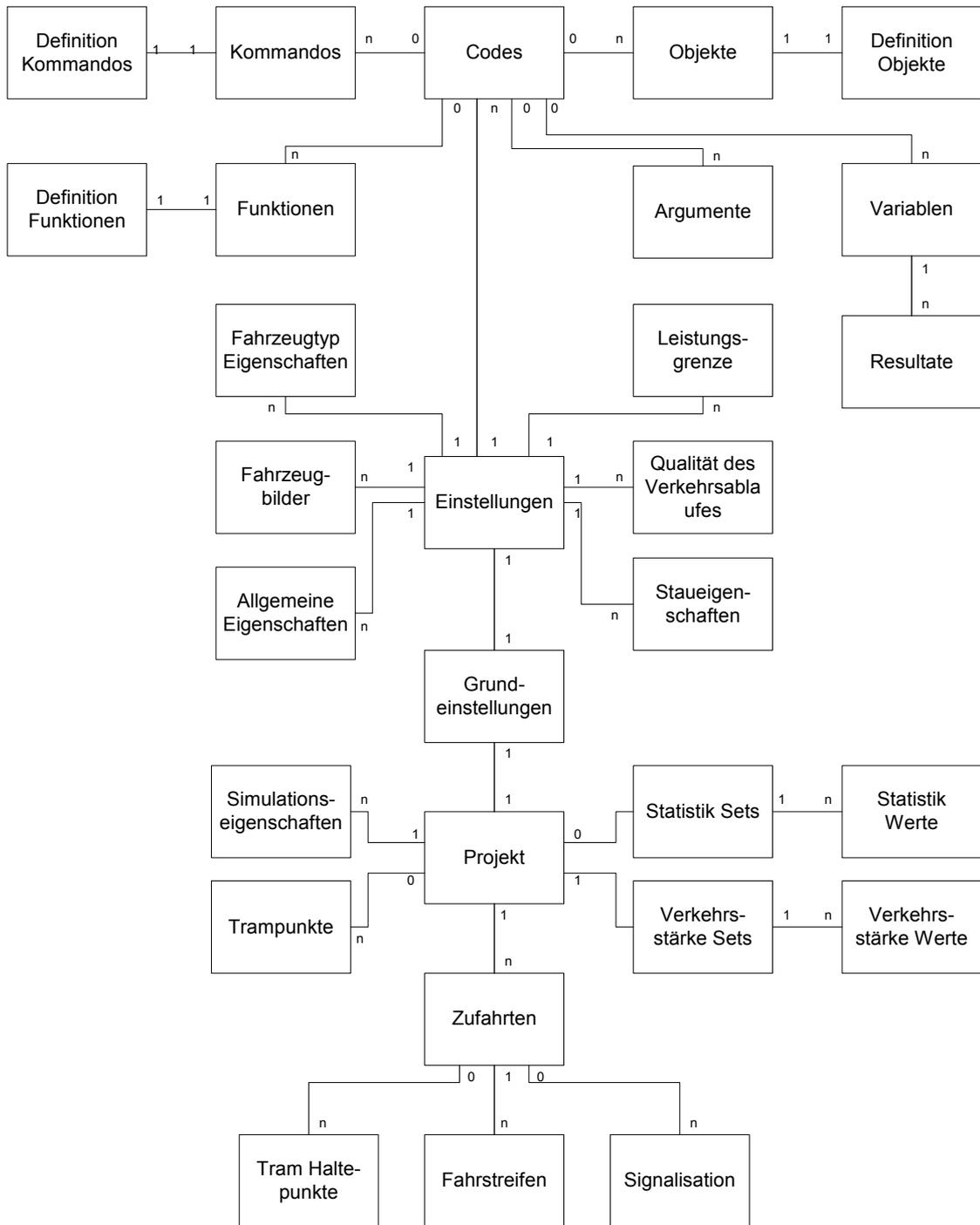


Abbildung 11: ERM der Datenbank

5.3 Geometrieobjekte

Als Geometrieobjekte werden jene Objekte bezeichnet, welche stationär und dauernd während der Simulation instanziiert sind. Es werden darunter die strassenbaulichen Einrichtungen wie Fahrbahnen, Fußgängerstreifen, Tramgeleise, etc. verstanden.

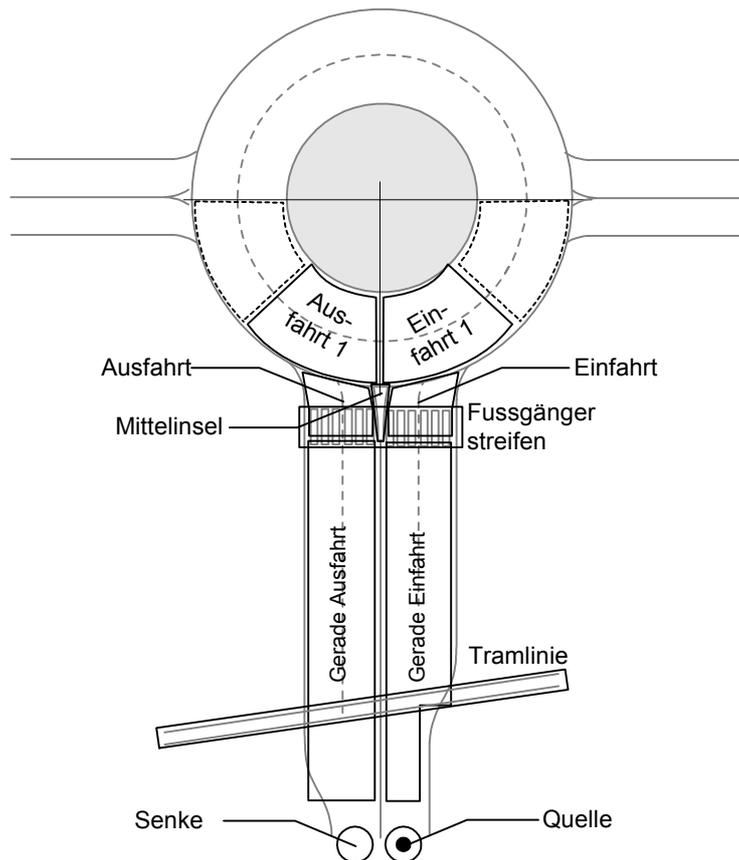


Abbildung 12: Geometrieobjekte im Kreisel

Ein Kreisel kann aus folgenden Geometrieobjekten bestehen:

Kreisel:

- Einfahrt 1 bis n (TEinfahrt): Kreisfahrbahn im Bereich der Einfahrt, wobei n = Anzahl Zubringer
- Ausfahrt 1 bis n (TAusfahrt): Kreisfahrbahn im Bereich der Einfahrt, wobei n = Anzahl Zubringer

Zubringer 1 bis n:

- Quelle (TQuelle): Erzeugungsort der Fahrzeuge
- Senke (TSenke): Austrittsort der Fahrzeuge aus der Simulation
- Gerade Einfahrt (TGerade): Verbindung zwischen Quelle und Einfahrt
- Gerade Ausfahrt (TGerade): Verbindung zwischen Ausfahrt und Senke
- Einfahrt (TZEinfahrt): Verbindung zwischen Gerade Einfahrt und Kreisel
- Ausfahrt (TZEinfahrt): Verbindung zwischen Kreisel und Gerade Ausfahrt
- Fussgängerstreifen (TFGS)
- Tramlinie (TTramLinie)
- Insel (TInsel)

Geometrieobjekte dienen den Fahrzeugen als Kommunikationspartner. Die Schnittstelle wird von einer gemeinsamen Oberklasse vererbt, damit alle Objekte von den Fahrzeugen gleich angesprochen werden können.

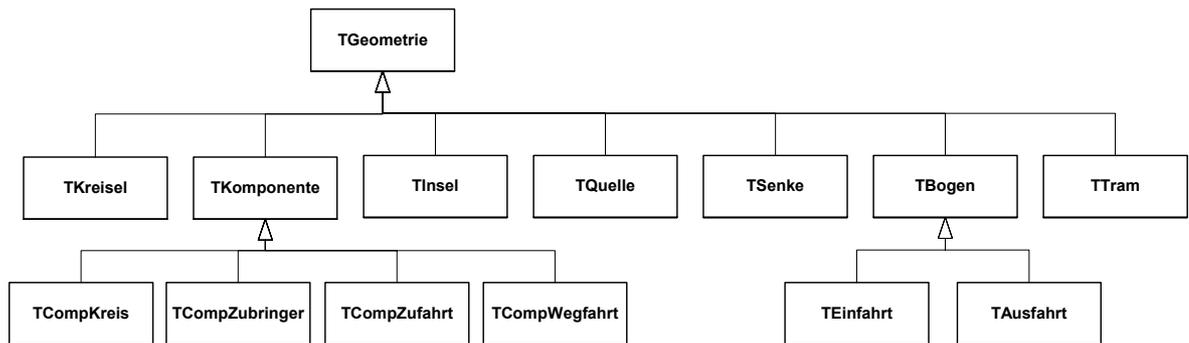


Abbildung 13: Klassendiagramm der Geometrieobjekte

5.3.1 Oberklasse TGeometrie

Die Superklasse wird niemals instanziiert, so dass es in der Simulation keine Objekte der Klasse TGeometrie gibt. Weil aber Attribute dieser Klasse an die Unterklassen vererbt werden, sind diese hier zentral angelegt.

Folgende Attribute stehen zur Verfügung:

- Startpunkt der Fahrlinie
- Endpunkt der Fahrlinie
- Vorgänger Objekte
- Nachfolgende Objekte
- Sperrhandles
- Zubringerindex

Attribute werden in dieser Klasse nicht berechnet. Sie dienen lediglich als Platzhalter, damit sie von aussen über das Interface sichtbar sind.

Die Schnittstellenmethode wird von jeder Unterklasse geerbt und neu ausgeprägt. Dadurch kann das Fahrzeug bei der Simulation mit den benötigten Informationen über Fahrriichtung und Hindernisse versorgt werden.

Neben dieser werden folgende wichtige Methoden zur Verfügung gestellt:

- Geometriefunktionen wie Winkelberechnungen, Schnittpunkte, Punktlagen, etc.
- Fahrzeugsteuerung wie Prüfung, ob bestimmter Punkt erreicht ist, ob Fahrstreifenwechsel beendet ist, etc.

5.3.2 Klasse TQuelle

Die Klasse TQuelle ist kein eigentlicher Strassenabschnitt, deshalb werden hier nur der Startpunkt der Fahrlinie, sowie das nachfolgende Objekt gespeichert.

5.3.3 Klasse TSenke

Die Klasse TSenke ist wie TQuelle ebenfalls kein eigentlicher Strassenabschnitt, deshalb wird hier nur der Endpunkt der Fahrlinie gespeichert.

5.3.4 Klasse TGerade

Die Objekte der Klasse TGerade verbinden die Quelle mit der Einfahrt, bzw. die Ausfahrt mit der Senke. Falls mehrere Fahrstreifen vorkommen, werden diese innerhalb dieser Klasse abgebildet.

5.3.5 Klasse TZEinfahrt

Die Objekte der Klasse TZEinfahrt verbinden die Gerade mit der Kreisfahrbahn und umgekehrt. Falls mehrere Fahrstreifen vorkommen, werden diese innerhalb dieser Klasse abgebildet.

5.3.6 Klasse TBogen, TEinfahrt und TAusfahrt

Die Objekte der Klassen TEinfahrt und TAusfahrt bilden zusammen die Kreisfahrbahn. Dabei sind alle gemeinsamen Attribute und Methoden in der Superklasse TBogen abgebildet. Falls mehrere Fahrstreifen vorkommen, werden diese innerhalb dieser Klassen verwaltet.

5.3.7 Klasse TKomponente

Um einen grösseren Teil des Kreisels als eine Einheit betrachten zu können, werden spezielle Klassen für Gruppen von Geometrieobjekten angelegt. Dafür bildet die Klasse TKomponente die Superklasse. Fahrzeuge haben auch zu dieser Klasse und deren Nachkommen eine Schnittstelle. Dadurch müssen alle Attribute, welche für Fahrzeuge sichtbar sein sollen, hier angelegt sein. Die Werte werden allerdings erst in den verschiedenen Ausprägungen bzw. Unterklassen gefüllt.

Folgende Attribute stehen zur Verfügung:

- Fahrzeuglisten: Listen damit Fahrzeuge gegenseitig sichtbar sind.
- Nachfolger: Nachfolgende Komponente
- Kreisel: Referenz auf das Gesamtobjekt

Folgende Schnittstellenmethoden werden zur Verfügung gestellt:

- Listenoperationen wie einfügen, löschen, etc.
- Fahrzeugsteuerung wie Ermittlung der nächsten Ausfahrt, Prüfung, ob Ausfahrtpunkt erreicht ist, etc.

5.3.8 Subklassen von TKomponente

Die Subklassen wie TCompKreis, TCompZubringer, TCompZufahrt und TCompWegfahrt stellen die oben erwähnten Methoden zur Verfügung und füllen die entsprechenden Attribute. Zusätzlich sind sie für die Darstellung der Fahrbahnelemente zuständig und berechnen alle zugehörigen Attribute.

5.3.9 Weitere Subklassen von TGeometrie

Wie im Klassendiagramm vermerkt, existieren noch weitere Subklassen von TGeometrie. Diese werden analog den oben beschriebenen Klassen verwendet und sollen hier nicht explizit erklärt werden.

5.4 Fussgängerstreifen

Der Fussgängerstreifen besteht einerseits aus dem Geometrieobjekt, das für die Kommunikation mit den Fahrzeugen dient, aus einem Quellenobjekt für die Erzeugung der Fussgänger und aus den Fussgängerobjekten selber.

Das Geometrieobjekt kennt sämtliche Fussgänger, die im Moment warten oder die Fahrbahn queren. Dafür besitzt es eine Liste sämtlicher aktiver Fussgängerprozesse. Dadurch kann es bei einer Anfrage eines Fahrzeuges über den Zustand Auskunft geben.

Das Quellenobjekt berechnet die Zeitlücken und erzeugt die Fussgängerobjekte in der Ein- und Ausfahrt.

Ein erzeugtes Fussgängerobjekt wartet, bis die Fahrbahn frei ist und bewegt sich anschliessend über den Fussgängerstreifen. Dabei wird über eine speziell definierte Schnittstelle zwischen den Fussgängerobjekten und dem Zubringer, die Zeitlücke bis zum nächsten Fahrzeug abgefragt. Falls diese genügend gross ist ($ZL_{Fz} > GZL_{Fg}$) beginnt das Objekt mit der Überquerung der Fahrbahn.

Bei jeder Instanzierung eines Fussgängerobjektes wird eine individuelle, normalverteilte Zeitlücke aus den Parametern MZLFG und MZLFGA ermittelt.

Fussgängerobjekte stellen sich an ihrer aktuellen Position in der Simulationsumgebung grafisch dar.

5.5 Visuelle Manipulationen an der Kreiselgeometrie

Die Skizze der Kreiselgeometrie kann mittels der Maus angepasst werden, um zum Beispiel eine Übereinstimmung der Geometrie mit dem Hintergrundbild zu erreichen.

Alle Manipulationen an den Objekten werden durch eine Methode implementiert, welche zum Ereignis der Mausbewegung über dem Kalibrierungsbildschirm aufgerufen wird. Dabei stehen die aktuelle Mausposition und der Status der Tasten Shift, Ctrl und Alt zur Verfügung.

Somit kann ermittelt werden, welches Objekt gerade im Fokus ist und wie es sich verändern soll. Dabei wird immer mit relativen Mausbewegungen zum Anfangspunkt und in Bezug auf die Kreiselmitte gerechnet.

Beispiel:

Veränderung des Aussendurchmessers des Kreisels.

Der linke Mausbutton wird am Punkt (400/300) gedrückt und die Maus zum Punkt (450/300) bewegt. Wenn man davon ausgeht, dass der erste Punkt innerhalb des Kreisels liegt und somit der Kreiseldurchmesser als veränderbares Objekt im Fokus ist, wird nun die relative Mausbewegung zum Kreiselmittelpunkt berechnet:

$$d = d + M.\text{Abstand}(\text{CurrentMousPos}) - M.\text{Abstand}(\text{FirstMousePos})$$

Dadurch wird erreicht, dass bei einer Mausbewegung zum Kreiselmittelpunkt hin der Durchmesser kleiner und in der Gegenrichtung grösser wird.

5.6 Struktur und Persistenz von Parametern

Parameter, Einstellungen und Regeln werden grundsätzlich in der Datenbank gespeichert. Dabei sind die Daten auf verschiedenen Ebenen zusammen gefasst.

Die unterste Ebene bildet die Grundeinstellungen, welche beim Start des Programms automatisch geladen werden.

Darüber hinaus können einerseits verschiedene Einstellungen und andererseits verschiedene Projekte geladen werden.

Statistiken sind wiederum einem Projekt zugeordnet, so dass bei verschiedenen Simulationen zu einem Projekt verschiedene Statistiken erzeugt werden können.

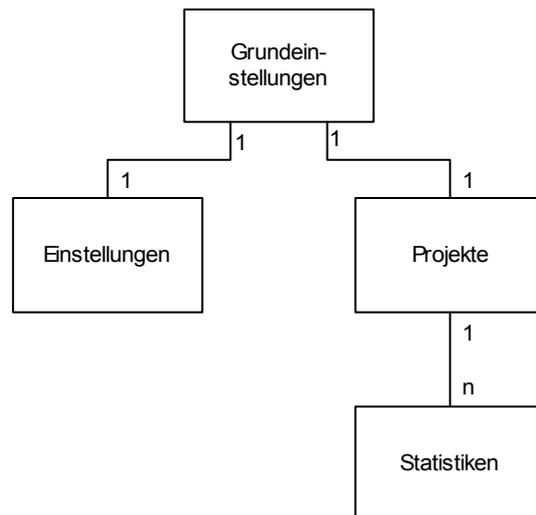


Abbildung 14: Grobes ERM der Daten

5.7 Veränderbarkeit der Eigenschaften und Regeln der Modellierung

Um die Modellierung an ändernde Bedürfnisse und weitere Erkenntnisse der Verkehrstechnik anpassen zu können, werden die meisten Regeln und Parameter nicht fest im Programm umgesetzt, sondern als frei änderbare Einstellungen definiert.

Grundsätzlich werden folgende Arten von Einstellungen unterschieden:

Parameter:

Einem Parameter wird in den Einstellungen ein bestimmter Wert zugewiesen. Für jeden Parameter ist nur genau ein Wert zulässig. Als Beispiel wird dem Parameter 'fzl' (Fahrzeuglänge) der Wert 4.5 m zugewiesen.

Tabelle:

Menge von Parametern

Regel:

Einer Regel wird eine Entscheidungstabelle oder ein Regelwerk hinterlegt. Es ist vordefiniert, welche Ausgänge (Ergebnisse) durch Regeln ermittelt werden. Für die Definition der Regeln wird eine einfache Regelsprache verwendet. Es stehen sämtliche Parameter und die im Kontext sinnvollen Objektattribute zur Verfügung (vgl. Kap. 5.7).

Sämtliche in der Modellierung verwendete Grössen und Einstellungen wurden anhand verschiedener Praxisbeispiele getestet (vgl. Kap. 10).

5.7.1 Einstellungsumgebung

Einstellungen werden in einem Baum dargestellt. Dabei sind diese zu logischen Gruppen zusammengefasst und Knoten²⁶ zugeordnet. Dadurch ist es möglich, trotz der grossen Menge an Einstellungen, den Überblick zu bewahren.

²⁶ Im Sinne einer Gruppierung in der Baumstruktur

Folgende Einstellungen sind möglich:

Allgemeine Eigenschaften (Tabelle)

Fahrzeuge

- └─ Fahrzeugtypen (Tabelle)
- └─ Eigenschaften pro Fahrzeugtyp (Tabelle)
- └─ Bilder pro Fahrzeugtyp (Parameter)
- └─ Verhalten
 - └─ Freie und abhängige Fahrzeuge (Regel)
 - └─ Fahrstreifenwechsel
 - └─ Bestimmung des Fahrstreifens (Regel)
 - └─ Zeitlückensuche (Regel)
 - └─ Überbreite Fahrbahnen (Regel)
 - └─ Einfahren in den Kreisel
 - └─ Entscheidung (Regel)
 - └─ Ausfahren
 - └─ Zielfahrstreifen (Regel)
 - └─ Verlassen des Kreisels (Regel)
 - └─ Hindernisse
 - └─ Fussgängerstreifen (Regel)

Auswertungen

- └─ Definition von Stau (Parameter)
- └─ Definition der Leistungsgrenze (Parameter)
- └─ Qualität des Verkehrsablaufes (Parameter)

5.7.2 Definition von Regeln

Für die Definition von Regeln stehen Texteingabemasken zur Verfügung, worin die Anweisungen frei editierbar sind. Wenn die Eingabe abgeschlossen ist, wird der Text syntaktisch geprüft und in eine vom Programm lesbare Form umgewandelt.

Die Syntaxprüfung²⁷ wird mittels einer Syntaxbeschreibung in einer Grammatik gemacht.

Als sinnvoll zur Beschreibung der Syntax vieler Programmiersprachen haben sich kontextfreie Grammatiken erwiesen²⁸. Aus diesem Grund wird diese als Grundlage für die syntaktische Sprachbeschreibung der Regeln verwendet.

Eine bekannte und bewährte Notation für kontextfreie Grammatiken ist die Backus-Naur-Form (BNF) und deren Erweiterung (EBNF).

²⁷ Vgl. [SCHIEDERM87] S. 24ff

²⁸ Vgl. [MAYER82].

5.7.3 Regeln

Regeln werden in einer einfachen Regelsprache in folgender Form erfasst:

Element	Beschreibung
Bedingung:	
if <Prüfung> then <Anweisung-wahr> [else <Anweisung-falsch>]	Gibt eine Wahrheitsprüfung an, die durchgeführt werden soll. <Prüfung> ist ein beliebiger Wert oder Ausdruck, der WAHR oder FALSCH sein kann. <Anweisung-wahr> ist der Wert, der zurückgegeben wird, oder die Anweisung die durchlaufen wird, wenn <Prüfung> WAHR ist. <Anweisung-falsch> ist der Wert, der zurückgegeben wird, oder die Anweisung die durchlaufen wird, wenn <Prüfung> FALSCH ist. Dieser ganze else - Teil ist optional, d.h. er muss nicht angegeben werden.
Prüfung: <Variable> <Vergl_Opp> <Variable>	Gibt eine Vergleichsoperation (Prüfung) an. <Variable> ist ein beliebiger Wert oder eine Formel des Formeleditors. <Vergl_Opp> ist die Vergleichsoperation (=, <, >, ≤, ≥, ≠).
Wiederholung:	
for <Variable>:= <Limit unten> to <Limit oben> do <Anweisung>	Schleife mit Zähler. Bei jedem Durchlauf wird der Zähler <Variable> beginnend bei <Limit unten> um den Wert 1 erhöht bis der Wert <Limit oben> erreicht ist.
Abbruch:	
exit	Beendet eine Regel sofort ohne die restlichen Anweisungen zu durchlaufen.
Anweisungen:	
log(<Typ>,<Klasse>,<Meldung>)	Schreibt eine Meldung in das Fahrzeugprotokoll. Dabei kann der Typ die Ausprägungen 'E' für Fehler und 'I' für Information haben. Der Wert <Klasse> wird zur Klassierung der Wichtigkeit der Meldung herangezogen. Wobei 1 die grösste Wichtigkeit ist. Im Bereich <Meldung> kann ein beliebiger Text eingegeben werden.
<Variable>:=<Variable> oder <Variable>:=<Operation> <Variable>:=<Funktion>	Zuweisung der rechten Seite an die linke. Der zugewiesene Teil kann dabei eine <Variable>, eine <Operation> oder das Ergebnis einer <Funktion> sein.
<Ergebnis> = <Variable>	Gibt den Rückgabewert der Regel an. <Ergebnis> ist der Rückgabewert der definierten Regel. Eine Regel ohne diese Anweisung kann nicht ausgeführt werden.

Element	Beschreibung
Operation: <operator>(<Variable>) oder <Variable> <operator> <Variable>	Operationen enthalten entweder eine oder zwei Variablen. <Operator> mit einer Variablen sind sin, cos, tan, arcsin, arccos oder arctan. <Operator> mit zwei Variablen sind +, -, *, /, exp
Funktion: <Funktion>[(<Variable>, [<Variable>])]	Funktionen dienen dazu Ergebnisse aus bestimmten <Variablen> zu berechnen.
Variablen:	
var <Variable> : <Typ>	Jede Variable wird am Anfang der Regel definiert und einem <Typ> zugewiesen. Mögliche Typen sind dabei Integer, String, Boolean, Pointer und Double.
<Variable>:=<Variable> oder <Variable>:=<Wert>	Einer <Variablen> kann entweder eine andere <Variable> zugewiesen werden oder ein fester <Wert>.
Objekte:	
<Objekt>[.<Objekt>].<Attribut>	Mit <Attribut> kann auf Attribute von bestehenden <Objekten> der Simulation zugegriffen werden. Dabei können <Attribute> wieder <Objekte> sein, so dass eine beliebige Schachtelung möglich ist.
<Objekt>[.<Objekt>].<Methode> [(<Variable>)]	Mit <Methode> kann auf Methoden der <Objekte> zugegriffen werden. Ausserdem können den Methoden <Variablen> übergeben werden.

Tabelle 17: Beschreibung der Regeldefinitionen

Jede Regel wird unter einem Namen abgelegt, welcher den Einstellungen zugeordnet wird.

5.8 Entwicklung einer interpretierbaren Sprache zur Beschreibung des Fahrzeugverhaltens

Die Möglichkeit der Definition von Regeln für das Verhalten der Fahrzeuglenker, erfordert ein effizientes Werkzeug, bzw. eine Sprache. Dazu wurde eine neue Regelsprache entwickelt, welche spezifisch auf die Bedürfnisse der Modellierung des Fahrverhaltens der Lenker zugeschnitten ist.

Die Sprache bietet einerseits einfache Struktur- und Steuerungsbefehle und andererseits eine Vielzahl von simulationsspezifischen Funktionen und Objekten.

Die an der Oberfläche erfasste Regel wird nach einer Syntaxprüfung in einen lesbaren Code umgewandelt, welcher so in der Datenbank gespeichert wird. Zum Zeitpunkt der Ausführung wird dieser Code in eine Liste in den Arbeitsspeicher geladen und abgearbeitet.

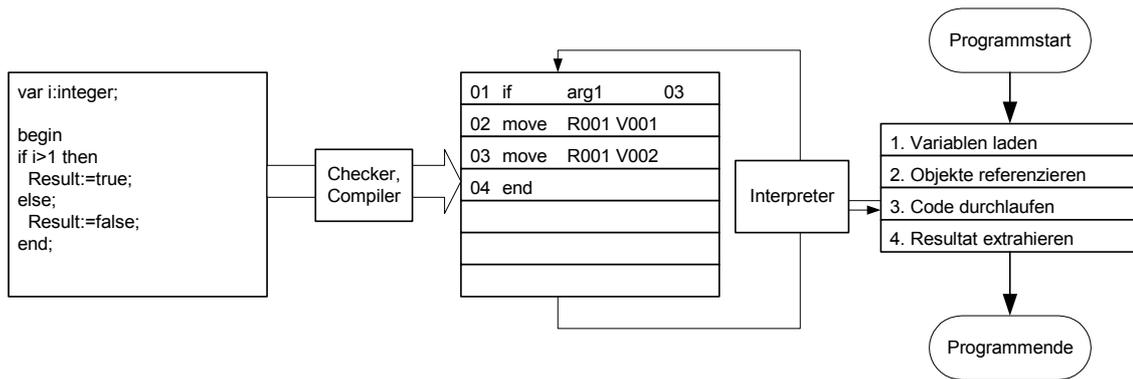


Abbildung 15: Schematische Übersicht über die Einbettung der Regelsprache

5.8.1 Definition der Sprache

Als sinnvoll zur Beschreibung der Syntax einer Sprache haben sich kontextfreie Grammatiken erwiesen (Schiedermeier 1987²⁹). Deshalb wird auch hier eine Kontextfreie Grammatik als Grundlage gewählt.

Bekannte und bewährte Formen sind die Backus-Naur-Form (BNF) und deren Erweiterung (EBNF).

Aus dem oben erwähnten Buch von Schiedermeier³⁰ wurde folgende Beschreibung der EBNF übernommen:

"Eine Grammatik wird in EBNF als Menge von Produktionen notiert. Eine Produktion besteht aus einer linken und einer rechten Seite. Jede Produktion legt die korrekten Ableitungen des Nichtterminals, das auf der linken Seite steht, fest. Die rechte Seite einer Produktion beschreibt durch Einzelsymbole, die mit bestimmten Operatoren verknüpft sind, eine Menge von Symbolfolgen. Eine Symbolfolge aus dieser Menge kann das Nichtterminal der linken Seite ersetzen. Einzelsymbole auf der rechten Seite können Terminale und Nichtterminale sein. Ein Terminal wird nicht abgeleitet. Die Ableitung eines Nichtterminals, wird von weiteren Produktionen festgelegt."

Folgende syntaktische Definitionen bestehen:

<>	Nichtterminale
""	Terminale
[]	Optionale Symbolfolge
{ }	Iteration, 0-, 1- oder mehrfach
()	Trennstrich zwischen alternativen Symbolen

Klammern haben Vorrang vor Trennstrichen

Beispiel: EBNF in EBNF beschrieben

<EBNFGrammar>	= <rule> {<rule>}
<rule>	= <ident> "=" <expr> "."
<expr>	= <term> {" " <term>}
<term>	= <factor> {<factor>}
<factor>	= <ident> <string> "(" <expr> ")" "[" <expr> "]" "{" <expr> "}"

Die Symbole <ident> und <string> werden in Zeichenketten abgeleitet, die der Einfachheit halber weggelassen worden sind.

²⁹ Vgl. [SCHIEDERM87] S. 24ff

³⁰ Vgl. [SCHIEDERM87] S. 25f

5.8.2 Beschreibung der Regelsprache

Die Beschreibung der in der Modellierung verwendeten Sprache kann wie folgt in EBNF definiert werden:

<Program>	= [<var>] <main>.
<var>	= "var" <variables> ":" <typs> {"," <variables> ":" <typs>} ";".
<variables>	= <string>.
<typs>	= "integer" "string" "boolean" "double" "Pointer".
<main>	= "begin" <line> {<line>} "end;".
<line>	= <if> <loop> <move> <exit> <log> ";".
<if>	= "if" <argum> "then" <block> ["else;" <block>].
<argum>	= <var> <cond> <var>.
<var>	= <variables> <value> <function> <objattr> <operation>.
<value>	= <digit> <string>.
<function>	= <funcname> ["("<var> {"," <var>} ")"] .
<objattr>	= <object>{"." <object>} "." <Attribute>.
<object>	= <objectname>.
<operation>	= ["(" [<var>] {<ops> ["(" <var> ["")"]}] .
<ops>	= "+" "-" "*" "/" "sin" "cos" "tan" "arcsin" "arcsin" "arctan" "exp".
<cond>	= "=" "<" ">" "<>" "<=" ">=".
<block>	= ["begin"] <line> {<line>} ["end;"].
<loop>	= "for" <variables> ":@" <var> "to" <var> "do" <block>.
<move>	= (<variables> "Result") ":@" <var>.
<exit>	= "exit".
<log>	= "log(" <etyp> "," <eclass> "," <message> ")".
<etyp>	= "E" "I".
<eclass>	= "1" "2" "3" "4".
<message>	= <string>.

5.8.3 Syntaxprüfung und Compiler

Die Syntaxprüfung und die Kompilierung des eingegebenen Codes werden in einem Schritt gemacht.

Als erstes werden die Programmzeilen intern durchnummeriert. Dies ist notwendig da der verwendete Editor keinerlei Bedingungen für die Anordnung der Programmzeilen stellt. Um bei einem Fehler allerdings auf die entsprechende Stelle springen zu können, wird für jeden Befehl die Zeilennummer mitgeführt.

Falls ein Variablen-Definitionsblock vorhanden ist, wird dieser zuerst durchlaufen und entsprechende Speicher für die Werte bereitgestellt.

Anschliessend wird der Code baumartig durchlaufen. Dazu werden nachfolgende Regeln von Schiedermeier³¹ übernommen:

"Zur Verarbeitung des Programms wird ein geordneter Baum als innere Datenstruktur gewählt. Dieser Baum wird als Programmbaum bezeichnet. Die Wahl der EBNF als Grundlage für die syntaktische Sprachbeschreibung legt diese Entscheidung nahe.

Der Programmbaum setzt sich aus Knoten zusammen. Ein Knoten kann beliebig viele Kinder haben, die wiederum Knoten sind. Ein Knoten hat genau einen Elter³². Als ein-

³¹ Vgl. [SCHIEDERM87] S. 41f

³² Elter wird in dieser Arbeit als Einzahl von Eltern verwendet.

ziger Knoten verstösst der Knoten an der Spitze des Baumes gegen diese Festlegung. Er heisst Programmwurzel und hat keinen Elter. Die unmittelbaren Kinder eines Knotens sind untereinander Geschwister. Die Geschwister sind geordnet: Es gibt also z.B. ein erstes Geschwister. Ein Knoten ist über eine eindeutige Folge von Knoten mit der Programmwurzel verbunden. Diese Knoten bilden den Wurzelfpfad des gegebenen Knotens. Knoten ohne Kinder sind Blätter des Programmbaums."

Die daraus abgeleiteten Regeln für den Syntaxcheck und Compiler sollen an folgendem Beispiel erklärt werden:

Programmcode:

```
var                i:integer,
                  br:double;

begin
  br:=0;
  for i:=1 to Zufahrt.AnzFahrstreifen do
    if i > Self.aktFahrstreifen then
      br:=br+Zufahrt.Fahrstreifen(i).Breite;
  if br > Self.breite then
    begin
      Result:=true;
      log('I',2,'Durchfahrtsbreite ist gross genug');
    end;
  else
    Result:=false;
  end;
```

Der obige Beispielcode wird in folgender Reihenfolge baumartig abgearbeitet:

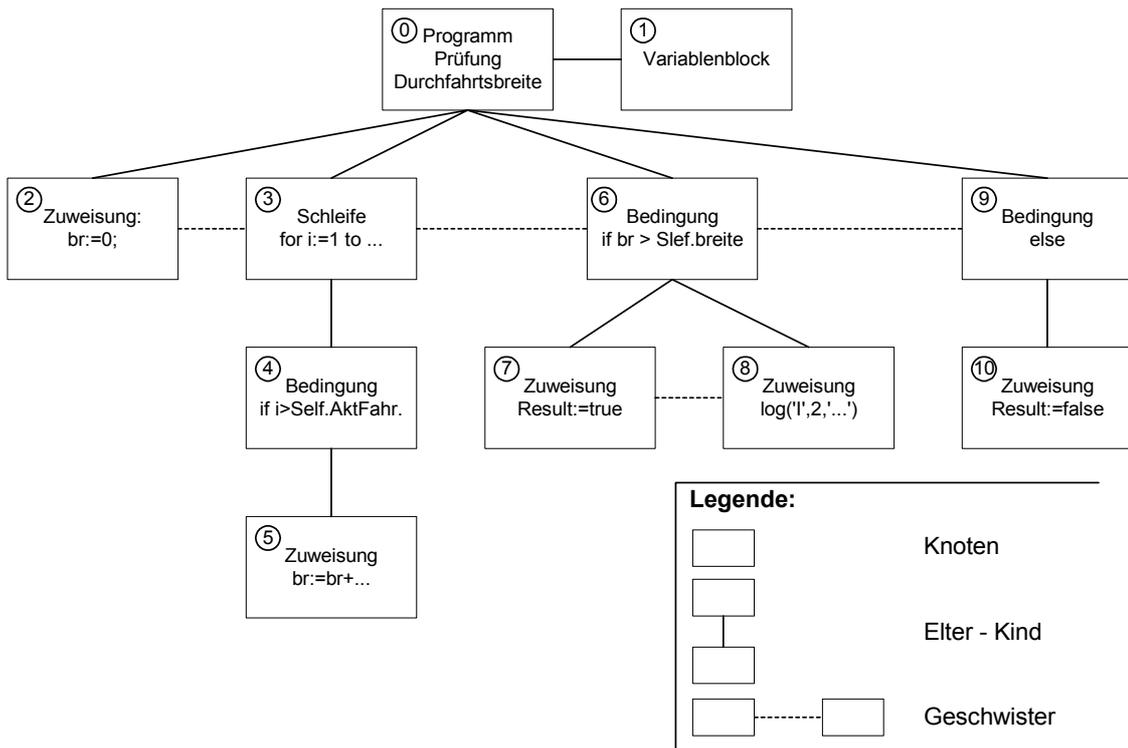


Abbildung 16: Baum von Beispielprogramm

Der Compiler besitzt deshalb eine Methode (Name: CompileBlock), welche einen logischen Block von Coding (Geschwister) verarbeiten kann. Wird bei einem Geschwister (Knoten) eine Vertiefung zu einem Kind festgestellt, wird dieselbe Methode rekursiv aufgerufen.

Somit ergibt sich die oben markierte Reihenfolge der Abarbeitung.

Mit dieser Kapselung auf Geschwisterebene ergibt sich auch automatisch ein Kontext auf dieser Ebene. Das heisst syntaktische Prüfungen können nur innerhalb dieses Kontexts durchgeführt werden.

5.8.4 Interpretierbarer Code

Der Compiler übersetzt den vom Benutzer eingegeben Code in eine Form, wie sie durch den Interpreter zur Laufzeit gelesen werden kann. Dazu sind folgende Konversionen notwendig:

- Konversion von Variablennamen in interne Variablen
- Auflösen von Objekthierarchien und Übersetzung in interne Referenzen
- Verknüpfung von Funktionen mit internen Referenzen
- Auflösung von Argumenten von Bedingungen
- Konversion Auflösung der Befehle in interne Kommandos

Alle Ergebnisse sind während dem Kompilervorgang in internen Listen zwischengespeichert, um bei erfolgreichem Abschluss gemeinsam in die Datenbank geschrieben zu werden.

Alle Listklassen stellen dabei die notwendigen Kompiliermethoden zur Verfügung. Folgende Klassen für die Speicherung des kompilierten Codes werden unterschieden:

- TMainList: Liste der internen Kommandos
- TVarList: Liste der verwendeten Variablen
- TObjektList: Liste der verwendeten Objekte
- TFunktionList: Liste der verwendeten Funktionen
- TArgList: Liste der verwendeten Argumente in Bedingungen

Zusätzlich stehen folgende Hilfsklassen zur Verfügung, um auf in der Datenbank gespeicherte Definitionen schneller zugreifen zu können:

- TCommandList: Liste der definierten Kommandos und deren Metainformation
- TDefObjectList: Liste der definierten Objekte und deren Verknüpfung
- TDefFunktionList: Liste der definierten Funktionen und deren Metainformation

Als letztes existiert eine Listklasse (TResultList), welche sämtliche Ergebnisse prüft und speichert.

Im Folgenden wird anhand eines Beispiels das Zusammenspiel beim Kompilieren erläutert:

Als Beispiel wird der Code im Kapitel 5.8.3 verwendet und zu mehreren Zeitpunkten der Zustand der Listen beschrieben.

Ende Schritt 1: Nachdem die Variablen verarbeitet wurden, sind sie in deren Liste gespeichert. Alle anderen Listen sind noch leer.

Variable	Name	Wert	Type
V0001	i		integer
V0002	br		double

Tabelle 18: TVarList, Liste mit den verwendeten Variablen

Ende Schritt 5: Nachdem die Schleife komplett verarbeitet wurde, sind folgende Listen gefüllt:

Nr.	Command	Arg1	Arg2	Arg3	Goto	Line
1	move	V0002	V0003			5
2	move	V0001	V0004			6
3	if	A0001			9	6
4	if	A0002			7	7
5	add	V0005	V0002	O0006		8
6	move	V0002	V0005			8
7	add	V0001	V0001	V0004		6
8	goto				3	6

Tabelle 19: TMainList, Liste mit den internen Kommandozeilen

Dabei wurde die Schleife vollständig mit anderen Elementen (move, if, add und goto) modelliert (Zeilen 2, 3, 7 und 8).

Konstanten werden ebenfalls in der Variablenliste aufgenommen:

Variable	Name	Wert	Type
V0001	i		integer
V0002	br		double
V0003	0	0	integer
V0004	1	1	integer

Tabelle 20: TVarList, Liste mit den verwendeten Variablen nach Schritt 5

Um auch komplexe Rechenoperationen über mehrere Stufen abbilden zu können, reduziert der Compiler Operationen durch Ersetzen mit Variablen unter Berücksichtigung der Prioritäten der Rechenoperationen.

Beispiel:

$$r := a + b * c + d$$

1. Durchlauf: $h1 := b * c \rightarrow r := a + h1 + d$

2. Durchlauf: $h2 := a + h1 \rightarrow r := h2 + d$

Die verwendeten Objekte werden dabei dereferenziert, so dass sie in der Liste gespeichert werden können:

Objekt	DefObj	SubObj	Name	Arg1	Arg2	Arg3	Arg4	Typ
O0001	251		Self					Pointer
O0002	3	O0001	AktZufahrt					Pointer
O0003	52	O0002	AnzFS					Integer
O0004	251		Self					Pointer
O0005	2	O0004	aktFS					Integer
O0006	251		Self					Pointer
O0007	3	O0006	AktZufahrt					Pointer
O0008	53	O0007	Fahrstreifen	V0001				Pointer
O0009	10	O0008	Breite					Double

Tabelle 21: TObjektList, Liste mit den verwendeten Objekten nach Schritt 5

Durch die Referenz auf die Objektdefinition können bei Bedarf jederzeit die Metadaten hinzu geladen werden.

Ebenfalls gespeichert werden die Bedingungen:

Bedingung	Vergleich	Variable 1	Variable 2
A0001	<=	V0001	O0001
A0002	>	V0001	O0004

Tabelle 22: TArgList, Liste mit den verwendeten Bedingungen nach Schritt 5

Der restliche Programmcode wird analog verarbeitet und soll hier nicht mehr explizit erläutert werden.

Der erzeugte Code kann zur Laufzeit vom Interpreter schnell und einfach abgearbeitet werden.

5.8.5 Interpretation zur Laufzeit

Zur Laufzeit wird der generierte Code an bestimmten Stellen des Programms aufgerufen und abgearbeitet. Dabei muss zuerst der Kontext dafür geladen werden. Das bedeutet, dass die verwendeten Objekte mit den Instanzen der Simulation verlinkt werden. Somit können verwendete Attribute und Methoden direkt auf entsprechende Werte und Funktionen durchgreifen.

Auch wird vom Code ein Abbild im aktuellen Speicher erzeugt, um eine Speicherung von Zwischenergebnissen zu ermöglichen. Somit ist sichergestellt, dass es keine Konflikte gibt, wenn mehrere Fahrzeuge gleichzeitig denselben Code abarbeiten.

Methoden zur Interpretation sind ebenfalls direkt an den Listklassen angehängt.

5.8.6 Objekte und Funktionen

Mit Hilfe von Objekten kann wie bereits oben erwähnt, auf Instanzen der Simulation bzw. dessen Attribute und Methoden zugegriffen werden.

Folgende Objekte stehen zur Verfügung:

- Fahrzeug (Self): Aktuelles Fahrzeug (Wurzelobjekt)
- Zufahrt: Aktuelle Zufahrt des Fahrzeuges (Wurzelobjekt)
- Kiesel (Wurzelobjekt)
- Globale Eigenschaften (Wurzelobjekt)
- Fussgängerstreifen
- Koordinate
- Zustand: Zustandskonstanten für Fussgängerstreifen (Wurzelobjekt)

Verwendete Objekte werden dabei vom Fahrzeug oder von anderen Wurzelobjekten aus referenziert. Objekte können so meistens auf zwei Arten angesprochen werden, einerseits relativ zum aktuellen Fahrzeug (Self.AktZufahrt) oder direkt (Zufahrt).

Nicht Wurzelobjekte sind im Gegensatz dazu nur über ein Wurzelobjekt zu erreichen.

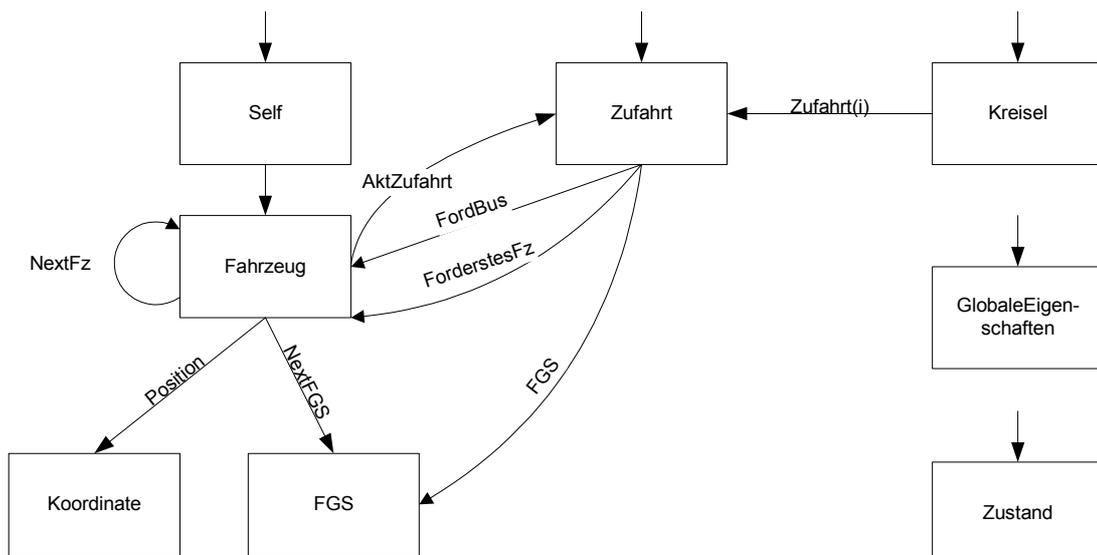


Abbildung 17: Objekte des Programmcodes

Zusätzlich zu den Objektreferenzen stehen folgende Attribute und Methoden zur Verfügung:

Nr.	Attribut	Typ	Argument 1	Argument 2
2	aktFS	Integer		
3	aktZufahrt	Zufahrt		
4	Zustand	String		
5	Start	Integer		
6	Ziel	Integer		
7	Fahrzeugtyp	String		
8	Abhängig	Boolean		
9	Länge	Double		
10	Breite	Double		
11	Fahrwinkel	Double		
12	Geschwindigkeit	Double		
13	Beschleunigung	Double		
14	Position	Koordinate		
16	GZL	Double		
17	FZL	Double		
18	GZL_STW	Double		
19	FZL_STW	Double		
20	Abhaengigabstand	Double		
21	AbstandVoFz	Double		
22	FIDVoFz	Integer		
23	AbstEinfahrt	Double		
24	WiVo	Double		
25	ZielFS	Integer		
26	NextFz	Fahrzeug		
27	FzID	Integer		
28	Blinken	Boolean		
29	AbstLiFsRand	Double		
30	MinAbstSe	Double		
31	MinAbst	Double		
32	NextFGS	FGS		
33	Wkeit_FGS_anh	Double		
34	NextFGS_exist	Boolean		
35	HaltFGS	Boolean		
36	Einfahrt	Boolean		
37	ZielFSKreis	Integer		
38	Wegzeit	Double	integer	

Tabelle 23: Attribute und Methoden der Objekte vom Typ Fahrzeug

Nr.	Attribut	Typ	Argument 1	Argument 2
52	AnzFS	Integer		
53	ForderstesFz	Fahrzeug	Integer	
54	Signalisation	Boolean		
55	ZielSign	Double	Integer	Integer
56	WkeitFS	Double	Integer	
57	WkeitSig	Double		
58	AnzFSAusf	Integer		
59	FGS	Pointer		
61	EinfBeginnWi	Double		
62	EinfEndeWi	Double		
63	Busspur	Boolean		
64	FordBus	Fahrzeug		

Tabelle 24: Attribute und Methoden der Objekte vom Typ Zufahrt

Nr.	Attribut	Typ	Argument 1	Argument 2
102	AnzFS	Integer		
103	Zufahrt	Zufahrt	Integer	
104	AnzZuf	Integer		
105	BreiteFS	Double	Integer	
106	RadiusFS	Double	Integer	
107	GetFahrzeug	Fahrzeug	Integer	

Tabelle 25: Attribute und Methoden der Objekte vom Typ Kreisell

Nr.	Attribut	Typ	Argument 1	Argument 2
152	Warten	String		
153	Zufahrt	String		
154	Eingefahren	String		
155	Kreisfahrbahn	String		
156	FSWechsel	String		
157	Ausfahren	String		
158	Ausfahrt	String		

Tabelle 26: Attribute und Methoden der Objekte vom Typ Zustand

Nr.	Attribut	Typ	Argument 1	Argument 2
302	X	Double		
303	Y	Double		

Tabelle 27: Attribute und Methoden der Objekte vom Typ Koordinate

Nr.	Attribut	Typ	Argument 1	Argument 2
352	MinAbst	Double		
353	MittSichtweite	Double		
354	StaMittSichtw	Double		
355	KollAufzeichnen	Boolean		
356	WahrBlinker	Double		
357	WahrHaltFGS	Double		
358	MittGeschFG	Double		
359	StaMittGeschFG	Double		
360	MittGZLFG	Double		
361	StaMittGZLFG	Double		
362	AntAbhFz	Double		
363	MinZLfreiFz	Double		
364	MinZLabhFz	Double		

Tabelle 28: Attribute und Methoden der Objekte vom Typ Globale Eigenschaften

Nr.	Attribut	Typ	Argument 1	Argument 2
402	Zustand	String		
403	Laenge	double		
404	BreiteZ	double		
405	BreiteW	double		
406	BreiteMI	double		
407	AbstEinfahrt	double		
408	HaltepunktZF	Koordinate	Integer	
409	HaltepunktWF	Koordinate	integer	
410	HaltepunktBus	Koordinate		

Tabelle 29: Attribute und Methoden der Objekte vom Typ Fussgängerstreifen

Zusätzlich zu den Objekten existieren auch Funktionen, die für die Berechnungen und Regeln der Modellierung benötigt werden.

Eine Funktion ist ein kleines Programm, das in der Simulationsumgebung Prüfungen durchführt oder Werte ermittelt.

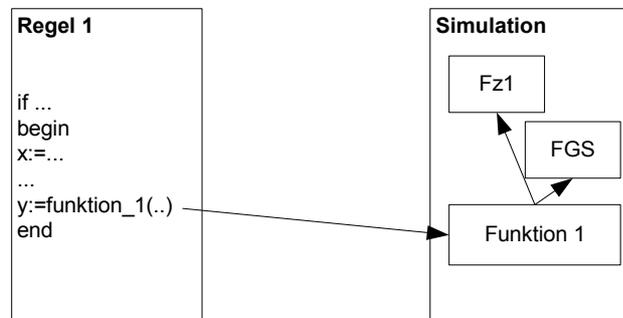


Abbildung 18: Aufruf einer Funktion

Funktionen haben eine vorgegebene Anzahl Parameter mit definierten Typen. Auch der Typ des Rückgabewerts ist definiert. Damit kann der Compiler bereits die Verwendung der Funktion auch in Bezug auf die verwendeten Variablen prüfen.

Folgende Funktionen existieren:

Nr.	Funktion	Anz. Arg.	Arg1	Arg2	Arg3	Arg4	Res.
1	CalcTimeSlot	1	Integer				Double
2	Exists	1	Pointer				Boolean
3	FrontAngle	1	Integer				Double
4	GetNearestVehKr	2	Double	Integer			Integer
5	IsBetween	3	Double	Double	Double		Boolean
6	GetNearestVehLiZuf	0					Integer
7	IsBetweenWink	3	Double	Double	Double		Boolean
8	random	1	Integer				Double
9	text	1	Integer				String
10	vartext	4	Integer	String	String	String	String
11	GetNearestVehFS	3	Double	Integer	Integer		Integer
12	CalcTimeSlotFSW	2	Integer	Integer	Double		Double
13	GetNextID	2	Integer	Integer			Integer
14	FzIsBetweenWink	3	Integer	Double	Double		Boolean
15	CheckFSWBlock	1	Integer				Boolean
16	GetGeschw	1	Integer				Double

Tabelle 30: Definierte Funktionen

Die definierten Funktionen erfüllen folgenden Zweck:

Funktion CalcTimeSlot(FID)

Berechnet die Zeitlücke im Kreisell zu dem angegebenen Fahrzeug mit der Nummer 'FID'.

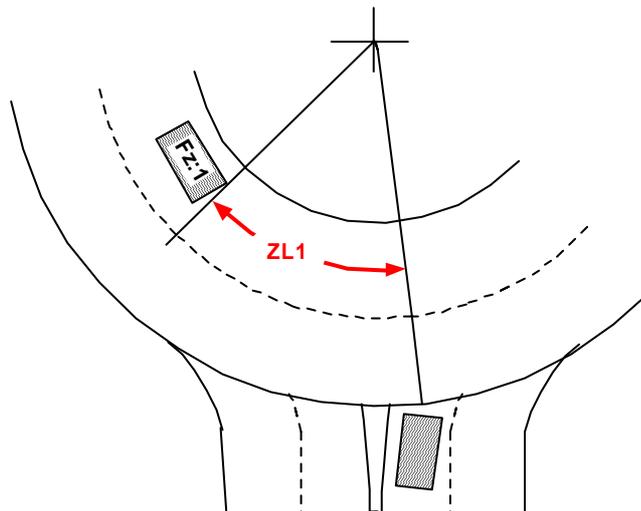


Abbildung 19: Berechnete Zeitlücke der Funktion CalcTimeSlot

Funktion Exists(Ob)

Prüft, ob das Objekt 'Ob' existiert und instanziiert wurde.

Funktion FrontAngle(FID)

Ermittelt den Winkel im Kreisel, bezogen auf die vordere Kante des Fahrzeuges mit der Nummer 'FID' (vgl. auch Funktionsbeschreibung im Kap. A 3.5).

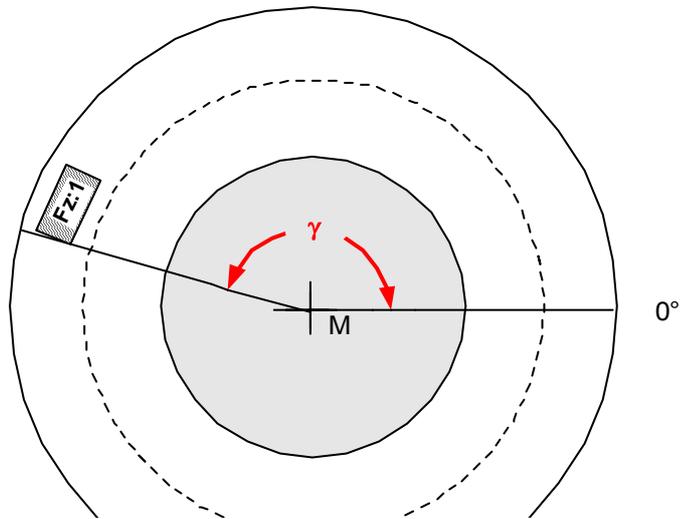


Abbildung 20: Berechneter Winkel der Funktion FrontAngle

Funktion GetNearestVehKr(P, ZID)

Ermittelt das nächste Fahrzeug im Kreisel vor dem Winkel 'P', das nicht in den Zubringer mit der Nummer 'ZID' ausfährt und nicht blinkt.

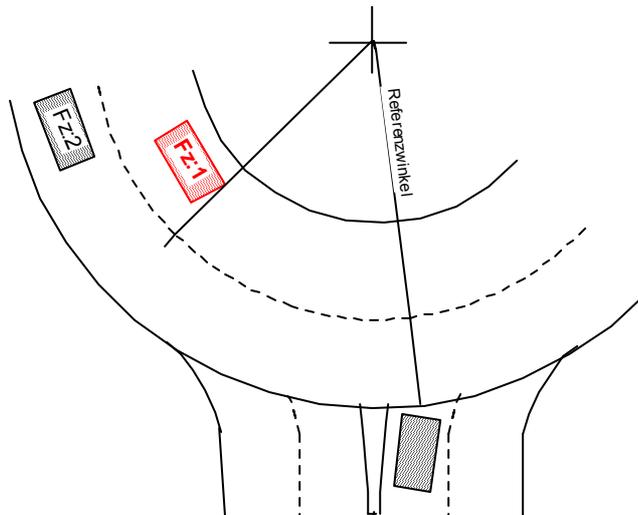


Abbildung 21: Ermitteltes Fahrzeug der Funktion GetNearestVehKr

Funktion IsBetween(W, uL, oL)

Prüft, ob der Wert 'W' zwischen dem unteren Grenze 'uL' und der oberen 'oL' liegt.

Funktion GetNearestVehLiZuf

Ermittelt das nächste Fahrzeug in der linken Einfahrt.

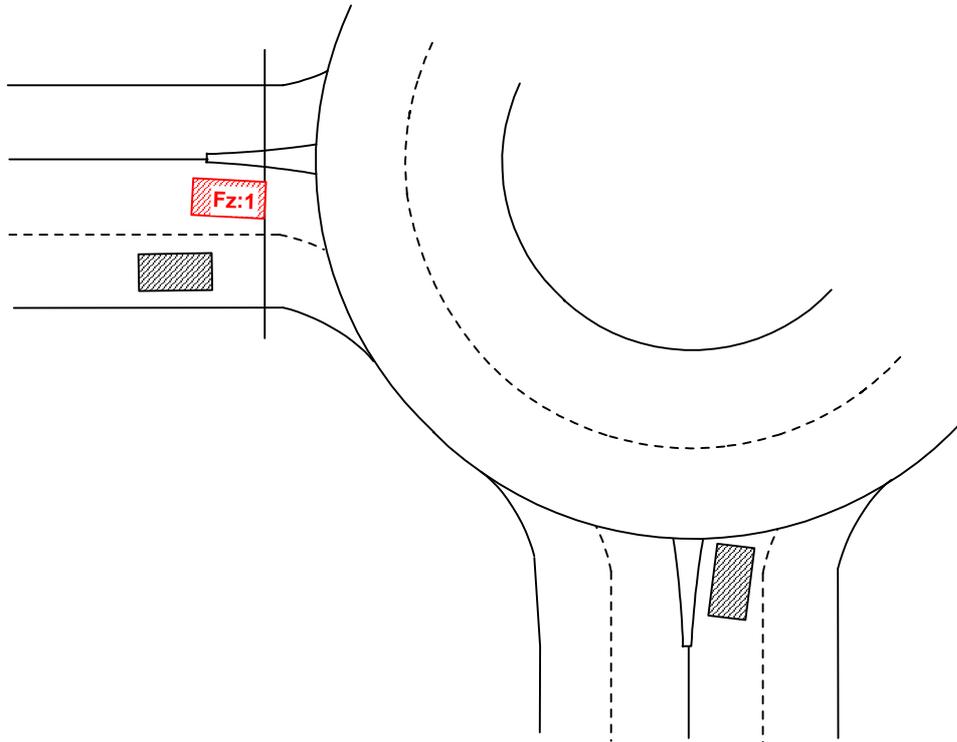


Abbildung 22: Ermitteltes Fahrzeug der Funktion GetNearestVehLiZuf

Funktion IsBetweenWink(Ω , uL, oL)

Prüft, ob der Winkel ' Ω ' zwischen der unteren Grenze 'uL' und der oberen 'oL' liegt.

Funktion Random(M):

Berechnet eine gleichverteilte Zufallszahl zwischen 0 und 'M'.

Funktion Text(Nr)

Ermittelt den Textbaustein aus der Datenbank mit Hilfe der Nummer 'Nr'.

Funktion Vartext(Nr,Arg1,Arg2,Arg3)

Ermittelt den Textbaustein mit Hilfe der Nummer 'Nr' und setzt die Argumente 'Arg1' bis 'Arg3' in die Platzhalter ein.

Funktion GetNearestVehFS(Ω , Z, FS)

Ermittelt das nächste Fahrzeug auf dem Fahrstreifen 'FS' vor dem Winkel ' Ω ' für einen bevorstehenden Fahrstreifenwechsel das nicht in die Ausfahrt 'Z' ausfährt.

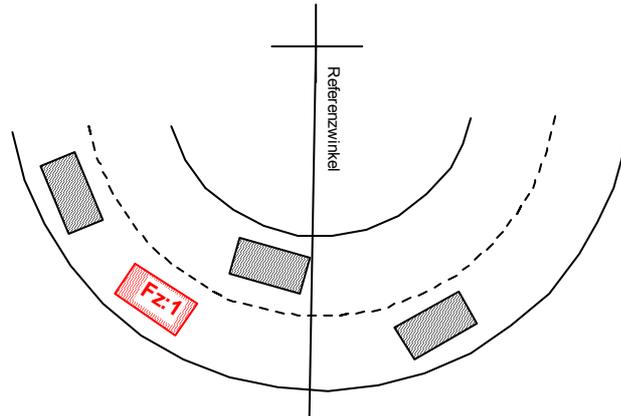


Abbildung 23: Ermitteltes Fahrzeug der Funktion *GetNearestVehFS*

Funktion CalcTimeSlotFSW(FID1, FID2, g)

Berechnet die Zeitlücke zwischen den beiden Fahrzeugen 'FID1' und 'FID2' für den Fahrstreifenwechsel mittels der angegebenen Geschwindigkeit 'g'.

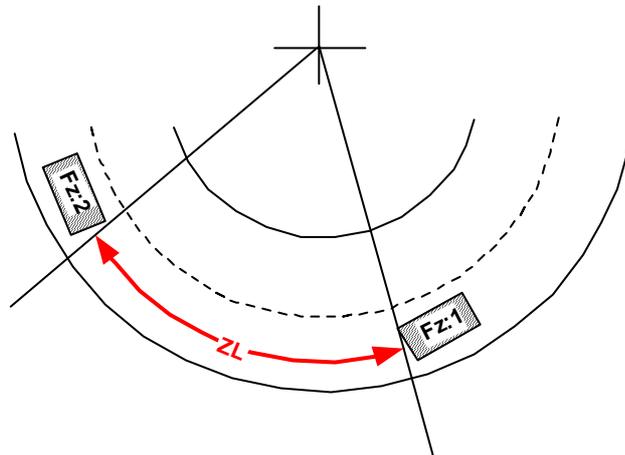


Abbildung 24: Ermittelte Zeitlücke der Funktion *CalcTimeSlotFSW*

Funktion GetNextID(FID,FS)

Ermittelt das nächste Fahrzeug im Fahrstreifen 'FS', ausgehend vom Fahrzeug 'FID'.

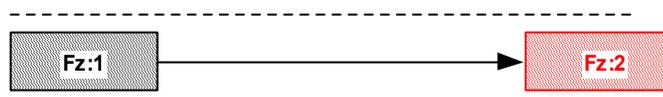


Abbildung 25: Ermitteltes Fahrzeug der Funktion *GetNextID*

Funktion FzIsBetweenWink(FID, Ω_1 , Ω_2)

Prüft, ob sich das Fahrzeug mit der Nummer 'FID' zwischen den beiden Winkeln ' Ω_1 ' und ' Ω_2 ' befindet.

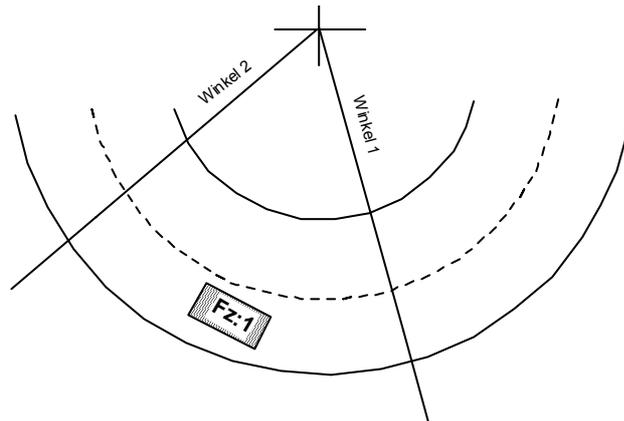


Abbildung 26: Ergebnis der Funktion FzIsBetweenWink

Funktion CheckFSWBlock(FS)

Prüft, ob der Fahrstreifen 'FS' für einen Wechsel blockiert ist.

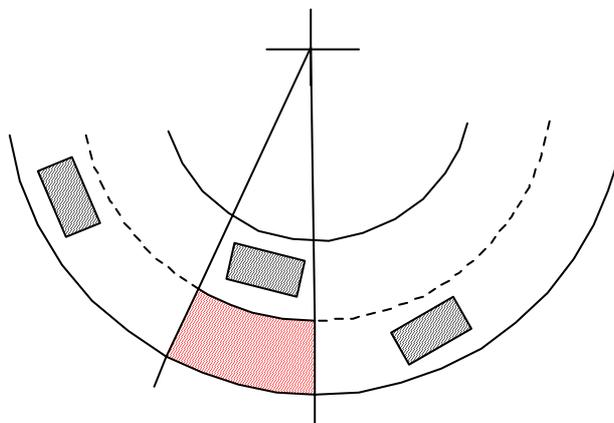


Abbildung 27: Prüfsektor der Funktion CheckFSWBlock

Funktion GetGeschw(FID)

Ermittelt die Geschwindigkeit des angegebenen Fahrzeuges mit der Nummer 'FID'.

5.8.7 Implementierung in der Simulation

Die oben beschriebene Sprache wurde vollumfänglich in der vorliegenden Simulation implementiert. Dabei wurden folgende Programmteile und Werkzeuge erstellt:

- Freitexteditor mit Versionsverwaltung
- Checker und Compiler
- Interpreter
- Testwerkzeug
- Debugger

Nachfolgend sollen kurz sichtbare Komponenten vorgestellt werden.

Freitexteditor

Im Editor lassen sich die Programmelemente als Freitext erfassen und abspeichern. Dabei können zu jeder Regel beliebig viele Versionen als Text gespeichert werden. Allerdings ist immer nur die aktive Version als kompilierter Code gespeichert.

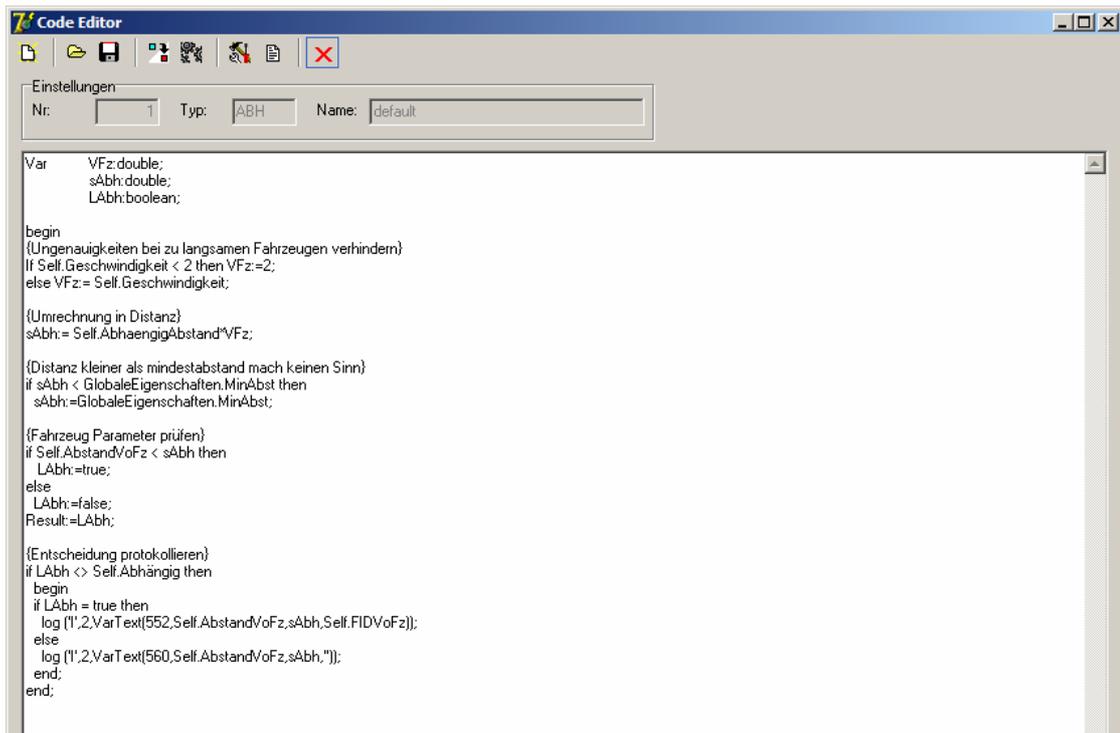


Abbildung 28: Freitexteditor

Im oberen Teil der Maske befinden sich die Informationen zur Version des Codes. Unterhalb kann in einem Texteditor frei der Programmcode mit Kommentaren eingegeben werden.

Checker und Compiler

Der Checker überprüft den Code auf syntaktische und semantische Korrektheit. Dabei werden Fehler mittels Pop up Meldung direkt an den Benutzer gemeldet.

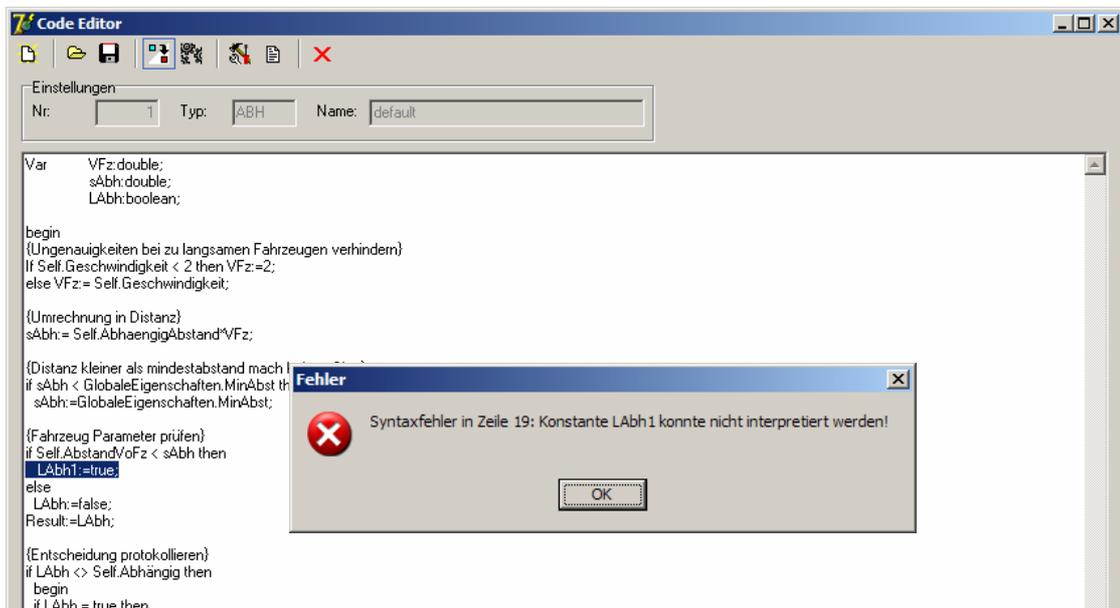


Abbildung 29: Fehlermeldung aus dem Checker.

Eingabefehler oder falsche Kombinationen können somit bereits vor dem Kompilieren erkannt und behoben werden.

Der Compiler selber arbeitet im Hintergrund und ist für den Benutzer nicht sichtbar.

Interpreter

Der Interpreter ermöglicht es zur Laufzeit den kompilierten Code abzuarbeiten und das Ergebnis daraus zu ermitteln. Dabei wird die Liste der Codezeilen Schritt für Schritt durchgegangen, um am Schluss das Resultat an das aufrufende Objekt zurück zu geben.

Im Debugger ist dies ersichtlich:

Nr	Befehl	Argument 1	Argument 2	Argument 3	Goto	Codezeile
1	if	A0001			4	7
2	move	V0001	V0004		0	7
3	goto				5	8
4	move	V0001	O0001		0	8
5	mult	V0005	O0003	V0001	0	11
6	move	V0002	V0005		0	11

Abbildung 30: Interpreter durchläuft den kompilierten Code

Testwerkzeug und Debugger

Zur Unterstützung des Benutzers wurde ein Werkzeug zum Testen erstellt. Dabei können für sämtliche Variablen, Funktionen und Objekte Testwerte hinterlegt werden, welche dann bei der Ausführung hergezogen werden.

Aufgrund des ermittelten Resultates können Fehler im erstellten Programm festgestellt werden.

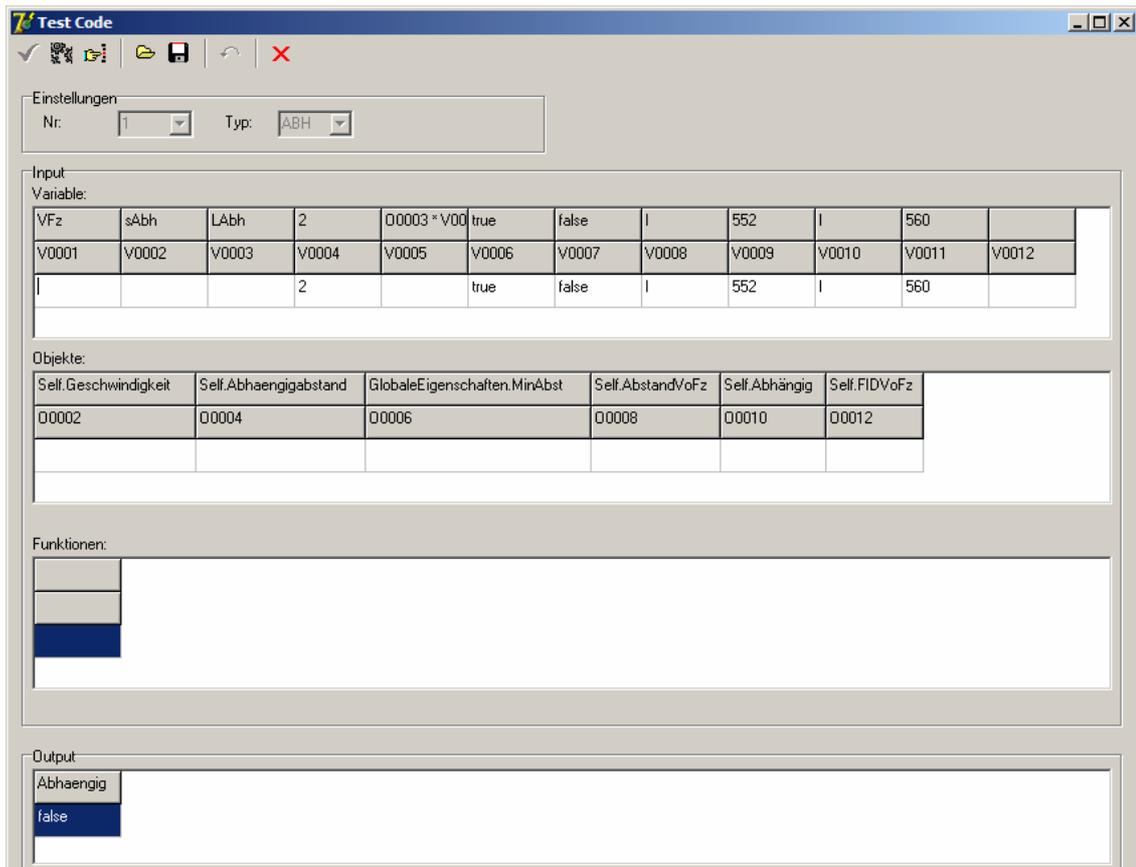


Abbildung 31: Testwerkzeug für den kompilierten Code

Zusätzlich zum oben beschriebenen Blackboxtest, kann auch mittels Debugger der Code sichtbar durchlaufen werden. Dabei können die Werte sämtlicher Variablen abgefragt und angezeigt werden.

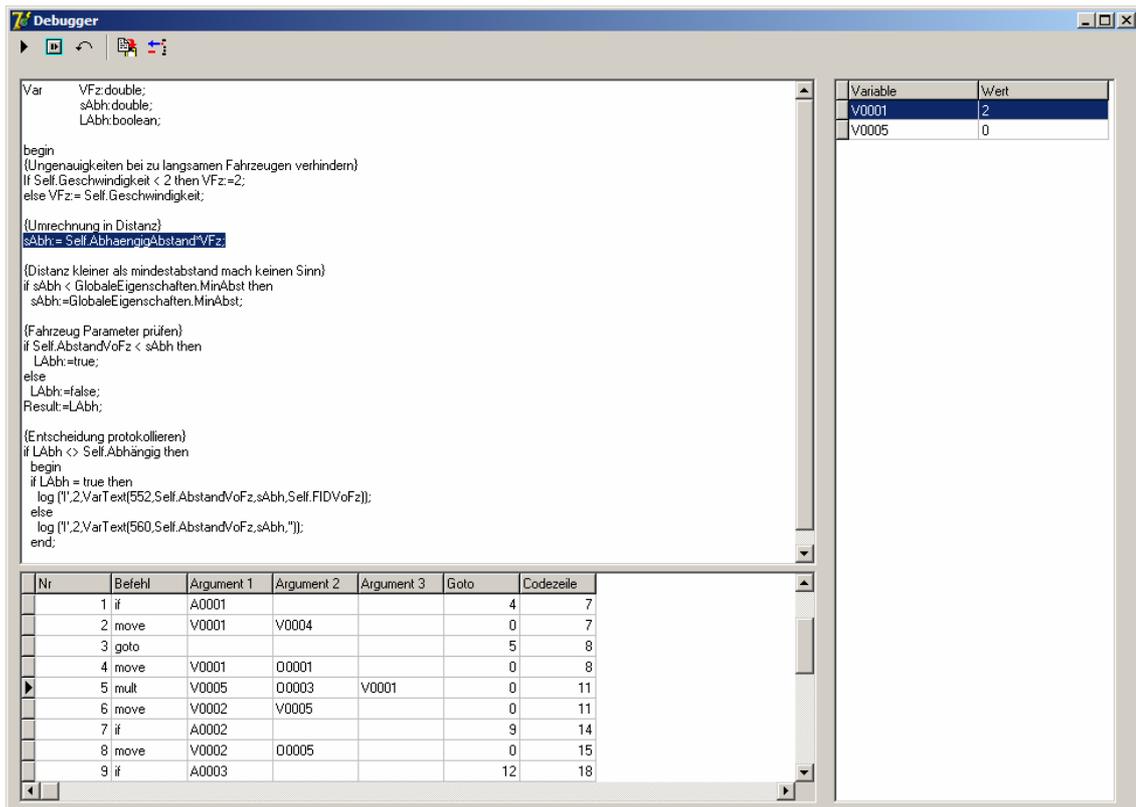


Abbildung 32: Debugger für den kompilierten Code

Mit Hilfe dieser zur Verfügung gestellten Werkzeuge kann der Benutzer einfach und effizient neue Regeln programmieren und testen und somit das Verhalten der Fahrzeuge beeinflussen.

5.9 Auswertungen

Ziel jeder Simulation ist es schlussendlich eine Auswertung über das Verhalten der Fahrzeuge und Fussgänger zu erhalten. Dabei müssen je nach Dauer zum Teil grosse Datenmengen gespeichert und aufbereitet werden.

5.9.1 Auswertungen pro Fahrzeug

Um die Verkehrsqualität zu bestimmen, werden für jedes Fahrzeug folgende Daten aufgezeichnet:

- Simulationszeit
- Wartezeit (Verlustzeit = Haltezeit + Bremsen + Beschleunigen) in der Einfahrt
- Staulänge in der Einfahrt
- Wartezeit (Verlustzeit) vor der Ausfahrt
- Staulänge vor der Ausfahrt
- Geschwindigkeit pro Messpunkt
- Zeitlücke pro Messpunkt

Die Daten werden während der Simulation in einer internen Liste je Fahrzeug gespeichert und anschliessend als Grundlage für die Auswertungen in die Datenbank in folgende Tabelle geschrieben:

Feldname ³³	Bezeichnung	Typ
PROJ	Projektnummer	Integer
SET	Simulationsnummer	Integer
STATSET	Simulationslauf	Integer
TYP	Art der Auswertung	Charakter
ZUFAHRT	Zubringernummer	Integer
FAHRSP	Fahrstreifen	Integer
NUMBR	Interne Nummer	Integer
SIMZEIT	Simulationszeit	Integer
WERT	Statistikwert	Real
WERT2	Zusätzlicher Wert für Messpunkte	Real

Tabelle 31: Aufbau der Datenbanktabelle zur Sicherung der Simulationsergebnisse der Fahrt jedes Fahrzeuges.

Aufgrund der verwendeten relationalen Datenbank zur Speicherung der Ergebnisse muss jeder gespeicherte Datensatz einen eindeutigen Schlüssel³⁴ (Integritätsbedingung) zur Identifizierung besitzen.

Durch die grosse Schlüssellänge können alle Daten in derselben Tabelle gespeichert werden.

Beispiel

Wartezeit von 5 Sekunden eines Fahrzeuges in der Fahrstreifen 1 der Einfahrt 2 in der Simulation 5, Lauf 2 zur Simulationszeit 1256.

PROJ	SET	STATSET	TYP	ZUFAHRT	FAHRSP	NUMBR	SIMZEIT	WERT
0001	5	2	W	2	1	1	1256	5

Tabelle 32: Beispiel Eintrag in der Statistiktabelle.

Wartezeit

Für jedes Fahrzeug wird bei der Einfahrt in den Kreisell die Wartezeit berechnet:

$$(2) \quad Wz = dT - \text{Abst}(\text{Pos}, \text{Start}) / V_{\text{Ziel}}$$

wobei:

Wz:	Wartezeit in Sekunden
dT:	Verstrichene Zeit seit dem Eintritt in die Simulation
Pos	Aktuelle Position des Fahrzeuges
Start	Startpunkt des Fahrzeuges
V_{Ziel}	Zielgeschwindigkeit der Einfahrt

Staulänge in der Einfahrt:

Die Staulänge wird pro Messintervall, Einfahrt und Fahrstreifen gespeichert. Dazu melden alle Fahrzeuge, bei denen die Bedingungen für Stau zutreffen Ihren Abstand zum Einfahrtspunkt an das zentrale Statistikobjekt. Dort wird jeweils pro Intervall, Einfahrt und Fahrstreifen die grösste Staulänge gespeichert.

$$(3) \quad \forall Fz \in Z_n, \\ Sz - LSz_n < In \text{ und } AEP > LSL \\ \rightarrow SL = \text{Abst}(\text{Pos}, EP)$$

³³  = Schlüsselfeld

³⁴ Vgl. [HEUER97] S. 98f

wobei:	SL:	Staulänge
	Fz:	Fahrzeug in der Einfahrt
	Zn	Zubringer n
	Sz	Simulationszeit
	LSz _n	Simulationszeit der letzten Aufzeichnung der Einfahrt
	In	Intervall für Stauaufzeichnung
	AEP	Abstand zum Einfahrtspunkt
	LSL	Letzte aufgezeichnete Staulänge der Einfahrt

Staulänge in der Ausfahrt

Um von Fussgängerstreifen in der Ausfahrt verursachte Rückstau aufzuzeichnen, werden analog der Einfahrt die Rückstaulängen aufgezeichnet. Dabei wird aber der Abstand zum Fussgängerstreifen in der Ausfahrt verwendet.

Frei definierte Messpunkte³⁵

An jedem definierten Messpunkt werden die Geschwindigkeit und die Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug gespeichert. Dadurch können Untersuchungen des Fahrzeugstroms innerhalb der Einfahrt gemacht werden.

5.9.2 Auswertungen pro Fussgänger

Um die Qualität des Fussgängerverkehrs zu bestimmen, werden für jeden Fussgänger folgende Daten aufgezeichnet:

- Simulationszeit
- Wartezeit (Verlustzeit) bei der Querung der Fahrbahn

Die Daten werden während der Simulation in einer internen Liste je Fussgängerstreifen gespeichert und anschliessend als Grundlage für die Auswertungen in die Datenbank geschrieben. Dabei wird dieselbe Tabelle wie für die Fahrzeuge verwendet.

5.9.3 Abbildung und Ermittlung des Fahrzeugzustandes 'Stau'

Um die definierten Kriterien für ein Fahrzeug, das im Stau steht, zu überprüfen, besitzt dieses ein Objekt, welches sämtliche Fahrdaten über ein bestimmtes Intervall aufzeichnet. Dadurch können Vergleiche über ein Intervall durchgeführt werden.

Das Objekt Stauliste speichert pro Messintervall die minimale und maximale Geschwindigkeit in einer Liste. Bei jedem Hinzufügen eines Elements werden zu alte Elemente aus der Liste entfernt, damit nicht unnötig Daten gehalten werden.

Zusätzlich stellt die Liste auch eine Funktion zur Verfügung um die Staukriterien zu prüfen.

Beispiel

Bedingung: mehr als 4 Halte während der letzten 30 Sekunden

$$(4) \quad \forall \text{StM} \in \text{StL}_{\text{Fz}} [S_t - M_t < 30 \text{ Sek.} \implies \text{Anzahl} (V_{\text{min}} = 0) > 4] \rightarrow \text{Stau}$$

wobei:	StM:	Aufgezeichnete Stauinformationen eines Fahrzeuges
	StL _{Fz} :	Liste der Stauinformationen eines Fahrzeuges
	S _t :	Simulationszeit
	M _t :	Zeit der aufgezeichneten Stauinformationen
	V _{min} :	Minimale Geschwindigkeit im Messintervall

³⁵ Im Gegensatz zu den vordefinierten Messpunkten bei der Ein- oder Ausfahrt.

6 Modellierung der Fahrzeuge im Verkehrssystem Kreisell

6.1 Grundlegendes Fahrzeugverhalten

Ein Fahrzeug durchläuft zwischen der Erzeugung und seinem Ende in der Simulation verschiedene Zustände, welche es erlauben, je nach Situation unterschiedlich auf Ereignisse zu reagieren.

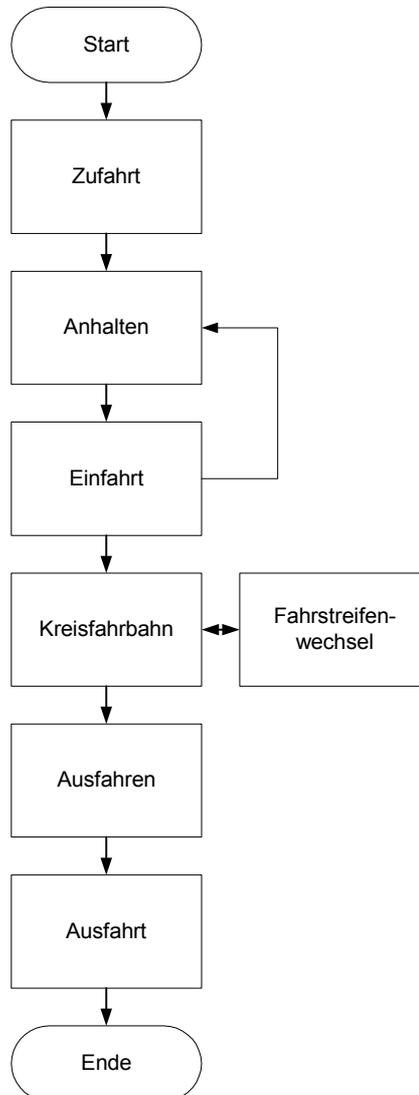


Abbildung 33: Zustandsdiagramm der Fahrzeuge

Zusätzlich wird immer zwischen gebundenem und freiem Verkehrsablauf unterschieden, d.h. jedes Fahrzeug ist entweder frei oder von seinem Vorgänger abhängig.

Im freien Verkehrsablauf wird das Verhalten eines Fahrzeuges von der Beschaffenheit der Kreisellgeometrie bestimmt. Somit sind die eigene Fahrgeschwindigkeit und deren Veränderung (Beschleunigung) davon abhängig wie der Fahrbahnabschnitt beschaffen ist.

Im gebundenen Verkehrsablauf besteht eine signifikante Abhängigkeit des Fahrverhaltens vom vorausfahrenden Fahrzeug. Um dieses Verhalten möglichst realitätsnah zu simulieren, können nur bestimmte Werte vom vorausfahrenden Fahrzeug ermittelt werden, d.h. Werte, welche in der Realität durch Beobachtung des Lenkers ermittelbar sind:

- Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug
- Veränderung des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug
- Abstand zwischen zwei Fahrzeugen in einem anderen Fahrzeugstrom
- Genaue Position des Fahrzeuges (Eckpunkte)

Abstandsangaben werden generell in Sekunden gemessen³⁶, womit für Entscheidungen die aktuelle Geschwindigkeit mit berücksichtigt wird.

Aus der Veränderung des Abstandes wird die Entscheidung zum Bremsen oder zur Beschleunigung abgeleitet. Je grösser die Veränderung ist, desto grösser ist auch das Bremsen oder die Beschleunigung des Fahrzeuges.

6.1.1 Geschwindigkeit der Fahrzeuge bei freiem Verkehrsablauf

Die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges ist von mehreren Grössen abhängig. Grundsätzlich bestimmt immer der kleinste Wert aus folgenden Angaben die momentane Zielgeschwindigkeit:

- Zulässige Höchstgeschwindigkeit des Strassenabschnittes
- Individuelle Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeuges
- Geschwindigkeit des Fahrzeuges in Abhängigkeit
 - vom Kurvenradius
 - von der Durchfahrtsbreite

Dabei werden folgende Regeln angewendet:

Die zulässige Höchstgeschwindigkeit des Strassenabschnittes wird über die Parameter des Kreisells definiert.

Die individuelle Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeuges wird beim Erzeugen als Normalverteilung aus den Fahrzeugparametern ermittelt.

Die Geschwindigkeit des Fahrzeuges verhält sich umgekehrt proportional zum Kurvenradius und zur Durchfahrtsbreite. Wobei beim Kurvenradius vor allem physikalische Grössen (Fliehkraft, Haftung der Reifen) die Geschwindigkeit bestimmen, bei der Durchfahrtsbreite sind es hingegen rein psychologische Faktoren (Angst, Unsicherheit).

Einfluss des Kurvenradius auf die Geschwindigkeit

Beim Einfluss des Kurvenradius auf die Geschwindigkeit spielen vier Grössen die Hauptrolle:

- Fliehkraft, hervorgerufen durch die kreisförmige Bewegung
- Haftung der Reifen, Widerstand der Reifen (Reibung) gegen die Fliehkraft
- Erfahrungsbereich des Fahrers: Aversion gegen die Fliehkraft
- Quergefälle

Untersuchungen von Hackenberg und Heiβing 1982³⁷ zeigen, dass zwischen den Erfahrungsbereichen von Pkw-Fahrern und den Beschleunigungsgrenzwerten von Fahrzeugen erhebliche Unterschiede bestehen. Die technisch möglichen Querbeschleunigungen von Motorrädern und Pkws liegen bei Kurvenfahrt und beim Bremsen deutlich

³⁶ Details zur Umformung zwischen dem zeitlichen und effektiven Abstand sind im Anhang A 2.3.6 beschrieben.

³⁷ Vgl. [HACKENB82] S. 341ff

über der Obergrenze der Erfahrungsbereiche der Fahrer. Dies sind Sicherheitsreserven in kritischen Fahrsituationen. Grenzwerte von Lkws liegen jedoch kaum über den Erfahrungsbereichen von Fahrern und sinken zudem bei Beladung.

		Beschleunigungsgrenzwerte (Vielfaches von g^{38})	
		bei Kurvenfahrt	beim Bremsen
Erfahrungsbereich Fahrer		0.3 – 0.4	0.5 – 0.6
Fahrzeug	Motorrad	0.9 – 1.2	1.0 – 1.7
	Pkw	0.7 – 0.9	0.9 – 1.2
	Lkw	0.3 – 0.5	0.4 – 0.6

Tabelle 33: Leistungsgrenzen von Fahrzeugen und Erfahrungsbereiche von Fahrern (nach Hackenberg und Heißenberg)

Somit spielt die effektive Fahrzeugleistung für die Kurvengeschwindigkeit eine untergeordnete Rolle. Trotzdem werden aufgrund der Fahrzeugparameter für die Fahrzeugleistung und den Erfahrungsbereich des Fahrers Werte ermittelt und in die maximale Kurvengeschwindigkeit umgerechnet.

1985 und 1990 haben Hoffmann u.a.³⁹ ein Simulationsmodell zur Berechnung der Warteschlangen im Strassennetz entwickelt. Zur Modellierung der Fahrgeschwindigkeit bei Abbiegevorgängen haben sie programmiert, dass die Geschwindigkeit im Scheitelpunkt der Kurvenfahrt durch die Seitenbeschleunigung begrenzt wird. Dabei haben sie mit einer fahrzeugbezogenen, normalverteilten Zufallszahl mit den Eigenschaften (4.5, 0.75) m/s^2 gute Resultate erzielt. Durch Umrechnung der in Tabelle 33 aufgeführten Werte mit der Konstanten g ($= 9.81 m/s^2$) erhält man folgenden Bereich:

2.94 – 3.92 m/s^2

Hackenberg geht somit von einem etwas konservativeren Fahrverhalten als Hoffmann aus.

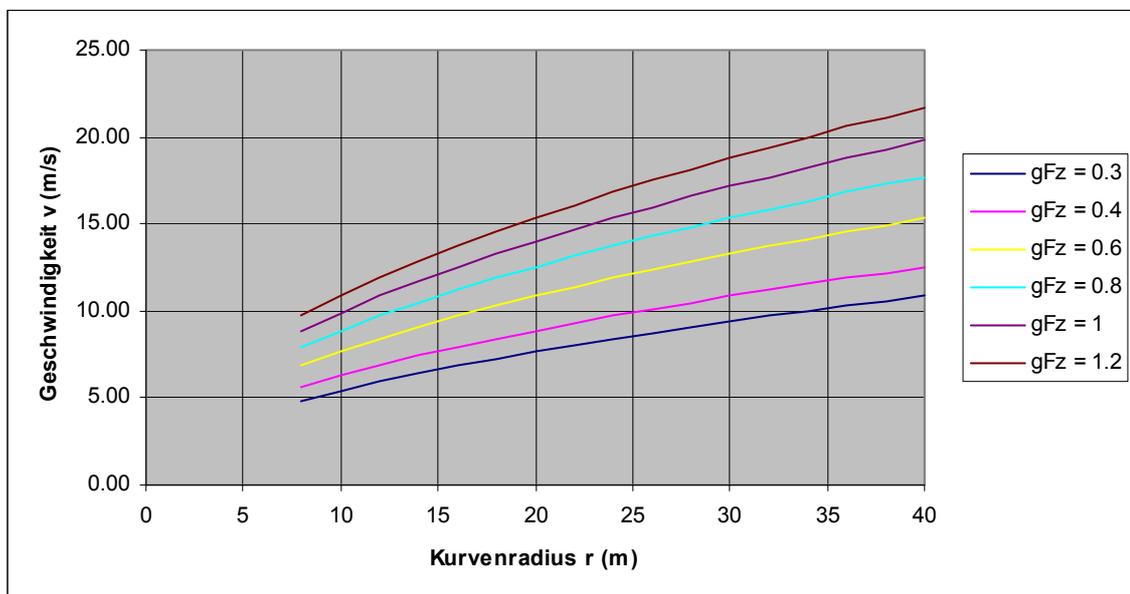


Abbildung 34: Kurvengeschwindigkeit in Abhängigkeit des Parameters gFz bzw. gFa

³⁸ Die Konstante g beschreibt die Erdbeschleunigung. Der Wert von g ist immer $9.81 m/s^2$

³⁹ Vgl. [HOFFMANN90]

Der Erfahrungsbereich des Fahrers wird als Parameter g_{Fa} und der Grenzwert des Fahrzeuges als g_{Fz} eingegeben und beschreibt ein Vielfaches der Erdbeschleunigung g , wobei zur Ermittlung der anzuwendenden maximalen Geschwindigkeit⁴⁰, immer der kleinere der beiden verwendet wird.

Einfluss der Durchfahrtsbreite auf die Geschwindigkeit

Der Einfluss der Durchfahrtsbreite beinhaltet einen psychologischen Hintergrund. Angst und Verunsicherung bewegen den Fahrer dazu die Fahrt zu verlangsamen. Objektiv betrachtet spielt es nämlich keine Rolle wie breit die Durchfahrt ist. Das Fahrzeug kann mit jeder beliebigen Geschwindigkeit fahren. Immer vorausgesetzt, das Fahrzeug ist schmaler als die Durchfahrtsbreite.

Da zu diesem Phänomen im Moment noch keine konkreten praktischen Untersuchungsergebnisse bekannt sind, wird eine Formel angenommen, die folgende Kriterien berücksichtigt:

- Je schmaler die Durchfahrt, desto kleiner die Geschwindigkeit.
- Bei sehr breiten Durchfahrten wird die Geschwindigkeit unterproportional beeinflusst, bei sehr schmalen überproportional.

Bei grosser Geschwindigkeit wirkt die Durchfahrt für den Fahrer schmaler, was zu einer überproportionalen Reduktion⁴¹ der Geschwindigkeit führt.

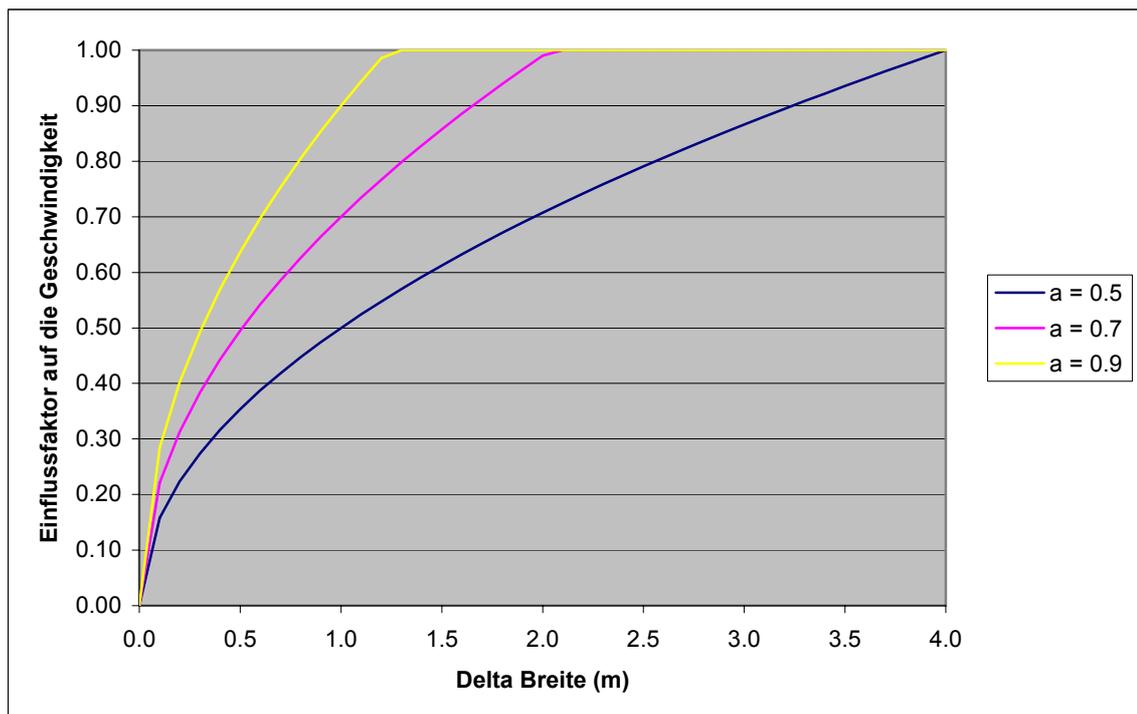


Abbildung 35: Einflussfaktor der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Durchfahrtsbreite

6.1.2 Beschleunigung der Fahrzeuge im freien Verkehrsablauf

Die Beschleunigung und die Verzögerung eines Fahrzeuges werden durch die Parameter a_{max} und b_{max} nach oben begrenzt. Von Branolte und Hotz⁴² wurde 1983 in einer Untersuchung eine Verteilung für die „normale“ Beschleunigung und Verzögerung entwickelt, welche auf der maximalen Beschleunigung, der aktuellen Geschwindigkeit

⁴⁰ Details zur Berechnung der maximalen Geschwindigkeit sind im Anhang A 2.3.8 beschrieben.

⁴¹ Details zum Einfluss der Durchfahrtsbreite sind im Anhang A 2.3.9 beschrieben.

⁴² Vgl. [BRANOLTE83]

wickelt, welche auf der maximalen Beschleunigung, der aktuellen Geschwindigkeit und Zufallszahlen basiert. Sie unterscheiden dabei zwischen Personen- und Lastkraftwagen, bzw. Lastzügen⁴³.

Andreas Rekersbrink verwendet den Ansatz der potentiellen Kollisionszeit⁴⁴. In praktischen Untersuchungen hat er gezeigt, dass bei der Annäherung bis zum Stillstand folgendes Verhalten der Fahrzeuge auftritt:

- 8 bis 5 s vor Stillstand Einschwingphase mit nicht vorhersagbarer Kollisionszeit
- 5 bis 2 s vor Stillstand Korridor mit 2 bis 4 s Kollisionszeit
- 2 s bis Stillstand Entspannungsphase mit ansteigender Kollisionszeit.

Die Einschwingphase kann mit dem Fahrzeugfolgemodell von Wiedemann erklärt werden (vgl. Kap. 6.1.1). Dieses Modell wird somit bei einer Annäherung zum Stillstand ca. 5 Sekunden vor dem Stillstand verlassen. Der Fahrzustand geht in eine kontrollierte Bremsbeschleunigung mit 2 bis 4 s Kollisionszeit über⁴⁵.

Dieses Modell wird in der Modellierung insofern berücksichtigt, dass kurze Zeit vor dem Stillstand oder bei sehr geringem Abstand der Fahrzeuge, die Beschleunigung des auffahrenden Fahrzeuges gemäss diesem Modell berechnet wird.

6.1.3 Interaktionen zwischen Fahrzeugen im gleichen Verkehrsstrom

Um die Kommunikation, bzw. die Sichtbarkeit der Fahrzeuge untereinander sicher zu stellen, befinden sich diese in einer verketteten Liste. Es existiert dabei für jeden Fahrstreifen eine Liste. Dabei werden folgende Informationen abgefragt:

- Abstand in Metern
- Blinker ein/aus

Abstand

Der Abstand wird dabei immer zwischen dem vordersten Punkt des Fahrzeuges und dem hintersten des vorausfahrenden gemessen. Dafür werden sämtliche vier mögliche Distanzen zwischen den zugewandten Eckpunkten der Fahrzeuge errechnet⁴⁶. Die Kürzeste dieser Distanzen ist der Abstand zwischen den Fahrzeugen.

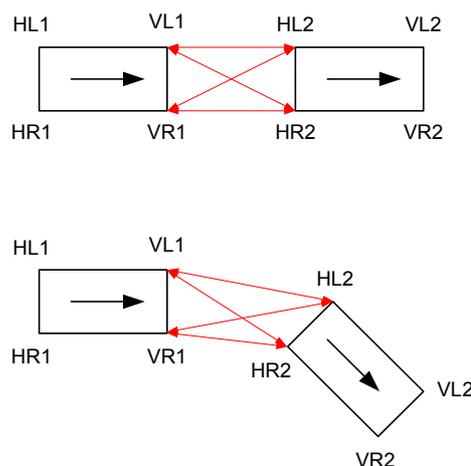


Abbildung 36: Abstandmessung zwischen den Fahrzeugen

⁴³ Vgl. Details Anhang A 2.3.10.

⁴⁴ Vgl. [REKERSBR95] S. 571ff

⁴⁵ Formeln und Details zum Modell von Rekersbrink sind im Anhang A 2.3.10 beschrieben.

⁴⁶ Vgl. Details zur Berechnung im Anhang A 2.3.6.

Freier oder gebundener Verkehrsablauf

Unterschreitet der Abstand zum vorderen Fahrzeug einen bestimmten Grenzwert ändert sich das Verhalten des Fahrzeuges. Es wird nun massgeblich vom vorausfahrenden Fahrzeug beeinflusst. Deshalb spricht man in diesem Fall von einem gebundenen Verkehrsablauf. Alle Fahrzeuge prüfen periodisch den Abstand gegen ihren Grenzwert (vgl. Kap. 4.3) und setzen entsprechend den Fahrzeugstatus 'gebunden' oder 'frei'.

Anpassen der Geschwindigkeit

Eine Anpassung der Geschwindigkeit an das vorausfahrende Fahrzeug erfolgt nur bei gebundenem Verkehrsablauf. Da die Geschwindigkeit des vorderen Fahrzeuges in der Realität nicht bekannt ist, wird sie aus der Veränderung des Abstandes ermittelt. Diese Annahme wird dieser Modellierung zu Grunde gelegt, weil dazu keine Studien bekannt sind, auf die referenziert werden könnte.

Aus der Veränderung des Abstandes wird die Entscheidung zum Bremsen oder zur Beschleunigung abgeleitet (Korrelation $ds \rightarrow a$). Je grösser die Veränderung ist, desto grösser ist auch die Beschleunigung (positiv oder negativ) des Fahrzeuges (positive Korrelation ($ds \uparrow \rightarrow a \uparrow$))⁴⁷.

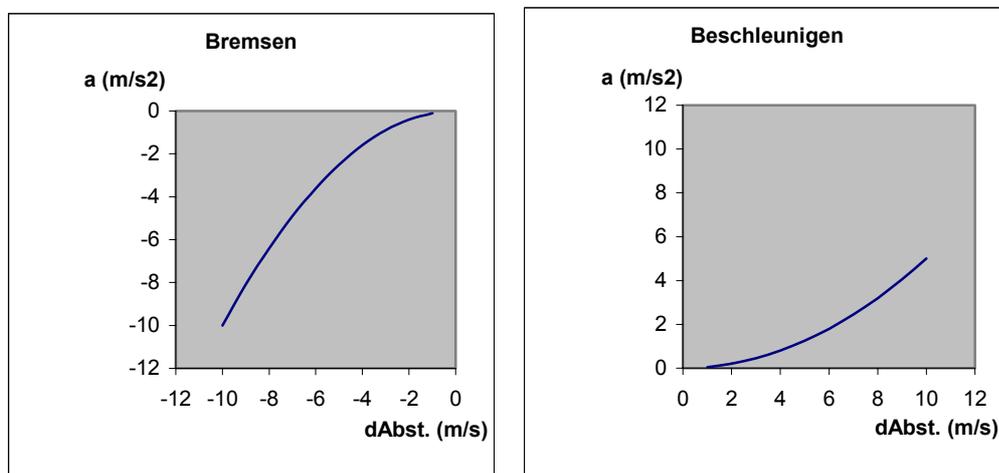


Abbildung 37: Zusammenhang zwischen der Veränderung des Abstands und der Beschleunigung

Die Verwendung dieses Zusammenhangs ergibt eine verzögerte Reaktion auf das Verhalten des vorderen Fahrzeuges.

Ein analoges Verhalten wurde von Leutzenbach und Wiedemann festgestellt. Sie versuchten dies mit folgendem Modell zu erklären:

Fahrzeugfolgmodell von W. Leutzbach und R. Wiedemann⁴⁸

Von den erwähnten Autoren wurde 1974 das INTAC Modell entwickelt, welches die Interaktion der Fahrzeuge im gebundenen Verkehrsablauf beschreibt. Aufgrund von Untersuchungen und Messungen wurde ein oszillierender Abstand zwischen den abhängigen Fahrzeugen bei Geschwindigkeitsänderungen ohne Bremsbetätigung festgestellt.

In verschiedenen Ländern wurde eine Abweichung in der Varianz und der Frequenz festgestellt. Dieser Umstand wird einem landesspezifischen Verkehrsverhalten zugewiesen.

⁴⁷ Die Herleitung und Berechnung ist im Anhang A 2.3.7 beschrieben.

⁴⁸ Vgl. [TRAFFIC86] S. 271ff

Das Folgefahrzeug durchläuft dabei folgende Stadien:

Situation	Reaktion
$v_{\text{FolgeFZ}} > v_{\text{FZ}}$; Abstand verringert sich	Folgefahrzeug beginnt zu bremsen
$v_{\text{FolgeFZ}} = v_{\text{FZ}}$; Abstand bleibt konstant	Folgefahrzeug bremst weiterhin
$v_{\text{FolgeFZ}} < v_{\text{FZ}}$; Abstand vergrößert sich	Folgefahrzeug beschleunigt wieder
$v_{\text{FolgeFZ}} = v_{\text{FZ}}$; Abstand bleibt konstant	Folgefahrzeug beschleunigt weiter
Wiederholen bei 1.	

Dadurch, dass das Folgefahrzeug den Zustand 2 und 4 zu spät realisiert, wird dieser immer übersprungen. Damit ergibt sich eine pendelförmige Funktion des Abstands. Ziel des Folgefahrzeuges ist es, die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeuges zu erreichen, da diese aber in den seltensten Fällen konstant ist, wird dieses Ziel nie erreicht. Je länger das vorausfahrende Fahrzeug die Geschwindigkeit hält, desto näher gleichen sich die beiden Geschwindigkeiten an.

Im Modell von Leutzbach und Wiedemann wird in Abweichung zur verwendeten Modellierung keine Überreaktion der Fahrzeuglenker berücksichtigt. Diese ist für die Pendelbewegung verantwortlich und wird in der verwendeten Modellierung berücksichtigt.

Ausfahren aus dem Verkehrsstrom auf gerader Strecke

Ein Fahrzeug verlässt den Verkehrsstrom, wenn es einen Fahrstreifenwechsel durchführt. Das folgende Fahrzeug wird sich dabei ab einem gewissen Zeitpunkt auf das nächste Fahrzeug konzentrieren. Dabei verlässt das Fahrzeug den Kommunikationsweg, d.h. es beeinflusst nicht mehr das Verhalten des Fahrzeuges.

Das Kommunikationsziel wird gewechselt, wenn der Fahrstreifen auf der geraden Fahrstrecke frei ist, d.h. das folgende Fahrzeug den Fahrweg vollständig⁴⁹ verlassen hat.

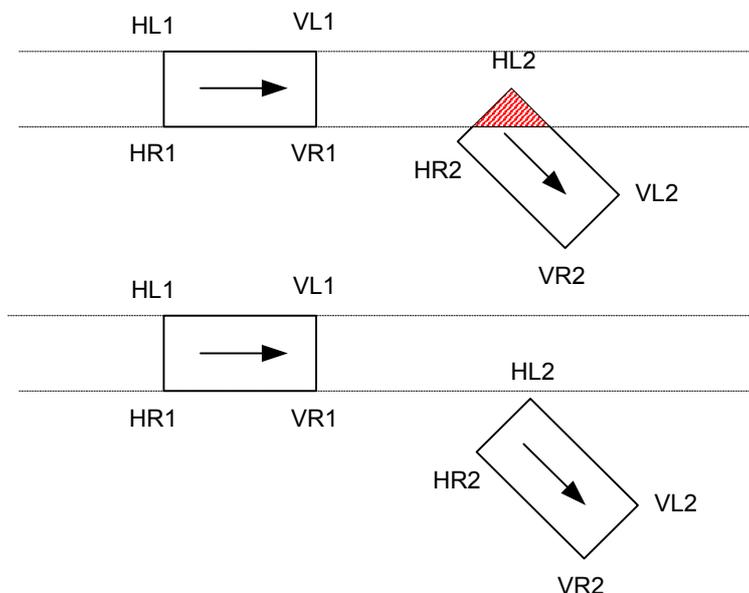


Abbildung 38: Ausfahren aus dem geraden Verkehrsstrom

Ein Wechsel des Kommunikationsziels bedeutet auch ein Entfernen des Fahrzeuges aus der Liste des Fahrstreifens (vgl. auch Kap. 6.2).

⁴⁹ Vgl. Details zur Prüfung im Anhang A 2.3.12.

Einfahren in den Verkehrsstrom auf gerader Strecke

Ein Fahrzeug, das einen Verkehrsstrom verlässt, wird automatisch in einen anderen einfahren. Sobald der vorderste Teil eines Fahrzeuges⁵⁰ in der Fahrbahn des anderen Verkehrsstromes liegt, wird es in dessen Fahrzeugliste eingefügt. Damit werden die Kommunikationswege der folgenden Fahrzeuge berichtigt.

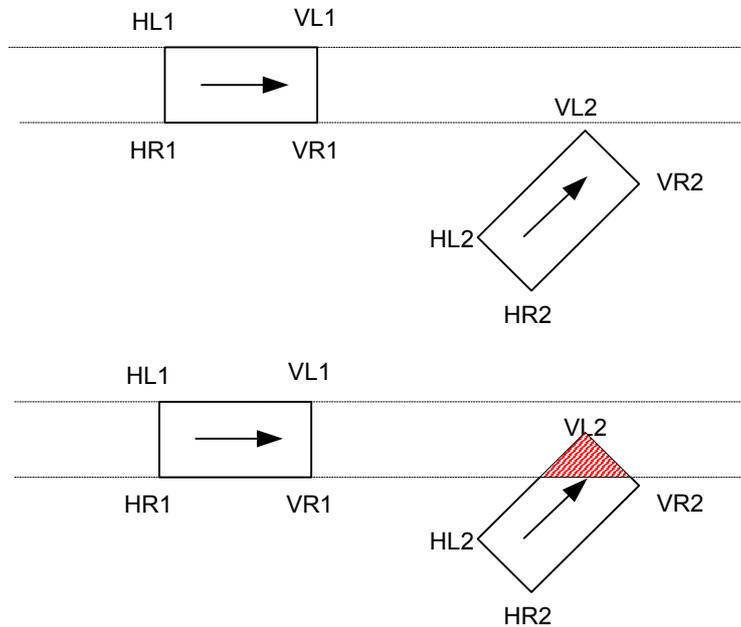


Abbildung 39: Einfahren in einen geraden Verkehrsstrom

Ausfahren aus und einfahren in einen Verkehrsstrom auf der Kreisfahrbahn

Für Fahrzeuge auf der Kreisfahrbahn wird ebenfalls eine Überprüfung der Eckpunkte bezüglich des Fahrstreifens durchgeführt. Mit Ausnahme der Prüfung⁵¹ gelten die gleichen Bedingungen und derselbe Ablauf wie bei der geraden Fahrbahn.

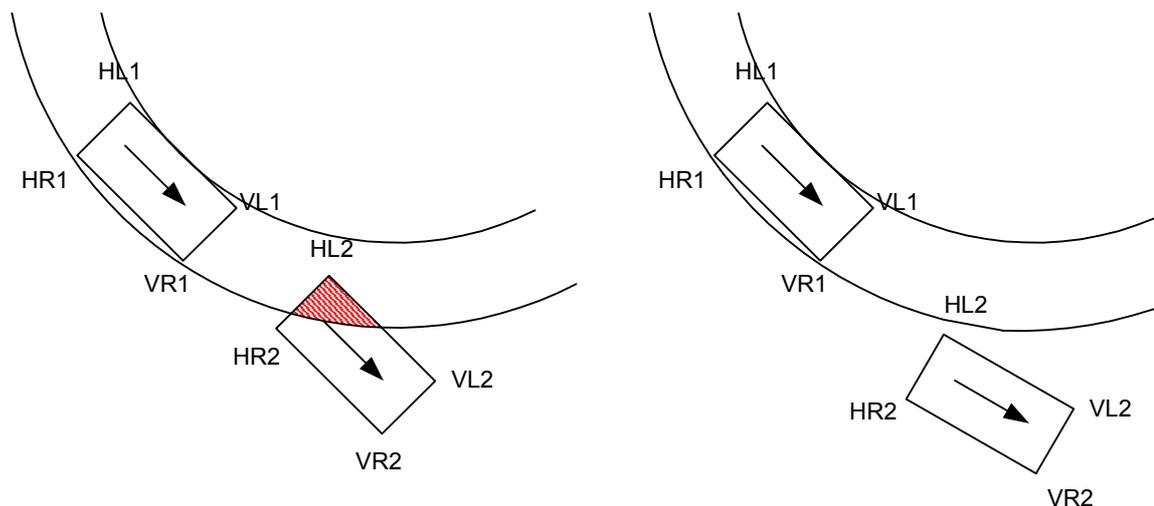


Abbildung 40: Ausfahrt aus einem Verkehrsstrom im Kreisel

Analog dazu wird ebenfalls ein Einfahren in einen Verkehrsstrom modelliert.

⁵⁰ Vgl. Details im Anhang A 2.3.12.

⁵¹ Vgl. Details im Anhang A 2.3.12.

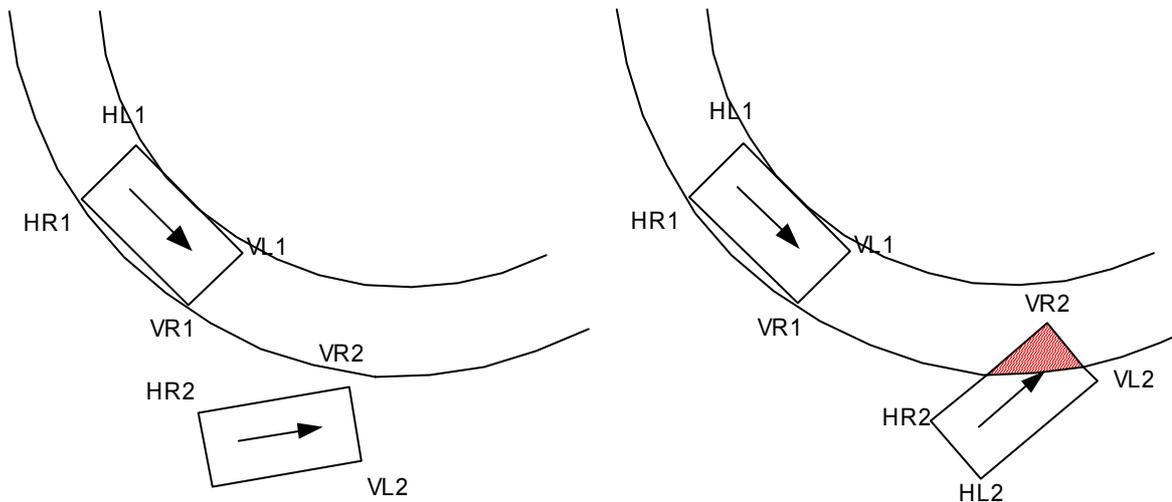


Abbildung 41: Einfahren in einen Verkehrsstrom im Kreisell

6.1.4 Interaktionen zwischen Fahrzeugen in unterschiedlichen Verkehrsströmen

Ein Fahrzeug kommuniziert mit Fahrzeugen in anderen Verkehrsströmen, wenn folgende Situationen auftreten:

- Wechsel des Fahrstreifens (vgl. Kap. 6.2)
- Einfahrt in den Kreisell (vgl. Kap. 6.3.1)
- Ausfahrt aus dem Kreisell (vgl. Kap. 6.3.7)

Für diese Kommunikation wird über einen Link am Geometrieobjekt das entsprechende Fahrzeug in der anderen Fahrzeugliste aufgerufen.

Dabei werden folgende Informationen ausgetauscht:

- nächstes Fahrzeug hinter einer bestimmten Position
- relativer Abstand in Fahrrichtung
- Blinker ein/aus
- Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug

Diese Art der Kommunikation wird ausschliesslich für die Suche nach Zeitlücken beim Ein- und Ausfahren und dem Fahrstreifenwechsel verwendet.

Entsprechende Funktionen stellt jede Fahrzeugliste zur Verfügung und können somit vom jedem Fahrzeug verwendet werden.

6.1.5 Interaktion zwischen dem Fahrzeug und der Fahrbahn

Jedes Fahrzeug bewegt sich auf den vorhandenen Strassenabschnitten (Geometrieobjekte) von der Quelle zur Senke. Dabei werden die Fahrlinie und die maximale Geschwindigkeit vom Strassenabschnitt bestimmt.

Fahrzeuge haben zu diesem Zweck eine fix definierte Schnittstelle zu den Geometrieobjekten, welche bei jeder Aktualisierung des Fahrzeuges aufgerufen wird. Ein Fahrzeug erhält vom Geometrieobjekt (Strassenabschnitt) folgende Angaben:

- maximale Geschwindigkeit
- Fahrrichtung
- Fahrlinie

Das Fahrzeug berücksichtigt diese Werte bei der Berechnung seiner nächsten Position.

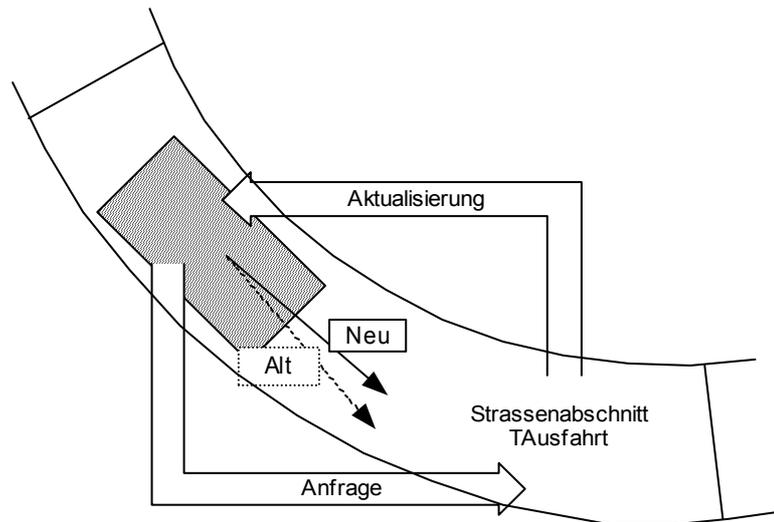


Abbildung 42: Aktualisierung des Fahrzeuges auf der Kreisfahrbahn

Verlässt ein Fahrzeug einen Strassenabschnitt und fährt in einen neuen ein, wird es beim Passieren des Grenzpunktes vom verlassenen Abschnitt an den neuen weitergeleitet.

6.1.6 Interaktionen zwischen Fahrzeugen und Komponenten

Komponenten sind wie im Kap. 5.3.6 beschrieben übergeordnete Objekte der Geometrie (z.B. Zubringer, Kreisell, etc.). Komponenten sind Eigentümer der Fahrzeuglisten, deshalb ermitteln Fahrzeuge über die Schnittstelle der Komponenten Informationen über Fahrzeuge in anderen Verkehrsströmen.

Beispiel

Ein Fahrzeug benötigt die Zeitlücke im Kreisell, um entscheiden zu können, ob es einfahren kann. Dafür wird es über seine Schnittstelle zur Komponente Zubringer, in der es sich gerade befindet, auf dessen Nachfolger, und dann dessen Fahrzeugliste zugreifen. Dadurch kann die Fahrzeugliste des Kreisells die angeforderte Zeitlücke berechnen und übergeben.

6.2 Wechsel des Fahrstreifens

Als Fahrstreifenwechsel werden die Aktionen eines Fahrzeuges bezeichnet, die notwendig sind, um ausgehend von einem Verkehrsstrom in einen anderen parallel dazu verlaufenden zu wechseln.

Einen Fahrstreifenwechsel kann es in folgenden Situationen geben:

- Aufweitung der Einfahrt in mehrere Fahrstreifen
- Ausfahrt aus einem Kreisell mit einer mehrstreifigen Kreisfahrbahn
- Anordnung von mehreren Fahrstreifen in der Ausfahrt

Dabei wird bei der Modellierung davon ausgegangen, dass das Fahrzeug den Fahrstreifen nur bei Bedarf wechselt, d.h. wenn es die Verkehrssituation im Allgemeinen oder das Fahrziel des Fahrzeuges im Speziellen erforderlich macht.

Dabei ist das Fahrzeug, welches den Fahrstreifen wechselt immer vortrittsbelastet.

6.2.1 Bestimmung des Fahrstreifen aufgrund des Fahrzieles

Jedes Fahrzeug hat seit seinem Eintritt in die Simulation ein vorbestimmtes Fahrziel. Dieses wird bei der Erzeugung des Fahrzeuges an der Quelle aufgrund der eingegebenen Fahrzeugmengen zufällig bestimmt.

Bei der Definition des Kreisells kann eine Fahrstreifensignalisation in mehrstreifigen Einfahrten angegeben werden (vgl. Kap. 4.2.4).

Falls dies nicht geschieht, werden sich die Fahrzeuge aufgrund der angegebenen Parameter zur Aufteilung auf die Fahrstreifen aufstellen (vgl. Kap. 4.2.2).

Bei Angabe einer Fahrstreifensignalisation wird ausserdem die Wahrscheinlichkeit definiert, dass sich ein Fahrzeug an die Signalisation hält. Falls diese kleiner als 100% beträgt, wird der Fahrstreifen nach folgendem Muster ermittelt:

Je länger der Weg im Kreisell ist, desto weiter links fährt das Fahrzeug auf der Einfahrt.

Das heisst konkret in einem Beispiel: Ein Fahrzeug muss die zweite Ausfahrt im Kreisell nehmen, um an sein Ziel zu gelangen. Daraus lässt sich mit der obigen Regel ableiten, dass das Fahrzeug den zweiten Fahrstreifen von links in der Einfahrt benutzt.

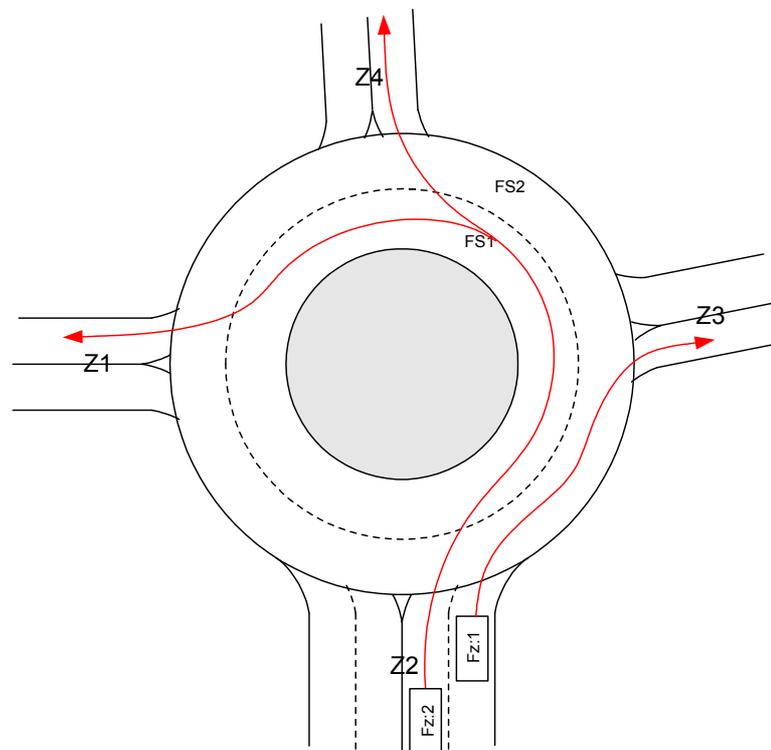


Abbildung 43: Abhängigkeit des Fahrstreifens in der Einfahrt vom Fahrziel ohne Signalisation

Falls weniger Fahrstreifen in der Einfahrt als mögliche Fahrziele (häufigster Fall) vorhanden sind, werden alle nichtzuordenbaren Ziele dem linken Fahrstreifen zugeordnet⁵².

Gemäss praktischen Untersuchungen⁵³ können folgende Zusammenhänge zwischen der Auslastung und der Fahrstreifenwahl festgestellt werden:

- *"Bei geringer und mittlerer Auslastung von Kreiseln mit mehr als 3 Armen wird der innere Fahrstreifen stärker belastet als die äusseren, weil auf der Kreisfahrbahn stets 1 Geradeausstrom und mindestens 2 Linksabbiegerströme auftreten und Linksabbieger überwiegend den linken Zufahrstreifen nutzen."*
- *"Bei hoher Auslastung dürfte die Belegung des inneren Kreiselfahrstreifens eher zurückgehen, weil Fahrstreifenwechsel dann schwieriger auszuführen sind und die Wahrscheinlichkeit, dass beim Einfahren beide Fahrstreifen eine genügend grosse Zeitlücke aufweisen sinkt."*
- *"Die geringste Durchlassfähigkeit wird erreicht, wenn alle Fahrzeuge im Kreisell nur den äusseren rechten Fahrstreifen benutzen würden. Diesem Zustand wirkt aber der Umstand entgegen, dass bei einer geringeren Auslastung des inneren Fahrstreifens die Wahrscheinlichkeit für eine genügend grosse Zeitlücke über beide Fahrstreifen steigt, und somit wieder mehr Fahrzeuge auf den inneren Fahrstreifen gelangen können. Es sollte sich somit ein Gleichgewicht zwischen innerem und äusserem Fahrstreifen einstellen."*
- *"Die durchschnittliche Nutzung des linken Zufahrstreifens entspricht etwa dem Durchlässigkeitsanteil, der diesem Fahrstreifen zur Verfügung steht. Man kann annähernd davon ausgehen, dass sich ein Wartezeitgleichgewicht auf beiden Fahrstreifen einstellt."*

Brilon u.a.⁵⁴ haben 1986 die Spuraufteilung für einen 4-armigen Kreisell mit jeweils 2 Fahrstreifen pro Einfahrt in Hildesheim untersucht. Es ergab sich folgender Zusammenhang zwischen der Gesamtbelastung und der Anzahl der Fahrzeuge auf den Fahrstreifen:

$$(5) \quad y = 0.0005 * 1.98x$$

wobei: y: Anzahl der Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen (Fz/h)
 x: Gesamtbelastung der Einfahrt (Fz/h)

Gesamtbelastung (Fz / h)	linker Fahrstreifen		rechter Fahrstreifen	
	(Fz / h)	%	(Fz / h)	%
200	18	9	182	91
400	71	18	329	82
600	158	26	442	74
800	280	35	520	65
1000	435	44	565	56

Tabelle 34: Zusammenhang zwischen Gesamtbelastung und der Anzahl der Fahrzeuge auf den Fahrstreifen nach Brilon (aus Formel (5))

⁵² Die zur Modellierung verwendete Regel ist im Anhang A 4.1.1 beschrieben.

⁵³ Vgl. [SCHNABEL98] S. 178 ff

⁵⁴ Vgl. [BRILON86]

6.2.2 Zeitlückenwahl beim Fahrstreifenwechsel

Ein Fahrstreifenwechsel auf der Kreisfahrbahn wird durch ein Ausfahren aus einem mehrstreifigen Kreisell hervorgerufen, wenn das Fahrzeug auf einem weiter innen liegenden Fahrstreifen fährt, als zur Ausfahrt notwendig ist.

Beim Wechsel des Fahrstreifens bestehen folgende Möglichkeiten eine bestimmte Zeitlücke anzunehmen:

- Zeitlücke auf gleicher Höhe im Verkehrsstrom
- Zeitlücke weiter voraus im Verkehrsstrom
- Zeitlücke weiter zurück im Verkehrsstrom
- Keine passende Zeitlücke im Verkehrsstrom

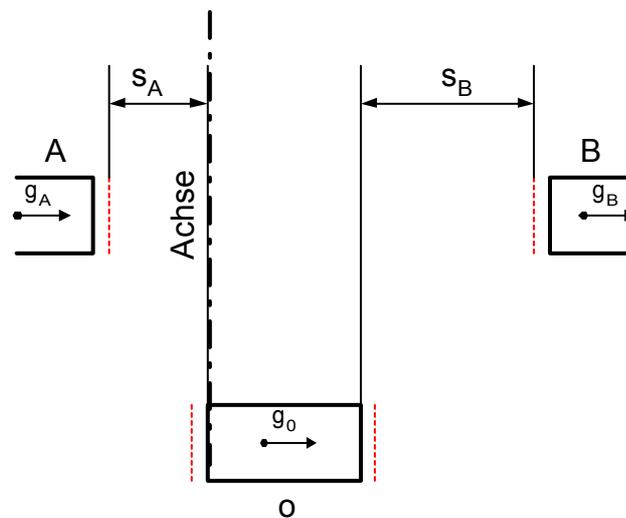


Abbildung 44: Berechnung der Zeitlücken auf gerader Fahrbahn

Grundsätzlich wird bei allen Zeitlückenvergleichen immer die mittlere Sichtweite (ms) eines Fahrzeuges berücksichtigt. Fahrzeuge, bzw. Zeitlücken die weiter entfernt sind, werden nicht in Betracht gezogen, da sie für den Fahrzeuglenker nicht sichtbar sind.

Zeitlücke im benachbarten Fahrstreifen auf Höhe des Fahrzeuges

Als erstes wird immer die Grösse der Zeitlücke auf Höhe des Fahrzeuges als mögliches Ziel des Fahrstreifenwechsels überprüft. Dabei wird das hintere Ende des Fahrzeuges als Höhe des Fahrzeuges (Achse) definiert. Befindet sich diese Achse zwischen zwei Fahrzeugen auf dem benachbarten Fahrstreifen, wird die Grösse dieser Zeitlücken überprüft⁵⁵.

⁵⁵ Vgl. Details im Anhang A 4.1.2.

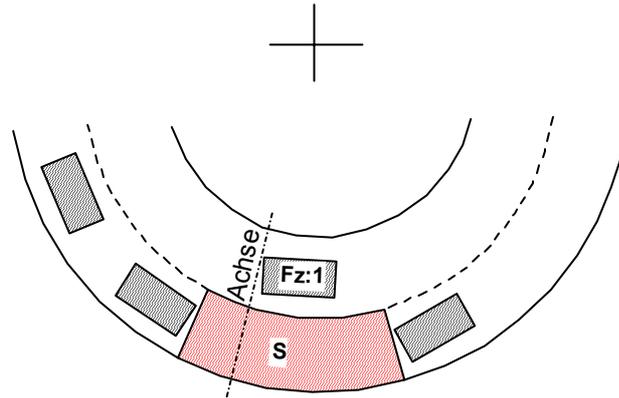


Abbildung 45: Zeitlücke auf Höhe des Fahrzeuges

Sobald eine passende Zeitlücke gefunden ist, wird mit der Wahrscheinlichkeit WB (vgl. Kap. 4.6) der Blinker aktiviert. Wenn aufgrund der Verkehrsdichte keine passende Zeitlücke gefunden wird und das Fahrzeug seine Fahrt verlangsamt, wird auf jeden Fall der Blinker aktiviert.

Zeitlücken weiter zurück im Verkehrsstrom

Bei zu kleiner Zeitlücke auf Höhe des Fahrzeuges wird im Verkehrsstrom zurück nach einer annehmbaren Zeitlücke gesucht⁵⁶. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Geschwindigkeit kurzfristig verringert wird, um auf die Lücke zu warten. Kurz vor dem Erreichen der Lücke wird die Geschwindigkeit wieder an die Fahrzeuge im anderen Verkehrsstrom angepasst, um in die Lücke einfahren zu können.

6.2.3 Fahrstreifenwechsel als Folgefahrzeug

Fährt ein Fahrzeug als abhängiges Fahrzeug im Verkehrsstrom und wechselt das vorausfahrende Fahrzeug den Fahrstreifen, benötigt das abhängige Fahrzeug, wenn es ebenfalls den Fahrstreifen wechseln will, eine kleinere Zeitlücke. Man nennt dies Folgezeitlücke.

Ein abhängiges Fahrzeug verhält sich nur als Folgefahrzeug, wenn das vorausfahrende Fahrzeug den Blinker aktiviert hat. Falls das vorausfahrende Fahrzeug keinen Blinker gesetzt hat, aber trotzdem den Fahrstreifen wechselt, hat es keinen Einfluss auf die Grösse der Zeitlücke des folgenden Fahrzeuges⁵⁷.

6.2.4 Aufweitung der Einfahrt

Bei der Aufweitung einer Einfahrt kann mit einem vereinfachten Verfahren gearbeitet werden, da auf dem neuen Fahrstreifen von der Quelle her keine Fahrzeuge kommen. Deshalb wird in dieser Situation lediglich das letzte Fahrzeug überprüft. Dabei wird das wechselnde Fahrzeug auf jeden Fall in die neue Liste eingefügt und somit eine Anpassung an den Verkehr im neuen Verkehrsstrom erreicht.

6.2.5 Ablauf des Fahrstreifenwechsels

Sobald eine genügend grosse Zeitlücke gefunden wurde, beginnt das Fahrzeug mit der Änderung der Fahrrichtung und wird in die Fahrzeugliste des Zielfahrstreifens eingefügt. Dadurch wird das Fahrzeug von den anderen Fahrzeugen des neuen Fahrstreifens bereits berücksichtigt. Wenn der hinterste Teil des Fahrzeuges den alten Fahrstreifen verlässt, wird es aus der alten Fahrzeugliste entfernt.

⁵⁶ Vgl. Details zur verwendeten Regel im Anhang A 4.1.3.

⁵⁷ Vgl. Detail im Anhang A 4.1.4.

Dadurch ist es möglich, dass ein Fahrzeug für kurze Zeit in zwei Listen geführt wird. Dies ist notwendig weil zwei Fahrströme das Fahrzeug gleichzeitig berücksichtigen müssen.

Somit ergibt sich folgender Ablauf eines Fahrstreifenwechsels:

- Prüfung der Zeitlücken
- Einfügen in Liste des Zielfahrstreifens
- Änderung der Fahrrichtung
- Entfernung aus der Liste im ursprünglichen Fahrstreifen

6.2.6 Überbreite Fahrbahnen

Es gibt Kreisel, die anstatt mehrerer Fahrstreifen in der Kreisfahrbahn eine überbreite Fahrbahn haben. Bei flüssigem Verkehr fahren die Fahrzeuge hier gleich wie in einer einstreifigen Fahrbahn⁵⁸.

Sobald wegen eines Rückstaus aus einer Ausfahrt der Verkehrsfluss ins Stocken gerät, versuchen die Fahrzeuge, die nicht diese Ausfahrt benutzen, innen an den stehenden Fahrzeugen vorbei zu fahren. Dies bedingt, dass die ausfahrenden Fahrzeuge genügend Platz für die vorbeifahrenden Fahrzeuge machen müssen (vgl. Kap. 6.3.10).

Das Folgefahrzeug, das nicht die Ausfahrt benützen will, prüft also bei Erkennung des Rückstaus, ob links neben den vorausfahrenden Fahrzeugen genügend Platz für ein Überholen ist. Ist dies der Fall, werden die ausfahrenden Fahrzeuge links überholt, ansonsten wird bis zum Engpass weitergefahren und dort angehalten.

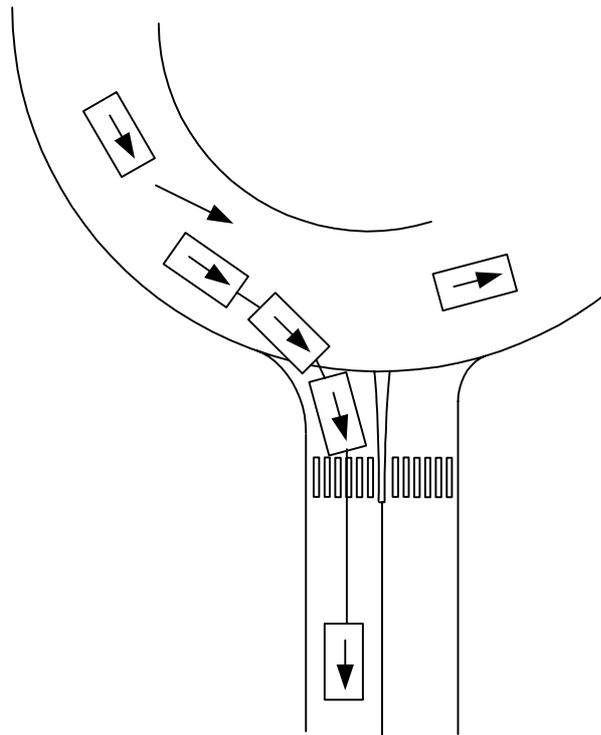


Abbildung 46: Rückstau in einer überbreiten Fahrbahn bei der Ausfahrt; Vorbeifahren möglich

Um ein Überholen zu ermöglichen, müssen Fahrzeuge für diese Situation anders in den Listen geführt werden. So wird ein Fahrzeug, dessen Vorgänger ausfährt und eine

⁵⁸ Zur Vereinfachung wurde in dieser Modellierung dieses Verhalten angenommen. Neueste praktische Untersuchungen haben ergeben, dass die Fahrzeuge bei hoher Verkehrsdichte versetzt fahren, wodurch sich ihr Minimalabstand praktisch auf Null reduziert. Dadurch ergibt sich eine höhere Kapazität dieser Kreiselform gegenüber einstreifiger Fahrbahnen mit normaler Breite.

genügend grosse Lücke seitlich frei lässt überholt. Dabei erfolgt in der Fahrzeugliste folgende Anpassung:

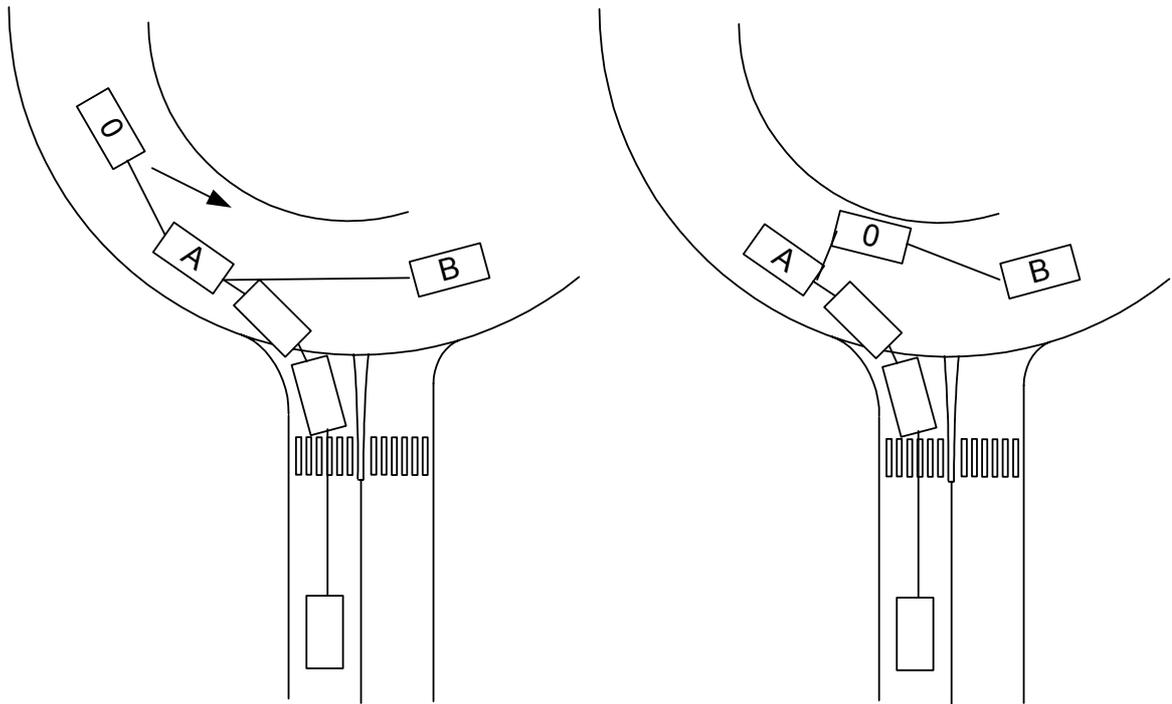


Abbildung 47: Veränderung der Liste beim Überholen in überbreiten Fahrbahnen

Das Fahrzeug 0 überspringt in der Liste das Fahrzeug A und befindet sich neu zwischen den Fahrzeugen A und B.

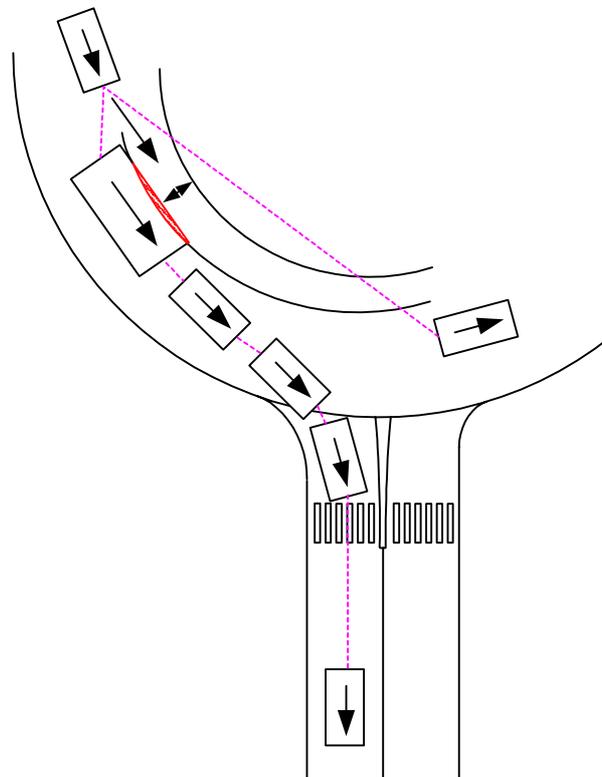


Abbildung 48: Rückstau in einer überbreiten Fahrbahn; kein Vorbeifahren möglich

Sobald das vorausfahrende Fahrzeug blinkt und damit die Absicht bekundet, den Kreisell zu verlassen, wird für das aktuelle Fahrzeug, das die Ausfahrt passiert berechnet⁵⁹, ob ein Vorbeifahren innen an den Fahrzeugen möglich ist.

Wenn das Fahrzeug am vorausfahrenden Fahrzeug vorbeifahren kann, verlagert es seine Fahrlinie nach innen im Kreisell und passt die Geschwindigkeit gemäss der Durchfahrtsbreite an.

Diese Regel wird immer während der Verwendung von überbreiten Fahrbahnen durchlaufen. So kann auch ein mehrfaches Überholen durchgeführt werden.

Als Spezialfall gilt hier, wenn nach dem passierten Fahrzeug kein weiteres mehr in Sichtweite ist. Dann fährt das Fahrzeug als freies Fahrzeug im Kreisell weiter.

6.2.7 Fahrlinie beim Fahrstreifenwechsel

Bei einem Fahrstreifenwechsel muss das Fahrzeug aus der vordefinierten Fahrlinie des Strassenabschnittes abweichen. Bis es wieder ganz im neuen Fahrstreifen eingliedert ist, übernimmt die Steuerung der Fahrlinie das Fahrzeug selbst. Dabei werden folgende Situationen unterschieden:

- Fahrstreifenwechsel auf der geraden Strecke
- Fahrstreifenwechsel im Kreisell
- Kreuzen von Fahrstreifen bei der Ein- und Ausfahrt im Kreisell
- Überholen auf überbreiten Fahrbahnen

Fahrstreifenwechsel auf der geraden Strecke

In Anlehnung an die Schweizer Norm zur Gestaltung von Mittelstreifenüberfahrten⁶⁰ wird für die Modellierung des Fahrstreifenwechsels von folgendem Verhalten der Fahrzeuge ausgegangen. Das Fahrzeug fährt zuerst eine Kurve in Richtung der neuen Fahrbahn, dabei verwendet es den Einschlagwinkel λ , bis es die Mittellinie erreicht hat. Dann fährt es wieder eine Kurve mit dem Einschlagswinkel $-\lambda$, bis die neue Fahrlinie erreicht ist.

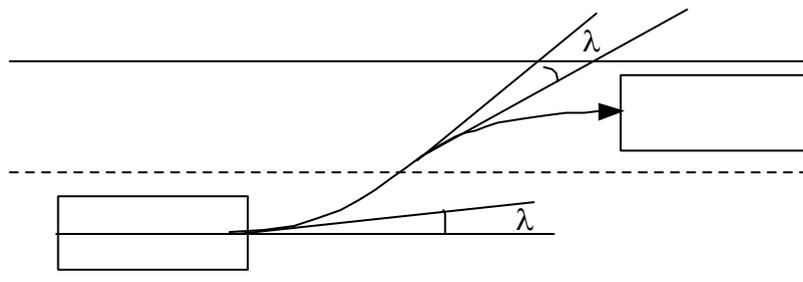


Abbildung 49: Fahrlinie beim Fahrstreifenwechsel auf der geraden Strecke

Der Winkel λ ist abhängig von der Geschwindigkeit. Je grösser die Geschwindigkeit, desto kleiner ist der Winkel. Ausserdem darf der Winkel maximal dem Parameter swma aus den Fahrzeugeigenschaften entsprechen. Aufgrund eigener Beobachtungen⁶¹ wird eine Abhängigkeit des Einschlagwinkels λ von der Geschwindigkeit angenommen⁶².

⁵⁹ Details siehe Anhang A 4.1.5.

⁶⁰ Vgl. [VSS640135]

⁶¹ Beobachtungen des Autors an Kreiseln, sowie die Erfahrung aus eigener Verkehrspraxis führten zu der Annahme der beschriebenen Abhängigkeit. Testsimulationen lieferten mit den vorgeschlagenen Werten realistische Ergebnisse.

⁶² Vgl. Details im Anhang A 2.3.13.

Dabei ergibt sich folgender Zusammenhang:

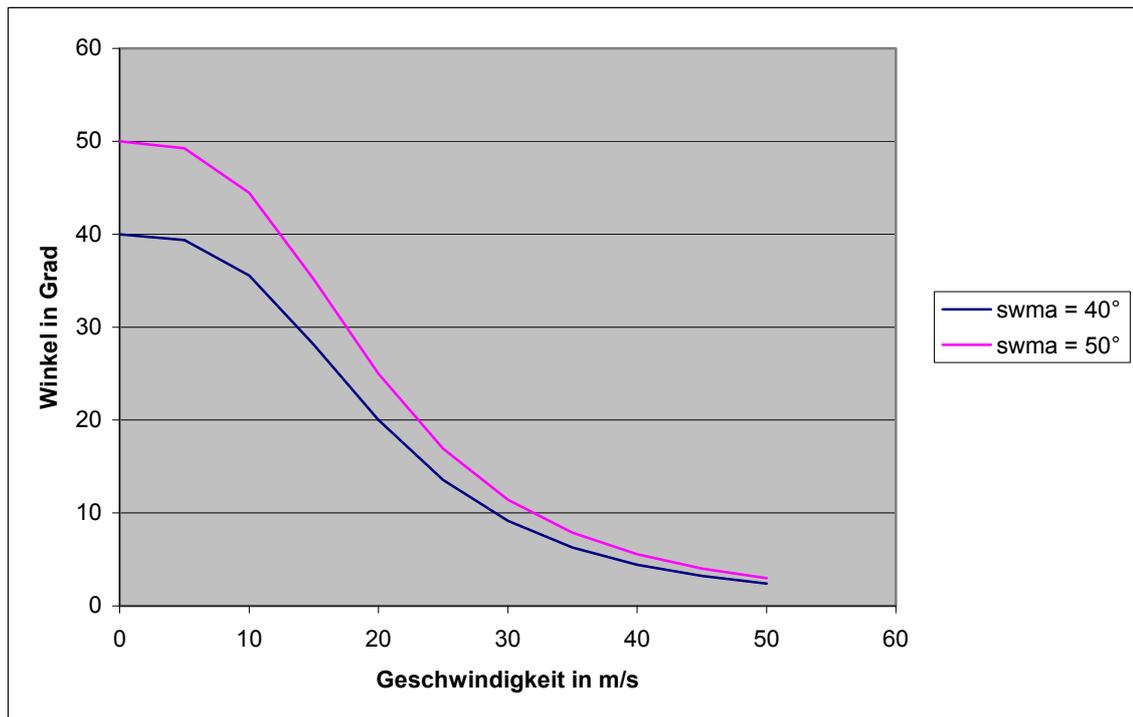


Abbildung 50: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Winkel für den Fahrstreifenwechsel

Bei jeder Aktualisierung des Fahrzeuges wird somit der neue Fahrwinkel bestimmt.

Nach der Überquerung der Mittellinie bleibt diese Abhängigkeit bestehen. Der Einschlagwinkel wird nun aber negativ, da sich das Fahrzeug auf die neue Fahrlinie ausrichtet.

Wechsel des Fahrstreifens auf der Kreisfahrbahn

Bei einem Fahrstreifenwechsel auf der Kreisfahrbahn wird der bereits durch die Fahrt im Kreisel bestehende Einschlagwinkel λ reduziert, so dass der Fahrstreifen verlassen wird. Je geringer die Geschwindigkeit desto deutlicher wird der Einschlagwinkel verkleinert, so dass bei sehr kleinen Geschwindigkeiten sogar ein negativer Wert erreicht wird. Dafür muss anschliessend auf dem neuen Fahrstreifen der Einschlagwinkel umso stärker vergrößert werden, damit die neue Fahrlinie erreicht wird.

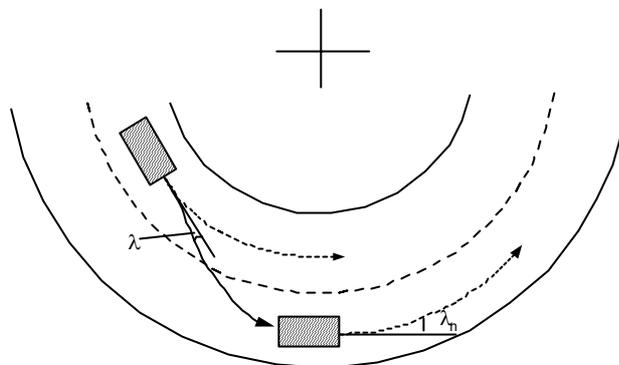


Abbildung 51: Fahrstreifenwechsel auf der Kreisfahrbahn

Sobald die neue Fahrlinie erreicht ist, wird der für den Fahrstreifen benötigte neue Einschlagwinkel λ_n eingestellt und die Fahrt fortgesetzt.

Kreuzen von Fahrstreifen bei der Ein- und Ausfahrt im Kreisel

Beim Ein- und Ausfahren in den Kreisel kann das Fahrzeug Fahrstreifen kreuzen. Unterschiedliche Fahrlinien beim Ein- und Ausfahren erfordern eine differenzierte Berechnung.

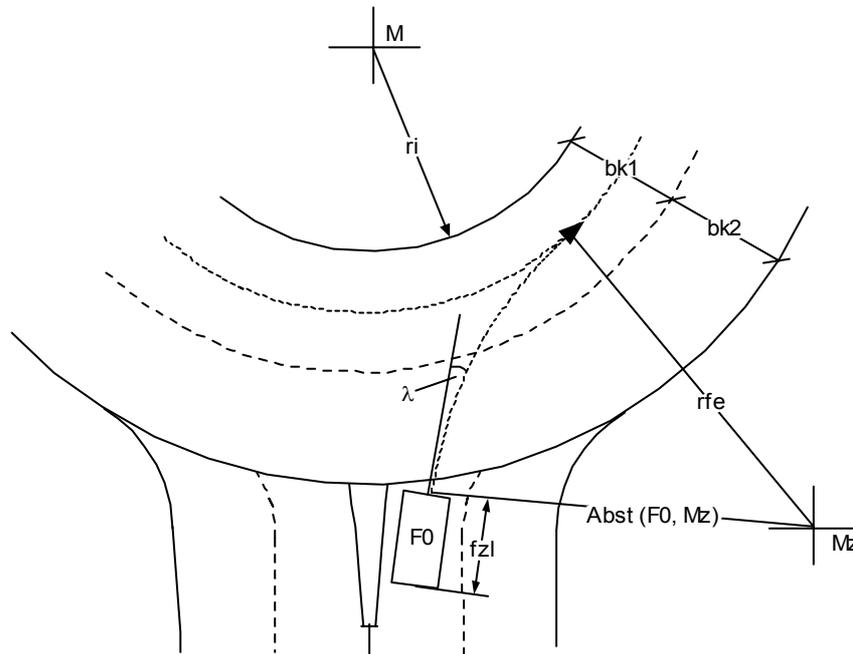


Abbildung 52: Kreuzen eines Fahrstreifens beim Einfahren

Sobald das Fahrzeug mit dem vordersten Teil über den Kreisfahrbahnrand fährt, beginnt es mit dem Kreuzen der Fahrstreifen. Dabei fährt es eine Kurve mit dem Einschlagwinkel λ bis es die Fahrlinie in der Zielfahrspur erreicht⁶³.

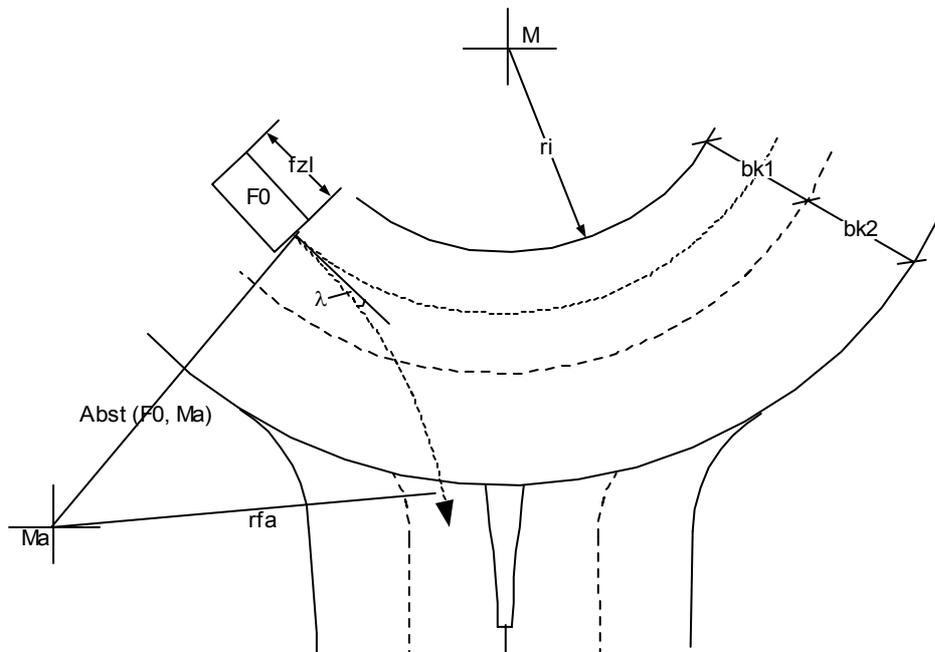


Abbildung 53: Kreuzen eines Fahrstreifens beim Ausfahren

Beim Ausfahren wird der Einschlagwinkel analog berechnet⁶⁴.

⁶³ Vgl. Details im Anhang A 2.3.14.

6.2.8 Ausfahren aus überbreiten Fahrbahnen

Auf überbreiten Fahrbahnen verlagert das Fahrzeug zum Ausfahren seiner Position ganz nach aussen an den Fahrbahnrand (Einspuren).

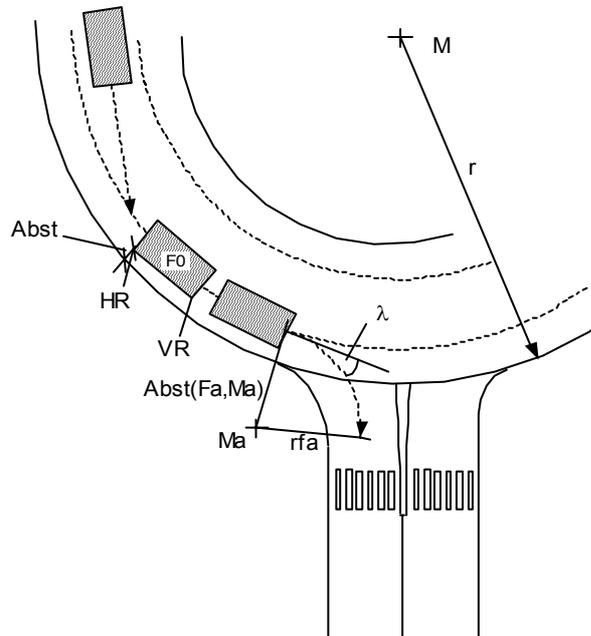


Abbildung 54: Einspuren und Ausfahren auf überbreiten Fahrbahnen

Dabei fährt das Fahrzeug F_0 gerade weiter bis es die äussere Fahrlinie erreicht hat, d.h. der Abstand zum Fahrbahnrand dem Mindestabstand entspricht⁶⁵. Nach Erreichen des Ausfahrtpunktes, wird der Einschlagwinkel zum Ausfahren so gewählt, dass der Ausfahradius eingehalten wird.

6.2.9 Überholen auf überbreiten Fahrbahnen

Auf überbreiten Fahrbahnen kann ein Fahrzeug ein anderes vor der Ausfahrt eingespurtes Fahrzeug überholen (vgl. Kap. 6.2.6).

Dabei wird die Position und Fahrlinie an den inneren Fahrbahnrand verlagert.

⁶⁴ Vgl. Details im Anhang A 2.3.15.

⁶⁵ Vgl. Details im Anhang A 2.3.16.

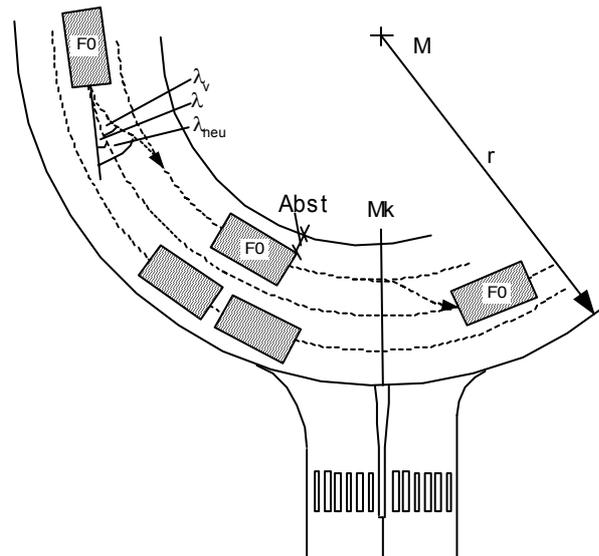


Abbildung 55: Überholen auf überbreiten Fahrbahnen

Abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit, wird der Einschlagwinkel λ vergrößert, bis der Abstand zum inneren Fahrbahnrand dem Minimalabstand⁶⁶ entspricht.

In der Modellierung wird auch hier von einem Einschlagwinkel λ_v , wie er in Kapitel 6.2.7 definiert wird, ausgegangen. Der neue Einschlagwinkel ist somit:

$$(6) \quad \lambda_{\text{neu}} = \lambda + \lambda_v$$

Wobei:

λ_{neu} :	neuer Einschlagwinkel
λ :	aktueller Einschlagwinkel
λ_v :	Einschlagwinkel abhängig von der Geschwindigkeit

Anschließend fährt es solange weiter bis der Ausfahrpunkt Mk erreicht ist. Von hier aus, wenn keine weiteren Fahrzeuge vor der nächsten Ausfahrt blockieren, wird der Einschlagwinkel wieder verkleinert:

$$(7) \quad \lambda_{\text{neu}} = \lambda - \lambda_v$$

Wobei:

λ_{neu} :	neuer Einschlagwinkel
λ :	aktueller Einschlagwinkel
λ_v :	Einschlagwinkel abhängig von der Geschwindigkeit

Dieser Vorgang dauert solange, bis das Fahrzeug die Fahrbahnmitte (Fahrlinie) wieder erreicht hat.

6.3 Ein- und Ausfahren in und aus dem Kreisell

6.3.1 Einfahren in den Kreisell

Der Unterschied dieser Fahrtsituation zum Fahrstreifenwechsel ist, dass beim Einfahren nicht neben dem Verkehrsstrom hergefahren werden kann, bis eine genügend grosse Zeitlücke gefunden wird. Wenn keine Zeitlücke für die Einfahrt vorhanden ist, muss angehalten und gewartet werden. Dies führt zu einer deutlichen Verzögerung des Verkehrsflusses.

Fährt ein Fahrzeug vor dem Einfahrtspunkt auf den Kreisell zu, beginnt es ab einem bestimmten Punkt die Zeitlücken im Kreisell zu beurteilen. Dabei ist entscheidend, ob sich das Fahrzeug im freien oder im gebundenen Verkehrsfluss befindet.

⁶⁶ Vgl. Details im Anhang A 2.3.17.

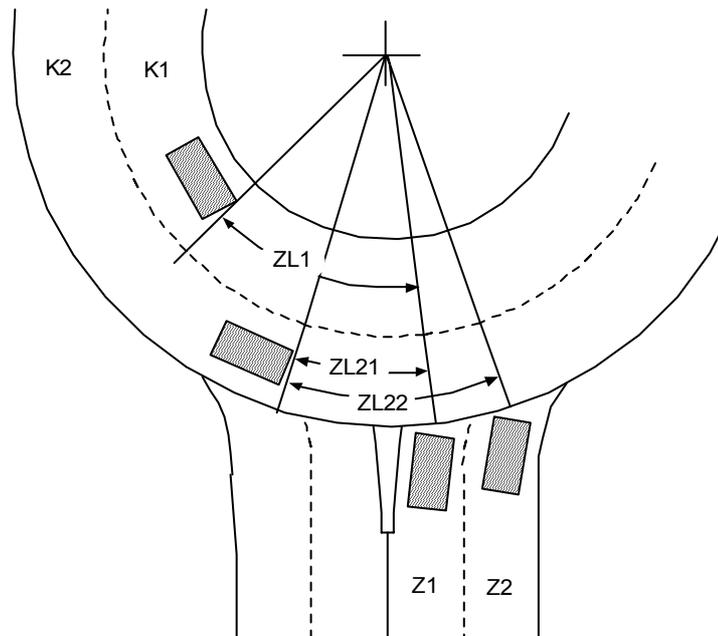


Abbildung 56: Beispiele von Zeitlücken für die Einfahrtsentscheidung in einen Kreisel Typ 2/2

6.3.2 Wahl des Fahrstreifens im Kreisel bei der Einfahrt

Fahrzeuge auf dem Fahrstreifen Z_n werden in einen Kreiselfahrstreifen kleiner gleich n einfahren⁶⁷, d.h. die Einfahrt 2 zum Beispiel fährt in die Kreisfahrbahn 2 oder weiter innen ein. Dabei kann es zu folgenden Konstellationen kommen:

Die Einfahrt hat mehr Fahrstreifen als der Kreisel

Das Fahrzeug der Einfahrt z fährt demzufolge in die Kreisfahrbahn kleiner gleich z ein.

Beispiel: Kreisel mit drei Einfahrten und zwei Kreisfahrbahnen ($n=3, k=2$):

	Kreisfb. 1 (innen)	Kreisfb. 2 (aussen)
Einfahrt 1 (links)	Ja	Nein
Einfahrt 2 (Mitte)	Ja	Nein
Einfahrt 3 (rechts)	Nein	Ja

Tabelle 35: Fahrstreifenwahl in der Kreisfahrbahn (3 Zufahrtsstreifen, 2 Kreisfahrbahnen)

Die Einfahrt hat gleich viele Fahrstreifen wie der Kreisel

Das Fahrzeug der Einfahrt z fährt in die Kreisfahrbahn gleich z ein.

Beispiel: Kreisel mit drei Einfahrten und drei Kreisfahrbahnen ($n=3, k=3$):

	Kreisfb. 1 (innen)	Kreisfb. 2 (mitte)	Kreisfb. 3 (aussen)
Einfahrt 1 (links)	Ja	Nein	Nein
Einfahrt 2 (Mitte)	Nein	Ja	Nein
Einfahrt 3 (rechts)	Nein	Nein	Ja

Tabelle 36: Fahrstreifenwahl in der Kreisfahrbahn (3 Zufahrtsstreifen, 3 Kreisfahrbahnen)

Die Einfahrt hat weniger Fahrstreifen als der Kreisel

Das Fahrzeug der Einfahrt z fährt in die Kreisfahrbahn gleich z ein.

⁶⁷ Vgl. Details im Anhang A 2.3.18.

Beispiel: Kreisell mit zwei Einfahrten und drei Kreisfahrbahnen ($n=2, k=3$):

	Kreisfb. 1 (innen)	Kreisfb. 2 (mitte)	Kreisfb. 3 (ausssen)
Einfahrt 1 (links)	Nein	Ja	Nein
Einfahrt 2 (rechts)	Nein	Nein	Ja

Tabelle 37: Fahrstreifenwahl in der Kreisfahrbahn (2 Zufahrtsstreifen, 3 Kreisfahrbahnen)

6.3.3 Entscheidung vor der Einfahrt

Bei der Einfahrt prüft das Fahrzeug zuerst die Zeitlücke auf dem äussersten rechten (n -ten) Fahrstreifen auf der Kreisfahrbahn. Wenn diese grösser als die Grenzzeitlücke des Fahrzeuges ist, wird die Zeitlücke des nächsten, weiter innen im Kreisell liegenden Fahrstreifens geprüft⁶⁸ bis zum Zielfahrstreifen.

Wenn auf einem Fahrstreifen der Einfahrt links oder rechts neben dem Fahrzeug ebenfalls Fahrzeuge stehen, werden diese nur für die Zeitlückenberechnung berücksichtigt, wenn diese bereits am Einfahren in den Kreisell sind.

Ein Fahrzeug, das die Einfahrtsentscheidung getroffen und den Rand des Kreisells überfahren hat, wird bereits als Fahrzeug der Kreisfahrbahn (in der Liste der Kreisellfahrzeuge aufgenommen) geführt. Deshalb wird ein anderes Fahrzeug auf einer weiter rechts oder links liegenden Einfahrt dieses für seine Zeitlückenberechnung berücksichtigen.

Ein Fahrzeug, das weiter links in den Kreisell eingefahren ist, blockiert seinen Fahrstreifen, so dass nicht gleichzeitig ein anderes Fahrzeug in denselben Fahrstreifen einfahren kann.

Beim Einfahren in den gewünschten Fahrstreifen werden meistens weitere Streifen überquert. Dadurch wird der überquerte Fahrstreifen für eine gewisse Zeit blockiert. Die dafür benötigte Zeitlücke im Verkehrsstrom wurde bereits vor der Einfahrtsentscheidung geprüft und muss somit vorhanden sein.

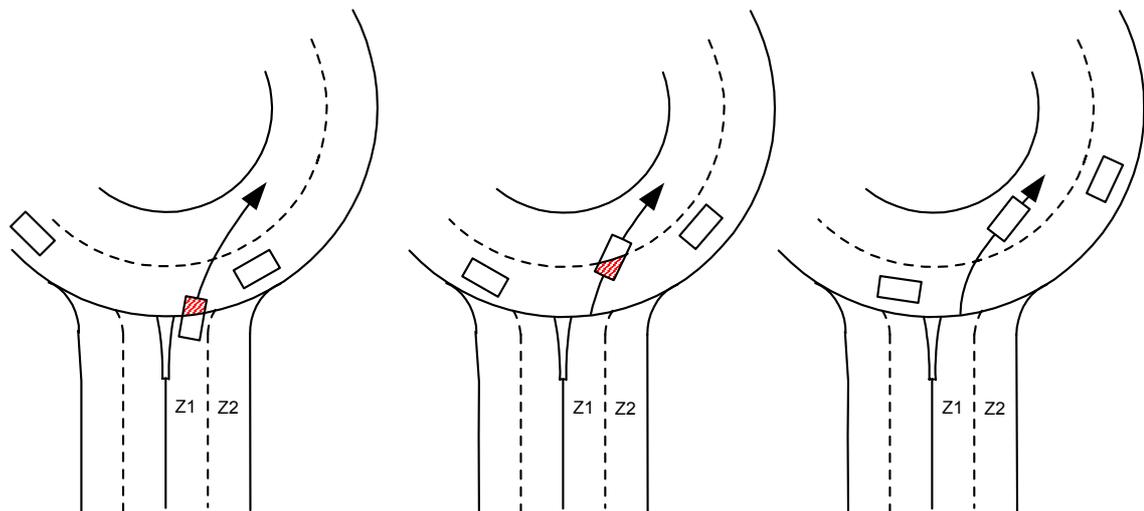


Abbildung 57: Blockierung eines Fahrstreifens während dem Einfahren in den Kreisell

6.3.4 Erkenntnisse aus der Praxis

Untersuchungen von Schnabel und Knotte 1998⁶⁹ haben folgende Zusammenhänge hervorgebracht:

⁶⁸ Vgl. Details im Anhang A 4.2.

⁶⁹ Vgl. [SCHNABEL98] S. 178 ff

"Auf dem rechten Zufahrtsstreifen kommt es zu grösseren Einfahrzeitlücken, da sich Schwerverkehr-Fahrzeuge hauptsächlich auf dem rechten Fahrstreifen aufstellen und der linke Fahrstreifen meist nur von „schnellen“ Fahrzeugen (Pkw) genutzt wird.

Vom rechten Fahrstreifen aus wird trotz freiem äusseren Fahrstreifen im Kreisell nur zögerlich eingefahren, wenn sich auf dem inneren Fahrstreifen Fahrzeuge befinden.

Dass vom rechten Fahrstreifen der Zufahrt in den Kreisinnenfahrstreifen eingefahren wird, wurde nicht beobachtet.

Ein Zusammenhang zwischen der Anzahl, der in einer Zufahrt gestauten Fahrzeuge (→ Verkehrsdruck) und der Grösse der Einfahrzeitlücken konnte nicht festgestellt werden.

Weiter wurde festgestellt, dass auf dem linken Fahrstreifen bei gleichen Einfahrzeitlücken höchstens die Durchlassfähigkeit wie auf dem rechten Fahrstreifen erreicht werden kann."

6.3.5 Stadien des Fahrzeuges beim Einfahren

Beim Einfahren eines Fahrzeuges in den Kreisell werden verschiedene Stadien durchlaufen:

Entscheidungsfindung

Das Fahrzeug fährt auf den Einfahrtspunkt zu und versucht eine genügend grosse Zeitlücke im Kreisell zu finden.

Anhalten

Das Fahrzeug hat keine Zeitlücke gefunden und hält vor dem Einfahrtspunkt an.

Einfahren

Wenn das Fahrzeug eine genügend grosse Zeitlücke für die Einfahrt gefunden hat, wird die Entscheidung zum Einfahren getroffen. Anschliessend wird das Fahrzeug in die Fahrzeugliste des Zielfahrstreifens aufgenommen, damit es für die Fahrzeuge im Kreisell sichtbar ist.

6.3.6 Zeitlücken

Jedes Fahrzeug ermittelt beim Eintritt in die Simulation seine Grenzzeitlücke und seine Folgezeitlücke. Diese bleiben während der Kreiselldurchfahrt konstant.

Für die Zeitlückenberechnung wird zuerst ermittelt, welches Fahrzeug als nächstes vor der Einfahrt ist. Dazu wird die Funktion `getprevFZ` (vgl. Anhang A 3.4) für alle Fahrstreifen bis zum Zielfahrstreifen verwendet.

Beim Einfahren in den Kreisell werden die Grenzzeitlücken mit den Zeitlücken im Kreisell verglichen.

Freies Fahrzeug

Bei einem freien Fahrzeug wird als erstes immer geprüft⁷⁰, ob die Einfahrt von einem anderen Fahrzeug blockiert ist (vgl. Abbildung 58):

⁷⁰ Für Details zu allen Berechnungen dieses Kapitels vgl. Anhang A 2.3.20.

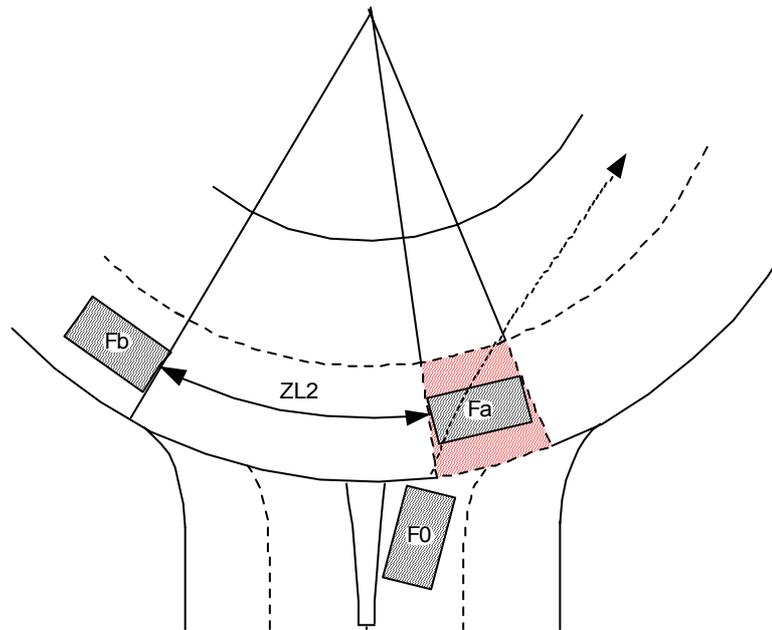


Abbildung 58: Fahrzeug blockiert die Einfahrt

Das passierende Fahrzeug blockiert den schraffierten Sektor der Kreisellbahn.

Anschliessend werden die Zeitlücken aller Fahrzeuge auf den Fahrstreifen bis zum Zielfahrstreifen berechnet.

Zusätzlich wird noch die Zeitlücke zum ersten Fahrzeug (F_c) in der Einfahrt links berechnet. Dabei spielt es keine Rolle, auf welchem Fahrstreifen sich das Fahrzeug befindet, es wird jenes mit dem geringsten Abstand zum Einfahrtspunkt am Kreisell ermittelt.

Das Fahrzeug prüft nach der Berechnung aller Zeitlücken und entscheidet sich gemäss Regeln in Kap. 6.3.3 für die Einfahrt.

Bei der Prüfung wird die aktuelle Grenzzeitlücke plus die Wegzeit bis zum Einfahrtspunkt mit den berechneten Zeitlücken verglichen.

Gebundenes Fahrzeug:

Ein gebundenes Fahrzeug verfährt analog den oben beschriebenen Regeln, mit der Ausnahme, dass für den Zeitlückenvergleich die Folgezeitlücke verwendet wird.

Um in einen Fahrstreifen einfahren zu können oder ihn zu kreuzen, muss die Zeitlücke im Verkehrsstrom grösser als die Grenzzeitlücke (für das vorausfahrende Fahrzeug) plus der Folgezeitlücke sein.

Das Folgefahrzeug geht bei der Entscheidung immer davon aus, dass das vorausfahrende Fahrzeug in seinen Wunschfahrstreifen einfährt. Ist diese nicht eindeutig definiert (es gibt mehr Fahrstreifen im Kreisell als in der Einfahrt), wird immer von dem am weitesten entfernten Fahrstreifen ausgegangen.

Reicht eine Zeitlücke für das vorausfahrende Fahrzeug, aber nicht mehr für das Folgefahrzeug, hält das Folgefahrzeug vor der Einfahrt an.

Fahrzeuge, die einem Folgefahrzeug in der Einfahrt folgen, verwenden ebenfalls Folgezeitlücken.

6.3.7 Ausfahren aus dem Kreiselp

Erreicht das Fahrzeug den Ausfahrtpunkt beginnt es den Kreiselp zu verlassen. Abhängig davon, auf welchem Fahrstreifen es gerade fährt, kann es auch beim Ausfahren zu einem Kreuzen einer oder mehrerer Fahrstreifen kommen (mehrstreifige Ausfahrten).

Der einfachste Fall ist ein Fahrzeug auf dem äussersten Fahrstreifen. Dieses kann ohne Hindernis in die Ausfahrt weiterfahren.

Fahrzeuge auf Fahrstreifen weiter innen im Kreiselp müssen zuerst die zu kreuzenden Fahrstreifen auf eine genügend grosse Zeitlücke prüfen. Dabei verwenden sie die analoge Funktionalität wie bei der Einfahrt in den Kreiselp (vgl. Kap. 6.3.1).

6.3.8 Bestimmung des Fahrstreifens im Kreiselp für die Ausfahrt

Ein Fahrzeug, das bei der nächsten Ausfahrt den Kreiselp verlast, versucht so schnell wie möglich auf einen Ausfahrtpfeifen⁷¹ zu fahren. Wenn der Verkehr zu dicht ist, und keine genügend grosse Zeitlücke für einen Fahrstreifenwechsel vorhanden ist, verlangsamt das Fahrzeug die Fahrt, bis es im Extremfall beim Ausfahrtpunkt anhält.

Der Zielfahrtpfeifen ist abhängig von der Anzahl der Fahrtpfeifen⁷² der Ausfahrt.

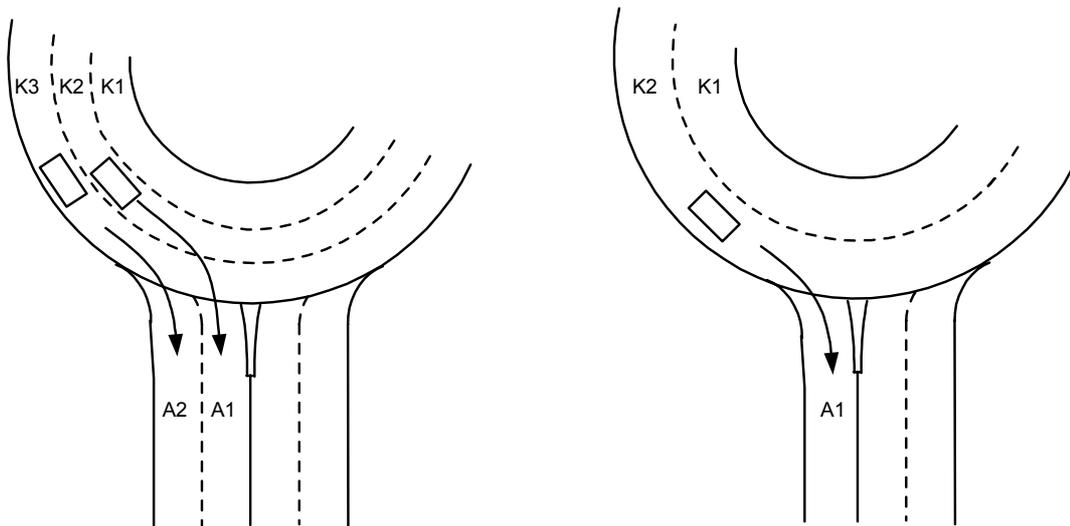


Abbildung 59: Bestimmung des Fahrtpfeifens im Kreiselp für die Ausfahrt

Der Vorgang des Fahrtpfeifenwechsels wird analog den Ausführungen im Kapitel 6.2 durchgeführt.

6.3.9 Stadien beim Ausfahren

Sobald das Fahrzeug die letzte Einfahrt vor seiner Zielausfahrt passiert hat, beginnt der Ausfahrtpprozess.

Beim Ausfahren aus dem Kreiselp werden folgende Stadien durchlaufen:

Bestimmung des Zielfahrtpfeifens

Das Fahrzeug bestimmt anhand der Anzahl der Fahrtpfeifen der Ausfahrt seinen Zielfahrtpfeifen im Kreiselp.

Setzen des Blinkers

⁷¹ Als Ausfahrtpfeifen wird in dieser Modellierung ein Fahrtpfeifen verstanden, von welchem ein Fahrzeug ohne Vereinigung mit weiteren Verkehrsströmen aus dem Kreiselp ausfahren kann. Bei einer einstreifigen Ausfahrt als Beispiel wäre dies der äusserste rechte Fahrtpfeifen des Kreisels.

⁷² Vgl. Details im Anhang A 2.3.19.

Das Fahrzeug aktiviert mit der Wahrscheinlichkeit WB den Blinker.

Prüfen der Fahrzeuge im Zielausfahrtstreifen

Das Fahrzeug wird als letztes in der Fahrzeugliste der Zielausfahrtstreifen eingefügt. Dadurch wird während des Ausfahrens ständig der Abstand zum nächsten Fahrzeug in der Ausfahrt überwacht und eingehalten.

Fahrstreifenwechsel im Kreisell (optional)

Falls der Zielfahrtstreifen von dem aktuellen Fahrstreifen abweicht, wird ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt.

Ausfahren aus dem Kreisell ohne Kreuzen

Ist der Ausfahrtpunkt erreicht wird mit dem Ausfahren begonnen. Dabei verlässt das Fahrzeug den Kreisfahrtstreifen. Hat das Fahrzeug vollständig den Fahrstreifen verlassen, wird es aus der Kreiselliste entfernt, so dass es von nachfolgenden Fahrzeugen nicht mehr berücksichtigt wird.

Ausfahren aus dem Kreisell mit Kreuzen

Sobald für das ausfahrende Fahrzeug ersichtlich wird, dass mindestens ein Fahrstreifen zur Ausfahrt gekreuzt wird, berechnet es die Zeitlücke in den zu kreuzenden Fahrstreifen. Bei genügend grossen Zeitlücken kreuzt das Fahrzeug den Fahrstreifen. Haben nicht alle zu kreuzenden Fahrstreifen eine genügend grosse Zeitlücke⁷³, hält das Fahrzeug an. Die Wegzeit zum Ausfahrtpunkt wird zur errechneten Zeitlücke addiert und mit der Grenzzeitlücke verglichen. Ein Folgefahrzeug verwendet die Folgezeitlücke.

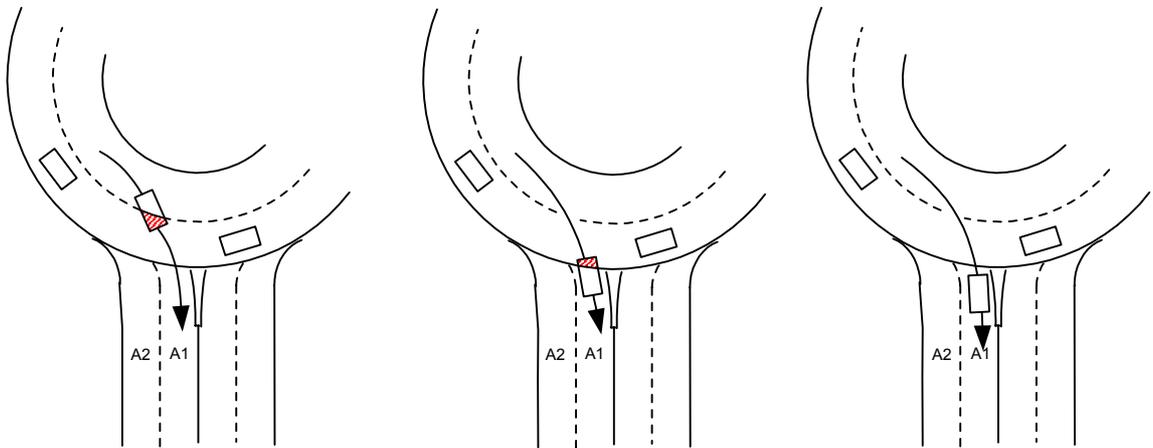


Abbildung 60: Ausfahren aus dem Kreisell von einer inneren Fahrspur⁷⁴

Hat das Fahrzeug vollständig einen Fahrstreifen verlassen (vgl. Kap. 6.1.3) wird es aus dieser Kreiselliste entfernt, so dass es von nachfolgenden Fahrzeugen nicht mehr berücksichtigt wird.

6.3.10 Überbreite Fahrbahnen

Bei überbreiten Fahrbahnen wird nach dem passieren der letzten Einfahrt, der Fahrstreifen an den äusseren Rand der Fahrbahn verlagert (Einspuren), damit nicht ausfah-

⁷³ In dieser Modellierung werden die gleichen Formeln zur Berechnung der Zeitlücken verwendet, wie sie zum Einfahren in den Kreisell definiert wurden. Für Details vgl. Anhang A 2.3.20.

⁷⁴ Auf die Beschreibung des Falls, dass ein Fahrzeug von der inneren Fahrspur des Kreisells auf die rechte Fahrspur der Ausfahrt fährt, wird zur Vereinfachung verzichtet.

rende Fahrzeuge innen vorbeifahren können (vgl. Kap. 6.2.6). Der Ausfahrtvorgang wird analog dem oben beschriebenen Verfahren durchgeführt.

6.4 Hindernisse in der Fahrbahn, Fussgänger und Tram

Grundsätzlich gilt, dass Fahrzeuge, die auf ein Hindernis auffahren, anhalten müssen, bis das Hindernis beseitigt ist.

Ein Fahrzeug erfährt vom betreffenden Geometrieobjekt (vgl. Kap. 5.3) von einem bevorstehenden Hindernis. Das bedeutet, dass bei der Kommunikation mit dem Geometrieobjekt, dem Fahrzeug das Vorhandensein und der Ort eines Hindernisses mitgeteilt wird.

Ein Hindernis kann erst berücksichtigt werden, wenn der Abstand des Fahrzeuges zum Hindernis kleiner als die Sichtweite ist, somit dieses also vom Fahrzeuglenker gesehen werden kann.

6.4.1 Fussgängerstreifen

Fussgängerstreifen (FGS) sind Objekte, welche sich in der Ein- und Ausfahrt zu einem Kreisel befinden können (vgl. auch Kap. 4.7.2). Diese Objekte verwalten die Bewegungen der Fussgänger selbständig. Deshalb muss bei jeder Anfrage des Fahrzeuges an das befahrene Geometrieobjekt, dieses wiederum seinerseits das Fussgängerstreifenobjekt anfragen, ob im Moment gerade Fussgänger die Strasse queren oder an der Seite warten.

Ein Fussgängerstreifen hat drei verschiedene Zustände: Frei, Warten und Besetzt.

Jedes Fahrzeug, das die Ein- oder Ausfahrt benützt, wird wie folgt auf die Zustände reagieren:

Zustand FGS \ Zustand Fahrzeug	Frei	Warten	Besetzt
Freie Fahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg ausreichend	Keine Beeinträchtigung	Anhalten mit der Wahrscheinlichkeit WHF	Anhalten
Gebundene Fahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg ausreichend	Keine Beeinträchtigung	Vorausfahrendes Fahrzeug hält: Anpassung an vorausfahrendes Fahrzeug Vorausfahrendes Fahrzeug hält nicht: Anhalten mit der Wahrscheinlichkeit WHF	Anpassung an vorausfahrendes Fahrzeug
Freie Fahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg nicht ausreichend	Keine Beeinträchtigung	Weiterfahrt	Kollision
Gebundene Fahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg nicht ausreichend	Keine Beeinträchtigung	Anpassung an vorausfahrendes Fahrzeug	Kollision

Tabelle 38: Reaktionen der Fahrzeuge auf die Belegungszustände eines Fussgängerstreifens

Während der Zufahrt auf den Fussgängerstreifen kann sich dessen Zustand ändern. Dies hat folgende Auswirkungen auf das Fahrzeug:

Zustandsübergang \ Zustand Fahrzeug	Frei → Warten	Warten → Besetzt	Besetzt → Frei
Freie Fahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg ausreichend	Anhalten mit der Wahrscheinlichkeit WHF	Anhalten	Nicht möglich ¹⁾
Gebundene Fahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg ausreichend	Vorausfahrendes Fahrzeug hält: Anpassung an vorausfahrendes Fahrzeug Vorausfahrendes Fahrzeug hält nicht: Anhalten mit der Wahrscheinlichkeit WHF	Anpassung an vorausfahrendes Fahrzeug	Nicht möglich ¹⁾
Freies Fahrzeug, anhalten vor dem FGS	Nicht möglich	Anhalten	Freie Weiterfahrt

Freie Fahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg nicht ausreichend	Weiterfahrt	Kollision	Nicht möglich ^{*)}
Gebundene Zufahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg nicht ausreichend	Anpassung an vorausfahrendes Fahrzeug	Kollision	Nicht möglich ^{*)}

Tabelle 39: Reaktionen der Fahrzeuge auf Übergänge der Belegungszustände eines Fussgängerstreifens

^{*)} Ein ändern des Zustandes von besetzt auf frei ist in diesen Fällen nicht möglich, da bei einem besetzten Fussgängerstreifen das Fahrzeug immer im Zustand 'Anhalten vor FGS' ist.

Kollisionen werden in der Modellierung nicht berücksichtigt, deshalb wird im Fall einer Kollision das Fahrzeug stärker als zulässig abgebremst.

6.4.2 Tramdurchfahrt

Eine Tramdurchfahrt wird mit einer Lichtsignalanlage geregelt. Diese kennt ähnlich zum Fussgängerstreifen 2 Zustände:

- abgeschaltet → Freie Fahrt
- Rot (mit Vorphase Gelb) → Anhalten

Jedes Fahrzeug, das die Ein- oder Ausfahrt benützt, wird wie folgt auf die Zustände reagieren:

Zustand Fahrzeug \ Zustand Tram	Frei	Besetzt
Freie Fahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg ausreichend	Keine Beeinträchtigung	Anhalten
Gebundene Fahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg ausreichend	Keine Beeinträchtigung	Anpassung an vorausfahrendes Fahrzeug
Freie Fahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg nicht ausreichend	Keine Beeinträchtigung	Kollision
Gebundene Fahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg nicht ausreichend	Keine Beeinträchtigung	Kollision

Tabelle 40: Reaktionen der Fahrzeuge auf die Belegungszustände einer Tramdurchfahrt

Während der Zufahrt auf den Fussgängerstreifen kann sich dessen Zustand ändern. Dies hat folgende Auswirkungen auf das Fahrzeug:

Zustand Fahrzeug \ Zustandsübergang	Frei→Besetzt	Besetzt→Frei
Freie Fahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg ausreichend	Anhalten	Nicht möglich ^{*)}
Gebundene Fahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg ausreichend	Anpassung an vorausfahrendes Fahrzeug	Nicht möglich ^{*)}
Freies Fahrzeug, anhalten vor dem FGS	Anhalten	Freie Weiterfahrt
Freie Fahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg nicht ausreichend	Kollision	Nicht möglich ^{*)}
Gebundene Zufahrt auf den Fussgängerstreifen, Bremsweg nicht ausreichend	Kollision	Nicht möglich ^{*)}

Tabelle 41: Reaktionen der Fahrzeuge auf Übergänge der Belegungszustände einer Tram-durchfahrt

^{*)} vgl. Kapitel 6.4.1

6.4.3 Reaktionen der Fahrzeuge

Aus den obigen Beschreibungen des Verhaltens bei bestimmten Belegungszuständen und Reaktionen auf deren Änderungen können die nachfolgenden Fälle unterschieden werden:

Annäherung zum Halt

Bei Messungen von Hoffmann u.a.⁷⁵ 1990 in Berlin, zeigte sich, dass sich die Bremsvorgänge aus grösseren Entfernungen deutlich in zwei Abschnitte mit unterschiedlichen Verzögerungen untergliedern. In einer ersten Phase schwanken die Anfangsverzögerungen in Abhängigkeit von der Entfernung zur Haltelinie zwischen 0.05 bis 1.0 m/s², die etwa als ein verhaltenes „Fuss vom Gas“ interpretiert werden könnte.

Ähnliche Untersuchungszwecke haben auch des Fahrzeugfolgemedells von W. Leutzbach und R. Wiedemann (vgl. Kap.6.1.3)

Die mittleren Werte der Anfangsverzögerung in Abhängigkeit vom Ort des Verzögerungsbeginns werden in der folgenden Tabelle angegeben:

Ort des Verzögerungsbeginns von der Haltelinie (m)	mittlere Anfangsverzögerung (m/s ²)
240 – 300	0.23
180 - 240	0.30
120 -180	0.35
< 120	0.5

Tabelle 42: Mittlere Anfangsverzögerung in Abhängigkeit vom Ort des Verzögerungsbeginns nach Hoffmann

⁷⁵ Vgl. [HOFMANN90].

Um diese Werte bei der Verzögerung in der Modellierung zu verwenden, wird in Anlehnung an Munawar⁷⁶ folgende Regel verwendet:

Verhältnis b_{erf} zu b_{max}	Verzögerung des Fahrzeuges (m/s^2)
< 20%	b_0 (min. $0.2 * b_{\text{erf}}$)
20% bis 30%	$1.5 * b_0$ (min $0.5 * b_{\text{erf}}$)
> 30%	b_{erf}

Tabelle 43: Effektive Bremsverzögerung in Abhängigkeit zur notwendigen Bremsverzögerung

Wobei: b_{erf} : Erforderliche Bremsverzögerung⁷⁷, um am Haltepunkt zum Stillstand zu gelangen
 b_0 : Parameter für die Bremsverzögerung ohne Betätigung der Bremse
 b_{max} : Maximal zulässige Bremsverzögerung

Sämtliche oben beschriebene Grössen gelten nur für das freie Fahrzeug. Ein Folgefahrzeug passt seine Geschwindigkeit an und kommt somit ebenfalls zum Stillstand.

Beschleunigung nach Halt

Ein Fahrzeug, das nach einer Geschwindigkeitsreduktion wieder beschleunigt, wird dies mit der Beschleunigung a_{beschl} (vgl. Kap. 6.1.2) machen.

Kollision

Ist der Bremsweg nicht ausreichend und ist trotzdem ein Halt erforderlich, hält das Fahrzeug an. Dabei wird die maximale Bremsbeschleunigung überschritten.

Wenn $b_{\text{erf}} > b_{\text{max}}$, dann ist der Bremsweg nicht ausreichend, d.h. um anzuhalten, muss das Fahrzeug stärker als seine maximale Verzögerung abgebremst werden.

6.5 Abtrennung des Linienverkehrs durch eine Busspur

Mündet eine Busspur neben einem normalen Fahrstreifen in den Kreisell ein, hat der Bus Vortritt gegenüber den anderen Fahrzeugen. Somit ergeben sich folgende Einflüsse auf das Einfahrverhalten der Fahrzeuge bei einem Kreisell mit Busspur:

Situation	Einfluss
Busspur ist leer	kein Einfluss
Busspur liegt rechts neben dem äussersten Fahrstreifen und ein Bus wartet vor der Einfahrt.	Fahrzeuge auf allen Fahrspuren können trotz genügend grosser Zeitlücke im Kreisell nicht einfahren.

Tabelle 44: Reaktionen der Fahrzeuge auf eine Busspur

Alle oben genannten Fälle werden bei der Einfahrentscheidung berücksichtigt (vgl. Kap. 6.3.3).

⁷⁶ Vgl. [MUNAWAR94] S.64ff

⁷⁷ Vgl. Details im Anhang A 2.3.11.

7 Modellierung der Fussgänger im Verkehrssystem Kreisel

Der Fussgängerstreifen ist ein eigenständiges Objekt⁷⁸ und kann an einer beliebigen Stelle im Zubringer positioniert werden. Er gehört nicht zur Ein- oder Ausfahrt sondern zum Zubringer (vgl. Kap. 5.4).

Die Steuerung der Fussgängerstreifen übernehmen zwei Prozesse. Der eine Prozess 'FG_Erzeugen' übernimmt die Erzeugung, der andere 'FG_Steuerung' die Steuerung der Fussgänger. Beide Prozesse sind in Abbildung 61 detailliert dargestellt.

Beide Objekte werden zu Beginn der Simulation erzeugt. Der Erzeugerprozess beginnt sofort mit der Berechnung der ersten Zeitlücke (vgl. Kap. 4.7.2). Anschliessend wartet er diese Zeitspanne ab, bis der Steuerungsprozess angestossen wird. Nun beginnt der Prozess von neuem mit der Berechnung der nächsten Zeitlücke. Der Steuerungsprozess wird nach dem Queren der Fahrbahn angehalten, und wartet darauf, dass er vom Erzeugerprozess wieder geweckt wird.

Für jeden Fussgänger wird ein neues Objekt der Klasse TFussgaenger erzeugt. Darin werden die Daten des Fussgängers abgespeichert, wie z.B. Position, Überquerungszeit, etc. Dieses Objekt übernimmt auch die Darstellung des Fussgängers in der Simulation. Sobald der Fussgänger den Streifen überquert hat, wird das Fussgängerobjekt gelöscht. Falls kein weiterer Fussgänger mehr vorhanden ist, wird auch der Steuerungsprozess angehalten.

⁷⁸ Übernommen aus [POEFFEL98] und erweitert.

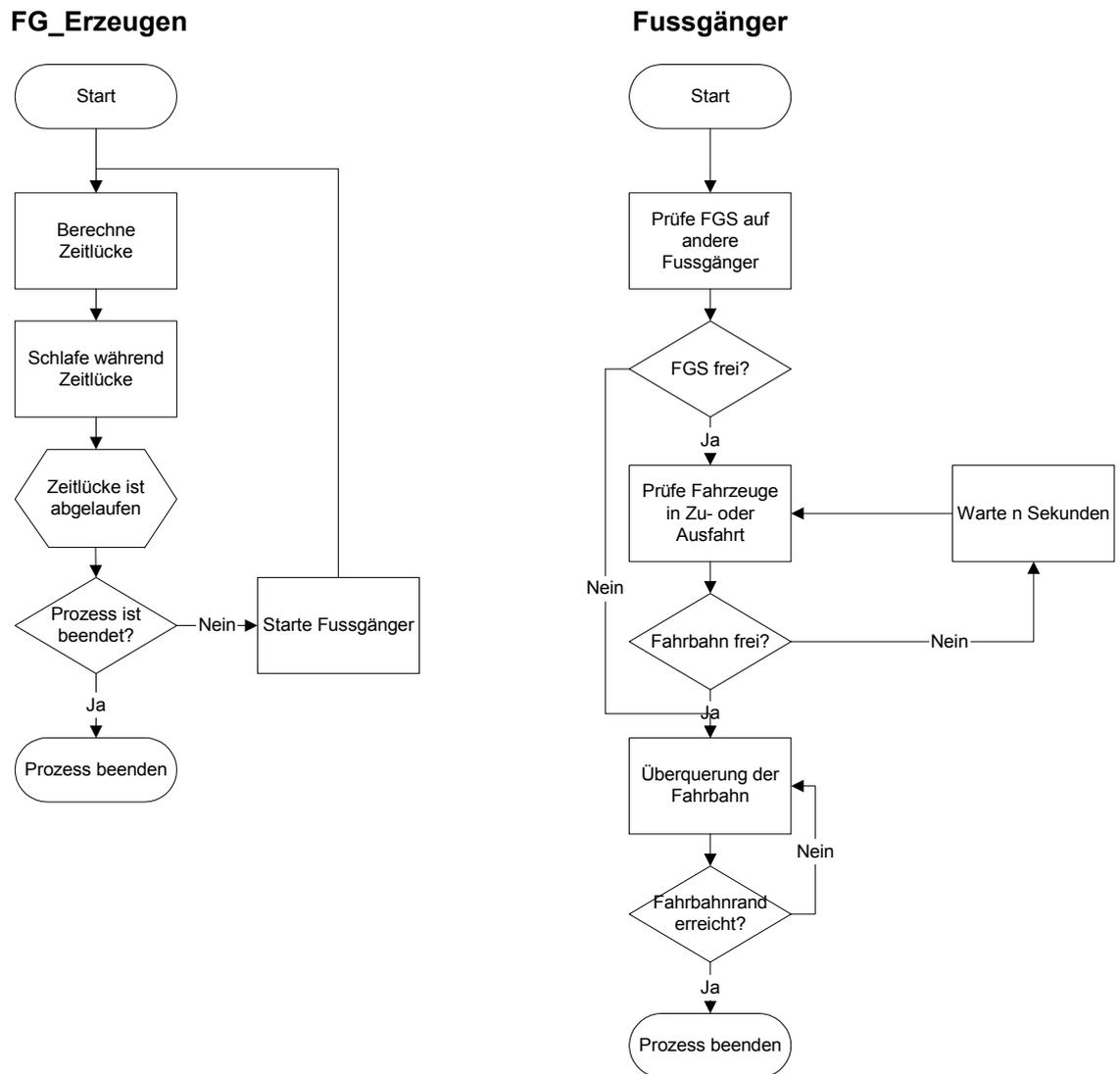


Abbildung 61: Prozesse Erzeugen und Steuerung der Fussgänger

7.1 Erzeugung der Fussgänger

Für die Erzeugung von Fussgängern existieren pro Fussgängerstreifen eigene Prozesse, welche nur die Aufgabe haben in den richtigen Zeitabständen Fussgängerobjekte zu erzeugen und die Steuerung anzustossen.

Dabei werden die Regeln zur Berechnung der Zeitlücken aus Kapitel 4.7.2 verwendet. Ausserdem wird für die Überquerungszeit die Geschwindigkeit des Fussgängers aus den Parametern MVFG und MVFGA (vgl. Kap. 4.6) mittels einer Normalverteilung berechnet.

Da das erzeugte Fussgängerobjekt auch die Darstellung in der Simulation übernimmt, wird zufällig die Position des Fussgängers bestimmt:

- Start am Rand der Ein- oder Ausfahrt
- Position 1 bis 10 der Längsachse

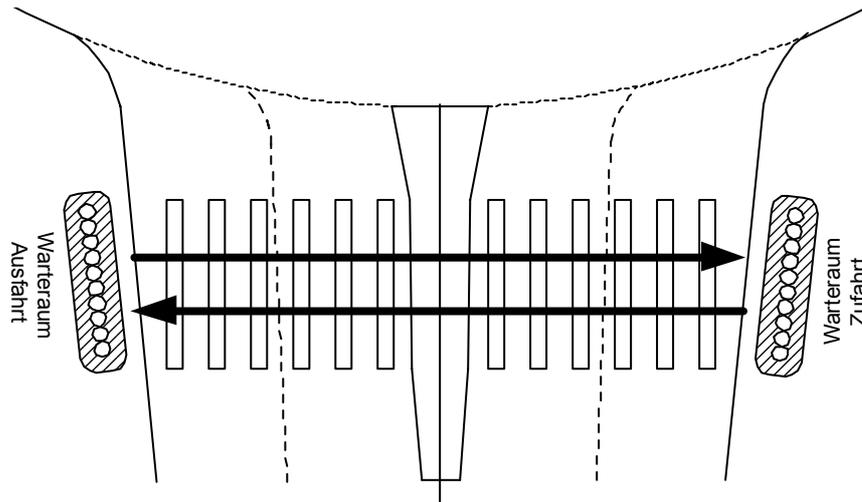


Abbildung 62: Startpositionen der Fussgänger

Die Referenz jedes Fussgängers wird an das Fussgängerstreifenobjekt übergeben und dort in einer Liste gespeichert, damit dieses jederzeit den aktuell gültigen Zustand ermitteln kann.

7.2 Steuerung der Fussgänger

Nach dem Erzeugen eines Fussgängerobjektes durch den Prozess FG_Erzeugen befindet sich das Objekt zuerst im Warteraum. Dort werden folgende Konstellationen überprüft:

Überprüfen des Fussgängerstreifens:

Ist der Fussgängerstreifen bereits durch einen querenden Fussgänger besetzt, kann der neue Fussgänger ohne weitere Prüfung die Fahrbahn überqueren.

Überprüfung der Ein- und Ausfahrt:

Die Methode zur Überprüfung der Ein- und Ausfahrt auf Fahrzeuge, betrachtet die Fahrzeuglisten der beiden Objekte und überprüft, ob nicht anhaltende Fahrzeuge genügend nahe am Fussgängerstreifen sind. Wenn dies der Fall ist, kann der Fussgänger nicht loslaufen, und der FGS bleibt im Zustand warten.

Durch die Berechnung der Zeitlücke⁷⁹ zum vordersten Fahrzeug in der Einfahrt, kann der Fussgänger entscheiden, ob ein queren des Fussgängerstreifens gefahrlos möglich ist.

Überquerung der Fahrbahn:

Das Fussgängerobjekt bewegt sich mit der vorgegebenen Geschwindigkeit in Richtung des Fahrbahnrandes. Dabei bewegt sich jeder Fussgänger vom Startpunkt⁸⁰ auf seiner beim Erzeugen festgelegten Achse bis zum anderen Fahrbahnrand.

Während des Überquerens der Fahrbahn wird ständig überprüft⁸¹, ob ein Fussgängerobjekt den Fahrbahnrand erreicht hat.

Überprüfen des Standortes des Fussgängers:

Hat der Fussgänger den Rand der Fahrbahn des Zubringers erreicht, wird das Fussgängerobjekt gelöscht. Falls keine weiteren Fussgängerobjekte in der Fussgängerliste vorhanden sind, wird der Steuerungsprozess angehalten.

⁷⁹ Vgl. Details im Anhang A 2.4.3.

⁸⁰ Vgl. Details im Anhang A 2.4.4.

⁸¹ Vgl. Details im Anhang A 2.4.5.

8 Simulation des Verkehrsablaufes in Kreiseln

8.1 Simulation

Mit dem Start einer Simulation wird für die definierten Parameter der Geometrie und der Fahrzeuge (sowie Fussgänger, Trams, etc.) der Verkehrsablauf simuliert, um die gewünschten Auswertungsergebnisse zu erhalten.

8.1.1 Simulationsparameter

Simulationsparameter ermöglichen die Steuerung des Simulationslaufes. Es werden Grössen definiert, welche unter anderem die Länge bzw. die Abbruchbedingungen und die Simulationengeschwindigkeit festlegen.

Parameter	Abk.	Beschreibung
Simulationszeit	ts	Zeitdauer in Minuten, die eine Simulation dauert.
Anzahl Simulationen	as	Anzahl Simulationen, die hintereinander ausgeführt werden und in die gleiche Auswertung gelangen.
Simulation bis zur Leistungsgrenze	asi	Es werden Simulationen solange durchgeführt, bis die Leistungsgrenze erreicht ist.
Messintervall	mt	Intervall der Aufzeichnung der Auswertungsdaten
Veränderung der Verkehrsstärke	dvm	Prozentuale Veränderung der Verkehrsstärke
Veränderung der Fussgängerstärke	dfm	Prozentuale Veränderung der Fussgängerstärke
Veränderung nach Anzahl Simulationen	das	Anzahl Simulationen, nach denen die Verkehrsstärke verändert wird.
Minimale Aktualisierungsrate	mAkt	Anzahl Sekunden, die maximal zwischen zwei Aktualisierungen der Fahrzeuge vergehen dürfen.
Zeitraffer Faktor	tf	Faktor für den Zusammenhang zwischen Simulations- und Echtzeit
Protokolleinstellungen	P	Auf Wunsch kann für jedes Fahrzeug ein Protokoll mitgeführt werden. Um bei langen Simulationen nicht unnötig Speicherplatz zu verwenden, kann hier ein Filter für die zu speichernden Einträge gesetzt werden.

Tabelle 45: Simulationsparameter

8.1.2 Ende der Simulation

Eine Simulation ist beendet, wenn die Simulationszeit abgelaufen ist, oder eine Einfahrt keinen Platz mehr für neue Fahrzeuge hat. Wenn die Staulänge die Zubringerlänge überschreitet, können neue Fahrzeuge nicht mehr in das System eintreten, deshalb ist eine weitere Simulation nicht mehr sinnvoll.

Eine volle Einfahrt wird erkannt, wenn zum Zeitpunkt eines neu erzeugten Fahrzeuges, die Einfahrt am Ende eine kleinere Lücke als die Fahrzeuglänge aufweist und das letzte Fahrzeug die Geschwindigkeit 0 hat.

Simulationen können auch mehrfach durchgeführt werden. Dabei werden am Ende einer einzelnen Simulation alle Daten zurückgesetzt und mit dem nächsten Simulationslauf begonnen.

8.1.3 Zeitraffer Simulation

Wenn mehrere lange Simulationen durchgeführt werden sollen, besteht die Möglichkeit den Zeitaufwand zu verkürzen, indem die Simulation schneller durchlaufen wird. Dabei wird die Simulationszeit um den Faktor t_f beschleunigt. Der Zeitrafferfaktor ist durch die Rechenleistung beschränkt, da die minimale Aktualisierungsrate nicht unterschritten werden darf (vgl. Kap. 3.3.4).

8.2 Qualität des Verkehrsablaufes

Ziel der meisten Simulationen ist es, eine Aussage über die Qualität des Verkehrsablaufes für eine bestimmte Kreiselgeometrie und Verkehrsstärke zu erhalten. Damit können Aussagen über die zukünftige Gestaltung und Auslastung von Kreiseln getroffen werden.

8.2.1 Definition von Stau

Um eine Aussage über die Qualität des Verkehrsablaufes machen zu können, muss zuerst festgelegt werden, welche Fahrzeugzustände als Stau bezeichnet werden sollen.

In einer BUWAL Studie von 1995⁸² werden folgende Angaben über die Definition von Stau gemacht.

- Das Fahrzeug überschritt während den letzten 60 Sekunden eine Geschwindigkeit von 20 km/h für maximal 5 Sekunden ohne Unterbrechung, oder
- das Fahrzeug machte während den letzten 60 Sekunden mindestens zwei Halte oder mindestens 4 Mal einen Wechsel von Beschleunigung zur Verzögerung bzw. umgekehrt, oder
- das Fahrzeug ist während den letzten 30 Sekunden langsamer als 10 km/h gefahren.

Damit diese Bedingungen für die Bedürfnisse einer Simulation angepasst werden können, sind sie als Parameter hinterlegt und können einzeln aktiviert werden:

Parameter	Abk.	Beschreibung
Geschwindigkeit im Intervall	vM_{Stau}	Intervallgrösse, maximale Geschwindigkeit und maximale Überschreitungszeit
Staugeschwindigkeit	v_{Stau}	Intervallgrösse, maximale Geschwindigkeit
Wechsel zwischen Beschleunigung und Bremsen	AW_{Stau}	Intervallgrösse, Anzahl Wechsel
Anzahl Halte	AH_{Stau}	Intervallgrösse, Anzahl Halte

Tabelle 46: Parameter zur Definition von Stau

Alle Bedingungen werden immer in Bezug auf ein definiertes Intervall betrachtet.

⁸² Gemäss [BUWAL95], S.82. Diese Definition wird auch in der Lichtsignaltechnik verwendet.

8.2.2 Definition der Qualität des Verkehrsablaufes

Bei Simulationen im Grenzbereich ist es interessant eine Aussage über die Verkehrsstärke zu bekommen, welche gerade noch von dem Kreiseln bewältigt werden kann. Dabei ist es nötig eine Simulation anhand der nachfolgenden Kriterien zu beurteilen.

In Anlehnung an andere Studien⁸³ werden folgende Kriterien zur Bestimmung der Qualität des Verkehrsablaufes gemessen:

- Haltezeiten: Zeit, die ein Fahrzeug im Stillstand verbracht hat.
- Wartezeiten: Die Zeitverluste durch bremsen und anfahren werden zu den Haltezeiten addiert.
- Anzahl der nicht behinderten Fahrten: Anzahl der einfahrenden Fahrzeuge, die maximal einmal anhalten müssen.
- Grösse des Fahrzeugstaus: Periodisch wird die Länge des Rückstaus (gemäss Definition im Kap. 8.2.1) in jedem Fahrstreifen jeder Einfahrt gemessen.

In Anlehnung an die SN 640 022⁸⁴ lässt sich die Beurteilung anhand folgender Einteilung der Werte durchführen:

V-Q. Stufe	Verkehrszustand	Reserve Verkehrsstärke vortrittsbelasteter Ströme [Fz/h]	Mittlere Wartezeit [s]	Rückstau Mittelwert [Fz]	Rückstau 95%-Wert*
A	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr gute Verkehrsqualität • Nur geringe Zeitverluste • Mehrzahl der Fahrzeuge muss nicht warten 	-	< 10	-	-
B	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Verkehrsbedingungen • Geringe Einschränkungen vortrittsbelasteter Ströme mit geringer Wartezeit 	≥ 200	≤ 15	≈< 1-2	-
C	<ul style="list-style-type: none"> • Befriedigende Verkehrsqualität • Spürbare Behinderung mit wachsenden Wartezeiten • Rückstau noch gering 	≈ 100 – 200	≤ 25	≈< 5	Kleiner als gegebene Stauräume
D	<ul style="list-style-type: none"> • Noch ausreichende Verkehrsqualität • Haltevorgänge mit Zeitverlusten bei vortrittsbelasteten Strömen • Wartezeiten, Rückstaus erheblich 	≥ 100	≤ 45	≈> 5 - 10	

⁸³ Vgl. zum Beispiel [SCHNABEL98] S. 182.

⁸⁴ Vgl. [LINDENM01a] S. 48.

V-Q. Stufe	Verkehrszustand	Reserve Verkehrsstärke vortrittsbelasteter Ströme [Fz/h]	Mittlere Wartezeit [s]	Rückstau Mittelwert [Fz]	Rückstau 95%-Wert*
E	<ul style="list-style-type: none"> • Übergang von stabilen zu instabilem Verkehrsfluss • Starkes Ansteigen der Wartezeiten • Rückstau andauernd • Leistungsgrenze erreicht 	0 – 100	45 – 60	≈> 10	Vorhandene Stauräume sind überlastet
F	<ul style="list-style-type: none"> • Überlastung, ungenügende Leistungsfähigkeit • Hohe durchschnittliche Wartezeiten • Lange, stehende Staus • Wartezeiten für alle Verkehrsteilnehmer 	< 0	>> 60	>> 15	

* 99%-Werte bei Sicherheitsmängeln

Tabelle 47: Einteilung zur Beurteilung der Verkehrsqualität nach SN 640 022

8.2.3 Aufbereitung der Daten

Um eine Aussage zur Leistungsfähigkeit des Kreisels machen zu können, werden die Daten einerseits in Klassen eingeteilt zur Darstellung in einer Tabelle und andererseits kumuliert, um sie als Ogive (aufwärts kumulierte Häufigkeitsverteilung) grafisch darzustellen.

In beiden Fällen müssen die Daten zuerst der Grösse nach sortiert werden. Um auch bei einer längeren Simulation grosse Datenmengen verarbeiten zu können, wurde der Quicksort-Algorithmus⁸⁵ verwendet.

8.2.4 Darstellung

Alle erfassten Daten können in folgenden Formen dargestellt werden:

- Tabelle
 - Einzelwerte
 - Klassifizierte Werte
- Grafik
 - Einzelwerte (auf der Zeitachse)
 - Kumulierte Häufigkeiten (Ogive)
 - Streudiagramm (zum Vergleich mehrerer Statistiken)

Alle Daten können einzeln pro Einfahrt und Fahrstreifen oder kumuliert pro Fahrstreifen an verschiedenen Querschnitten (vordefinierte oder frei gewählte Messpunkte) angezeigt werden.

⁸⁵ Weitere Ausführungen in [SEDEWICK95] S. 145ff

Grafik

Für die Darstellung der Daten als Liniengrafik wurde eine eigene Komponente⁸⁶ für Delphi entwickelt, die sämtliche Aufgaben und Funktionen der Grafik übernimmt. Diese wurde nun um die Darstellung als Streuungsdiagramm erweitert.

Für die Darstellung können nun sämtliche gespeicherten Daten der Komponente zugewiesen werden. Diese übernimmt anschliessend die Aufbereitung und Anzeige der Grafiken. Mittels spezieller Funktionen wird auch eine Kopie für die Zwischenablage oder ein Ausdruck erstellt.

Mittels Parametern der Komponente wird festgelegt, ob eine Ogive oder eine zeitliche Folge erscheint. Da alle Daten bereits in der Komponente gespeichert sind, kann zwischen den Darstellungsformen beliebig gewechselt werden.

Aus Sicht der Komponente gibt es keine Begrenzung der Anzahl der Kurven. Um aber die Übersicht zu bewahren, stehen dem Benutzer folgende Filter zur Auswahl:

- Projektnummer
- Simulationsnummer (kumuliert oder einzeln)
- Komponentenummer
- Fahrstreifen (kumuliert oder einzeln)

Folgende Werte sind darstellbar:

- Wartezeiten der Ein- und Ausfahrt
- Staulänge
- Geschwindigkeit und Zeitlücken am Messpunkt
- Wartezeiten der Fussgänger

Zeitliche Folgen und Ogive können nicht gleichzeitig dargestellt werden.

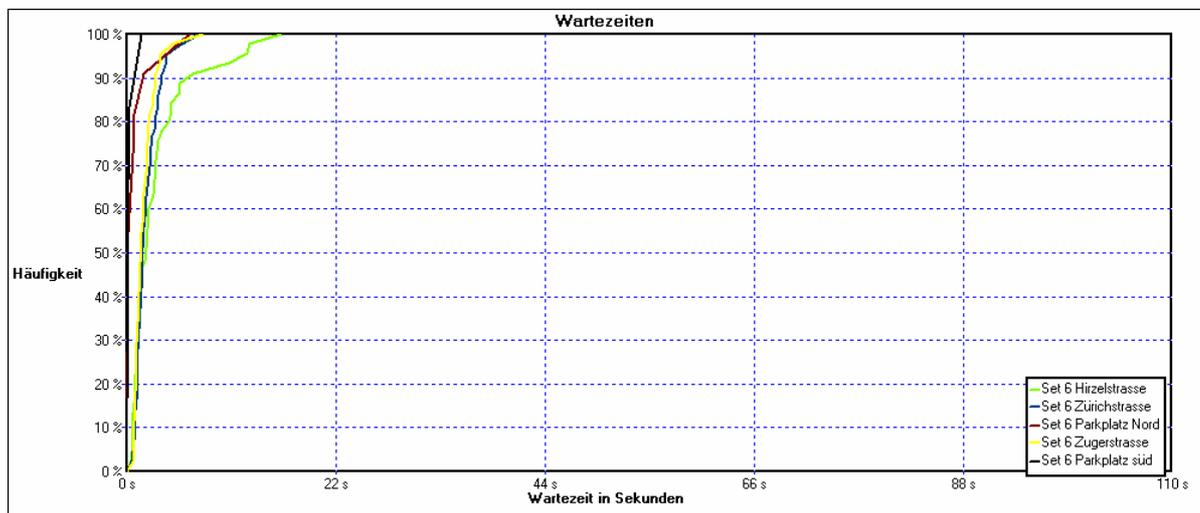


Abbildung 63: Beispiel einer Ogive der Wartezeiten

Tabelle

Auch bei der Tabelle existieren zwei verschiedene Formen der Darstellung. Einerseits kann jeder gemessene Wert einzeln oder andererseits zu Klassen zusammengefasst

⁸⁶ Als Komponente wird ein in sich abgeschlossener Programmteil verstanden, der in verschiedenen Anwendungen eingesetzt werden kann. Vgl. [POEFFEL98] S. 48ff

angezeigt werden. Bei zusammengefassten Klassen werden die Anzahl der gespeicherten Werte zu Häufigkeiten kumuliert. Diese werden aufgrund der sortierten Daten bei jeder Aktualisierung der Tabelle neu errechnet.

Die Art und Menge der Quantilswerte ist bei der Häufigkeitsdarstellung frei wählbar.

Um einen ausgewählten Quantilswert auch an die Tabelle anzufügen, wird nach jeder Auswahl eine Neuberechnung durchgeführt.

	Zugerstr. West	Binzmatt	Zugerstr. Ost	Supermarkt
0 s - 2 s	183	55	119	128
2 s - 4 s	237	46	143	71
4 s - 6 s	110	34	66	37
6 s - 8 s	52	24	32	21
8 s - 10 s	26	17	16	8
10 s - 12 s	10	5	4	7
12 s - 14 s	2	5	5	2
14 s - 16 s	0	2	4	0
16 s - 18 s	0	0	3	0
18 s - 20 s	0	0	0	0
20 s - 22 s	0	0	0	0
22 s - 24 s	0	1	0	0
Total	620	189	392	274
Median	2.89 s	3.68 s	2.84 s	2.17 s
3. Quartil	4.71 s	6.46 s	4.89 s	4.32 s
95 %	8.25 s	11.24 s	9.49 s	8.41 s
99 %	10.35 s	15.27 s	15.07 s	11.73 s

Abbildung 64: Beispiel einer Häufigkeitstabelle der Wartezeiten

Die Daten der Tabellen können ausgedruckt oder in eine Datei (Semikolon als Trennzeichen) exportiert werden. Damit lässt sich die Tabelle in einem Text- oder Tabellenverarbeitungsprogramm einfach importieren und weiterverwenden.

8.3 Leistungsgrenzen

Auswertungen hoch belasteter Kreiseln sind von erhöhtem Interesse, da genau in diesem Bereich die mathematischen und empirischen Lösungsmodelle (vgl. Kap. 3.1) ihre Grenzen haben. Ausserdem werden meistens zu diesem Thema Untersuchungen im Vorfeld eines Bauprojektes durchgeführt. Es gilt die Frage zu beantworten, ob ein Kreiseln für die vorhandene oder zukünftige Verkehrssituation geeignet ist, und welche Form das vorhergesehenen Verkehrsaufkommen am besten bewältigt. Folgende Fragestellungen können somit identifiziert werden:

Fragestellung	Lösungsansatz
Bestimmung der Verkehrsqualität bei einer gegebenen Verkehrsstärke und Kreiselsituation.	Mehrmalige Simulation mit konstanter Verkehrsstärke und konstanter Kreiselgeometrie.
Bestimmung der Leistungsgrenze bei einer gegebenen Kreiselsituation.	Häufige Simulation mit wachsender Verkehrsstärke und konstanter Kreiselgeometrie.
Vergleich der Verkehrsqualität bei gegebener Verkehrsstärke und unterschiedlichen Kreiselsituationen.	Mehrmalige Simulation mit variabler Kreiselgeometrie und konstanter Verkehrsstärke.
Vergleich der Leistungsgrenzen unterschiedlicher Kreiselsituationen.	Häufige Simulation mit wachsender Verkehrsstärke und variabler Kreiselgeometrie.

Tabelle 48: Fragestellungen und Lösungsansätze für die Auswertung von hoch belasteten Kreiseln

Für die Bestimmung der Leistungsgrenze eines Kreisels können bis zu 10 Simulationen mit wachsender Verkehrsstärke durchgeführt werden. Um die Leistungsgrenze grafisch darzustellen, können die verschiedenen Indikatoren (Staulänge, Wartezeiten, etc.) in Abhängigkeit der Verkehrsstärke als Streuungsdiagramm⁸⁷ dargestellt werden.

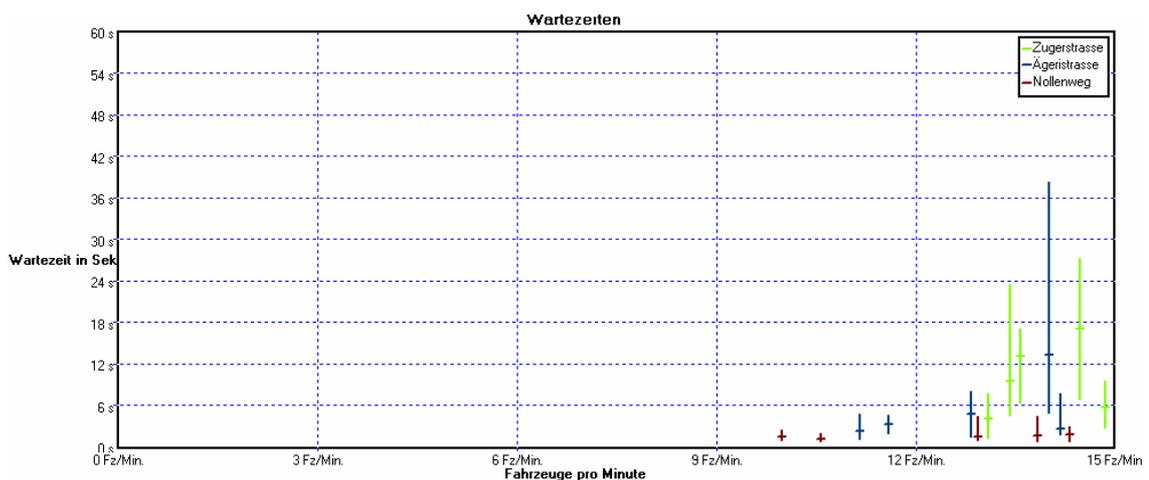


Abbildung 65: Beispiel eines Streuungsdiagramms der Wartezeiten

8.3.1 Simulation mit konstanter Verkehrsstärke und konstanter Kreiselgeometrie

Bei einer Simulation mit festen Verkehrsstärken und Kreiselgeometrie geht es darum, die Verkehrsqualität dieser Konstellation zu bestimmen. Um systematische Fehler zu minimieren, empfiehlt es sich, nicht nur eine Simulation durchzuführen. Mehrere Simulationen werden über den Parameter 'as' definiert. Sämtliche Simulationsergebnisse werden in der gleichen Auswertung dargestellt und können dadurch analysiert werden.

8.3.2 Simulation mit wachsender Verkehrsstärke und konstanter Kreiselgeometrie

Um die Leistungsgrenze eines Kreisels zu bestimmen, werden Simulationen mit ansteigenden Verkehrsstärken durchgeführt. Dabei definieren die Parameter (vgl. Kap.

⁸⁷ Unter einem Streuungsdiagramm versteht man in diesem Fall die Darstellung des Mittelwertes plus zweier frei wählbarer Quantilwerte.

8.1.1) 'dvm' und 'das' den Zuwachs der Verkehrsstärke. Die Simulation wird dabei 'as' Male ausgeführt und nach der vorgegeben Simulationszahl 'das' wird die Verkehrsstärke um 'dvm' Prozent erhöht. Für die Fussgängermengen bestimmt der Parameter 'dfm' den Zuwachs.

Wenn der Parameter 'asi' gesetzt ist, wird solange simuliert bis eine frei wählbare Leistungsgrenze (Abbruchkriterien) erfüllt ist (z.B. bis der Kreisel überlastet ist).

Als Abbruchkriterien gelten eine oder mehrere der folgenden Bedingungen:

- Mittlere Staulänge und Quantilswert überschreiten bestimmten Wert
- Mittlere Wartezeit und Quantilswert überschreiten bestimmten Wert

Die Abbruchkriterien können einzeln oder in Kombination definiert werden.

Aus der Kombination der maximalen Verkehrsstärke, den Staulängen und den Wartezeiten lässt sich die Leistungsgrenze des Kreisels herleiten.

8.3.3 Simulation mit variabler Kreiselgeometrie und konstanter Verkehrsstärke

Ein Anlegen verschiedener Kreiselprojekte ermöglicht es einen Vergleich zwischen Kreiseln mit unterschiedlicher Geometrie zu machen. Ein anschliessender Vergleich der Ergebnisse ist allerdings nur möglich, wenn immer dieselbe Anzahl Einfahrten definiert wurde.

Nach der Simulation können in der Auswertung die Ergebnisse der Projekte miteinander verglichen werden. Dazu werden die Daten des anderen Projekts zu der aktuellen Statistik hinzu geladen und sind dadurch gleich wie projektinterne Daten analysier- und vergleichbar.

8.3.4 Simulation mit wachsender Verkehrsstärke und variabler Kreiselgeometrie

Eine Kombination aus den Methoden der vorangegangenen Kapitel ermöglicht Vergleiche mit unterschiedlichen Geometrien und steigender Verkehrsstärke.

Nach der Simulation der Projekte können in der Auswertung die Ergebnisse verglichen werden. Aus der Kombination der maximalen Verkehrsstärke, den Staulängen und den Wartezeiten lassen sich die Grenzwerte für die Kreiselgeometrien bestimmen.

9 Darstellung des Verkehrsystems Kreisel

Das Verkehrssystem Kreisel lässt sich in der vorliegenden Modellierung auf drei Arten darstellen:

- Abstrakte Skizze: Geometrie und Fahrzeuge werden in der Simulationsumgebung gezeichnet.
- Projektplan: Die Geometrie wird mittels eines gescannten Projektplanes dargestellt. Fahrzeuge werden darauf gezeichnet.
- Luftaufnahme: Geometrie und Fahrzeuge werden mittels gescannten Orthophotos dargestellt.

Um die Darstellung des Kreisels zweckmässig darzustellen, können für jede Darstellungsart folgende Grössen definiert werden:

Parameter	Abk.	Beschreibung
Mittelpunkt	M	Kreiselmittelpunkt X- und Y-Koordinate
Zentriert	zen	Kreiselmittelpunkt liegt in der Mitte des Bildschirms
Skalierung	Z	X- und Y-Skalierungsfaktor in %
Proportional	prop	X- und Y-Skalierung sind immer gleich gross
Lage des ersten Zubringers	L	Winkel des ersten Zubringers

Tabelle 49: Grössen zur Darstellung des Kreisels

9.1 Darstellung als abstrakte Skizze

Jedes sichtbare Geometrieobjekt verwendet für seine Darstellung zwei Methoden `.draw` und `.refresh`, welche die notwendigen grafischen Elemente im Anwendungsfenster zeichnen.

Der Kreisel selbst setzt sich aus den Komponenten Zubringer, Kreisel und Tramlinie zusammen. Diese sind wiederum in viele Unterklassen unterteilt. Um die Darstellung einheitlich und homogen zu machen, zeichnet sich nicht jedes Objekt selber, übergeordnete Komponente (z.B. Kreisel) übernehmen diese Funktionen.

9.1.1 Kreisel

Beim Definieren der Geometrie des Kreisels werden die notwendigen Parameter und Werte abgeleitet und berechnet. Wobei nachfolgende Grössen zur Darstellung des Kreisels berechnet⁸⁸ werden.

⁸⁸ Eine ausführliche Beschreibung der Herleitung befindet sich im Anhang A 2.1.1.

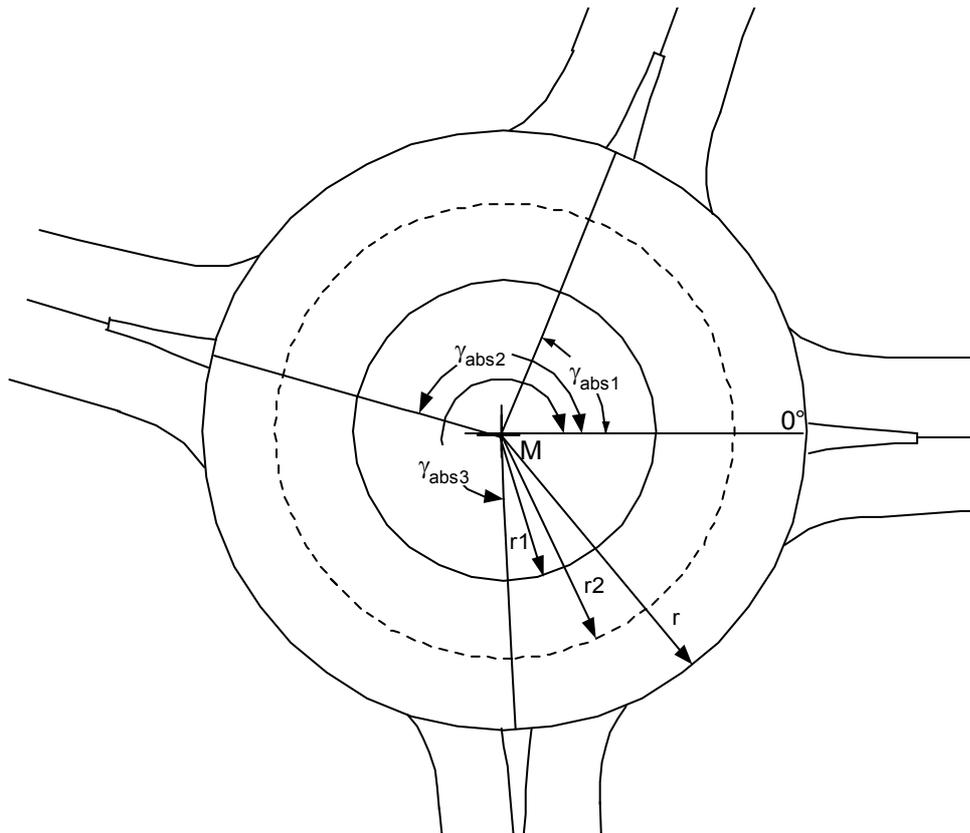


Abbildung 66: Parameter der Kreisfahrbahn

Wobei:	M:	Mittelpunkt
	$\gamma_{abs\ n}$:	n-ter Zubringerwinkel absolut
	r_n :	Radius des n-ten Fahrstreifens
	r:	Radius Aussenrand

Um einen Kreisell realitätsgetreu im Ausgabefenster darzustellen, werden folgende grafischen Elemente gezeichnet:

Mittelsinsel: durchgezogene Linie
 Mittelpunkt: (M.x/M.y) Radius: r1

1. bis n-1. Fahrstreifen (n = Nummer des Fahrstreifens): gestrichelte Linie
 Mittelpunkt: (M.x/M.y) Radius: rn

Aussenrand: durchgezogene Linie

1. – n. Zubringer (m = Nummer des Zubringers): durchgezogene Linie:
 Mittelpunkt: (M.x/M.y) Radius: r von Punkt: Zkm bis Punkt: Akm+1

1. – n. Zubringer (m = Nummer des Zubringers): gestrichelte Linie:
 Mittelpunkt: (M.x/M.y) Radius: r von Punkt: Akm bis Punkt: Ik1,m
 Mittelpunkt: (M.x/M.y) Radius: r von Punkt: Ik2,m bis Punkt: Zkm
 wobei Ak, Ik1, Ik2, Zk Punkte des Zubringers sind.

9.1.2 Zubringer

Auch bei den Zubringern werden die darstellungsrelevanten Geometriedaten auf einer Ebene höher als der Ein- und Ausfahrt berechnet bzw. verwaltet. Hier übernimmt diese Aufgabe die Komponente Zubringer. Wenn eine Mittelsinsel vorhanden ist, weitet sich

die Strasse vor dem Anstoss an den Kreisell auf. Wobei nachfolgende Grössen zur Darstellung des Zubringers berechnet⁸⁹ werden.

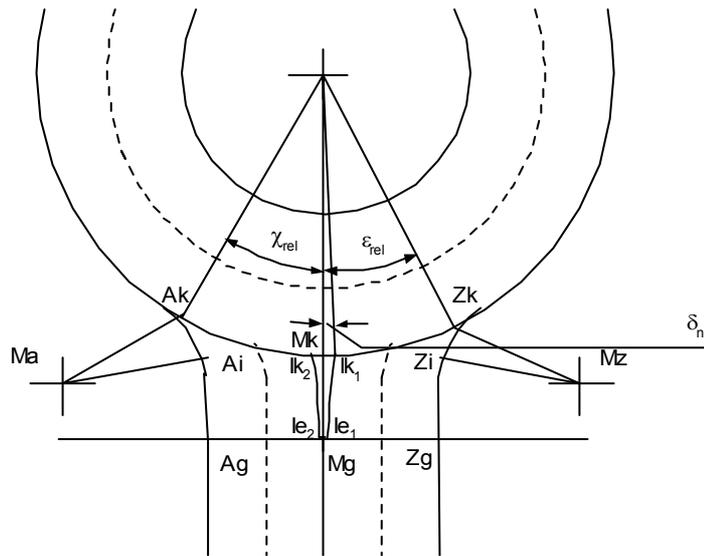


Abbildung 67: Berechnete Punkte und Winkel im Zubringer

- Wobei:
- Mk: Schnittpunkt der Zubringermitte mit dem Kreisell
 - Mg: Schnittpunkt der Zubringermitte mit dem Ende der Insel
 - Ik_{1,2}: Schnittpunkte Inselaussenseite mit Kreisell
 - le_{1,2}: Endpunkte der Insel
 - Zg: Endpunkt der Aussenseite der Einfahrt vor der Inselaufweitung
 - Zi: Endpunkt der Aussenseite der Einfahrt vor dem Einfahrtsbogen
 - Zk: Schnittpunkt der Aussenseite der Einfahrt mit dem Kreisell
 - Mz: Mittelpunkt des Einfahrtsbogens
 - Ag: Endpunkt der Aussenseite der Ausfahrt vor der Inselaufweitung
 - Ai: Endpunkt der Aussenseite der Ausfahrt vor dem Ausfahrtsbogen
 - Ak: Schnittpunkt der Aussenseite der Ausfahrt mit dem Kreisell
 - Ma: Mittelpunkt des Ausfahrtbogens

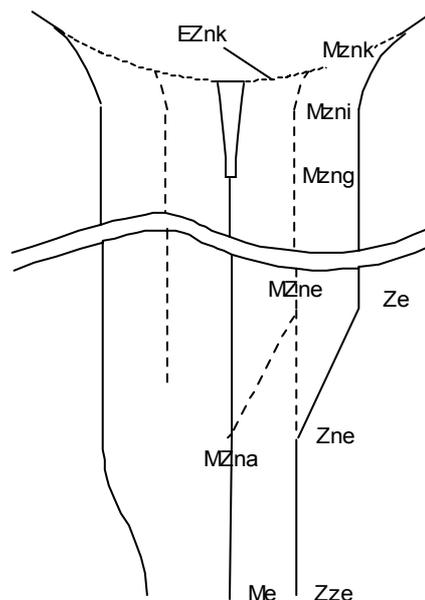


Abbildung 68: Berechnete Punkte am Ende des Zubringers

⁸⁹ Eine ausführliche Beschreibung der Herleitung befindet sich im Anhang A 2.1.2.

Wobei:	Me:	Beginn der Zubringermittelpunkte bei der Quelle
	Ze:	Beginn der Aussenseite der Einfahrt (kürzester Fahrstreifen)
	MZng:	Endpunkt der n-ten Fahrstreifentrennlinie der Einfahrt vor der Inselaufweitung (wobei n maximal FZ1 -1 sein kann)
	MZni:	Endpunkt der n-ten Fahrstreifentrennlinie der Einfahrt vor dem Einfahrtsbogen (wobei n maximal FZ1 -1 sein kann)
	MZnk:	Schnittpunkt der n-ten Fahrstreifentrennlinie der Einfahrt mit dem Kreisell
	EZnk:	Einfahrtspunkt des n-ten Fahrstreifens in den Kreisell
	MZne:	Endpunkt der n-ten Fahrstreifentrennlinie der Einfahrt
	Zne:	Punkt der n-ten Aufgabelung der Einfahrt
	Zze:	Endpunkt der längsten Einfahrt
	MZna:	n-ter Aufspaltungspunkt der Fahrstreifen der Einfahrt

Die Punkte der Ausfahrt werden analog ermittelt.

Zur Darstellung werden folgende grafischen Elemente gezeichnet:

Mittelinsel: durchgezogene Linie:

Verbinden folgender Punkte: Ik1, Ik2, le2, le1

Mittellinie: durchgezogene Linie:

Verbinden folgender Punkte: Mg, Me

Aussenlinie: durchgezogene Linie:

Verbinden folgender Punkte: Zze, Z1e, ..., Zne, Ze, Zg, Zi

Bogen: Mittelpunkt: Mz Radius: rz von Punkt: Zi nach Punkt: Zk

Fahrstreifentrennlinien: gestrichelte Linie:

Verbinden folgender Punkte: (MZna oder Zne), MZne, MZng, MZni

Bogen: Mittelpunkt: Mz Radius: rz+Summe(bzn..bzm)
von Punkt: MZni nach Punkt: MZnk

Die grafischen Elemente der Ausfahrt sind analog abgebildet.

Fahrpunkte

Für jeden Fahrstreifen werden genau in der Mitte jeweils Fahrpunkte berechnet, welchen die Fahrzeuge folgen. Alle Punkte werden analog der äusseren Begrenzungslinien der Fahrstreifen ermittelt.

9.1.3 Fussgängerstreifen

Der Fussgängerstreifen wird aus einer Aneinanderreihung von Rechtecken gezeichnet, wobei folgende Grössen berechnet⁹⁰ werden:

⁹⁰ Eine ausführliche Beschreibung der Herleitung befindet sich im Anhang A 2.1.3.

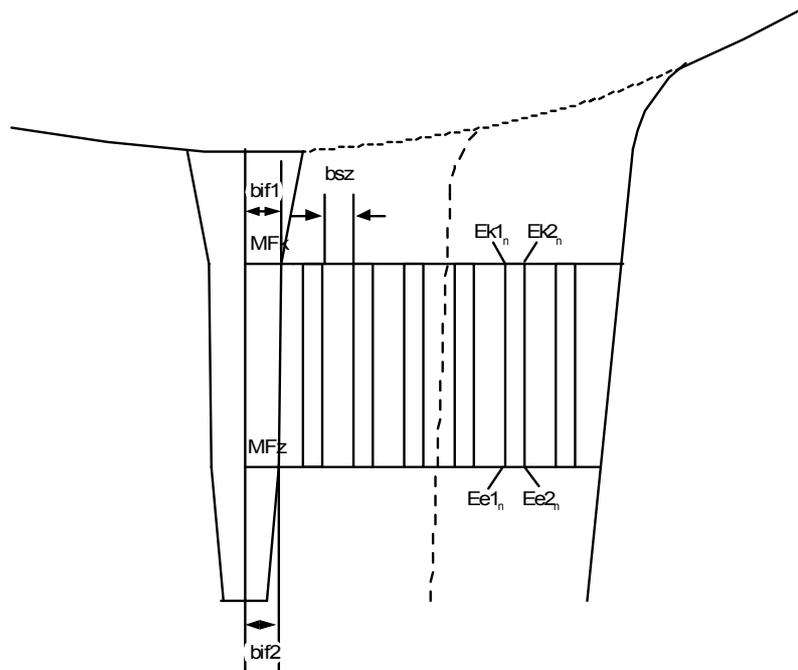


Abbildung 69: Berechnete Punkte beim Fussgängerstreifen

Wobei:	MFk:	Kreiselseitiger Startpunkt des FGS an der Mittelachse des Zubringers
	MFz:	Zubringerseitiger Endpunkt des FGS an der Mittelachse des Zubringers
	bif1:	Breite der Insel bei Anfang des Fussgängerstreifens
	bif2:	Breite der Insel am Ende des Fussgängerstreifens
	bsz:	Breite eines Streifens in der Einfahrt
	Ee1 _n , Ee2 _n :	Eckpunkte eines Streifens auf Seite des Zubringers
	Ek1 _n , Ek2 _n :	Eckpunkte eines Streifens auf Seite des Kreisels

Folgende grafischen Elemente werden gezeichnet:

Zn*3 Rechtecke mit den Eckpunkten Ee1_n, Ee2_n, Ek1_n, Ek2_n

Der Streifen der Ausfahrt ist analog.

9.1.4 Busspur

Die Busspur liegt neben dem äussersten Fahrstreifen und darf nur von einem Linienbus benutzt werden. Dabei wird für die Darstellung der Busspur von einem normalen Fahrstreifen ausgegangen. Das heisst bei einer zweistreifigen Einfahrt mit Busspur wird ein weiterer Fahrstreifen mit der Breite bb und der Länge lb als Busspur dargestellt.

Die Busspur wird mit einer abweichenden Farbe dargestellt und verzweigt beim Abstand lb aus dem äussersten Fahrstreifen.

Folgende Grössen werden berechnet⁹¹:

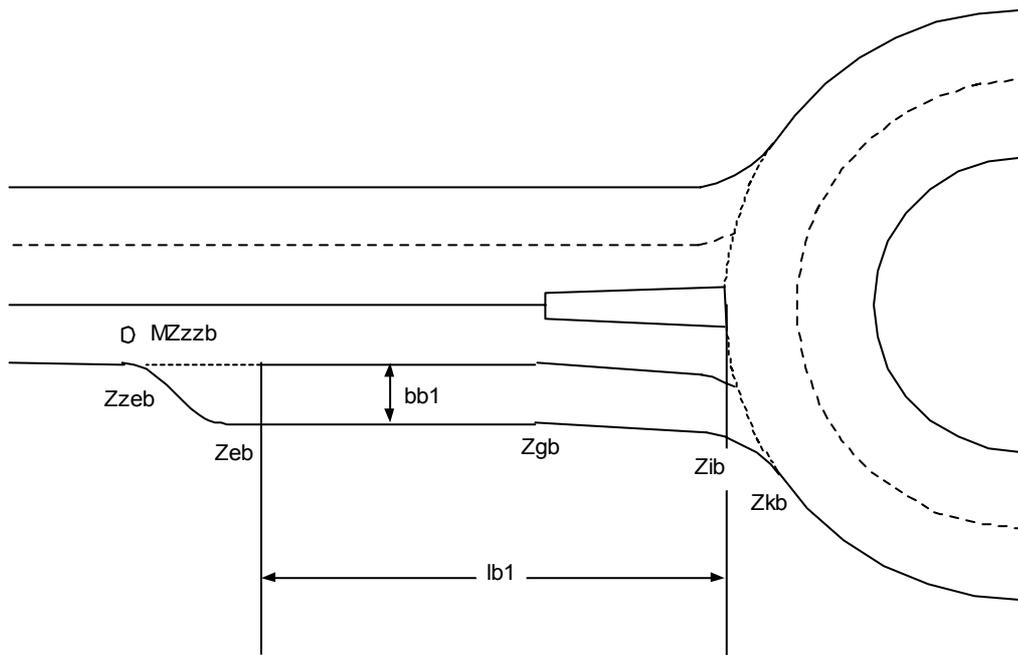


Abbildung 70: Berechnete Punkte der Busspur

Wobei: Zgb, Zib, Zkb, Zeb, Zneb, Zzeb: Äussere Begrenzungspunkte der Busspur
MZzzb: Einfahrtspunkt in die Busspur

Fahrpunkte

Die Fahrpunkte der Busspur werden analog der Punkte der Einfahrt ermittelt. Falls die Busspur nicht am Beginn der Einfahrt startet, werden für den Fahrweg des Busses zuerst die Fahrpunkte der Einfahrt verwendet bis der Einfahrtspunkt in die Busspur erreicht ist.

9.1.5 Tramlinie

Eine Tramdurchfahrt kann in einer beliebigen Art eine oder mehrere Einfahrten oder den Kreisell kreuzen. Deshalb ist es nicht sinnvoll feste Parameter für den Weg des Trams vorzugeben. Es wird vielmehr eine Reihe von Koordinaten gespeichert, die den Weg des Trams vorgeben.

Für die Simulation sind nur die Schnittpunkte mit der Fahrbahn, bzw. die Haltepunkte der Fahrstreifen relevant. Der restliche Weg des Trams hat keinen Einfluss auf das Fahrverhalten der Fahrzeuge.

Für die Darstellung der Tramlinie werden jeweils pro benutzerdefinierten Punkt, der linke und rechte Punkt der Schienen berechnet. Zusätzlich um die Darstellung zu verbessern, wird ein Bogen an der Verbindung von zwei Schienenstücken gezeichnet.

⁹¹ Eine ausführliche Beschreibung der Herleitung befindet sich im Anhang A 2.1.4.

Folgende Grössen werden berechnet⁹²:

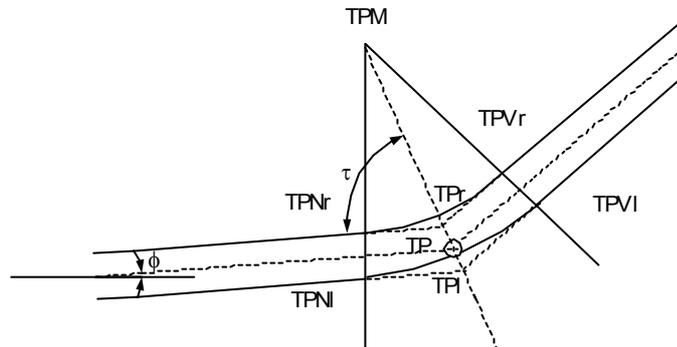


Abbildung 71: Berechnet Punkte der Tramlinie

- Wobei:
- TP_n: Endpunkt der Tramschiene
 - TPM_n: Mittelpunkt des Kreisbogens
 - TP_{Pr}, TP_{In}: Projizierte Verbindungspunkte der Tramschienen
 - TPVI_n, TPVr_n, TPNI_n, TPNr_n: Anschlusspunkte gerade Schienen am Bogen
 - τ: Halber Winkel zwischen den Tramschienen
 - φ_n: Winkel der Tramschienen

9.2 Darstellung als Projektplan

Ist ein Projektplan (mittels Scanner) eingelesen worden, kann dieser bei der Simulation des Verkehrsablaufes als Hintergrund verwendet werden. Dafür müssen die Geometrieobjekte aber entsprechend kalibriert werden, d.h. Grösse und Ausrichtung muss angepasst werden.

Wenn sämtliche geometrische Grössen des Kreisells erfasst sind, werden der Projektplan und die abstrakte Skizze überlagernd auf dem Kalibrierungsbild dargestellt.

Dafür werden folgende Grössen eingestellt:

Parameter	Abk.	Beschreibung
Dateiname		Name der Datei für das Hintergrundbild
Mittelpunkt	HM	Kreiselmittelpunkt X- und Y-Koordinate
Zentriert		Kreiselmittelpunkt liegt in der Mitte des Bildschirms
Skalierung	HZ	X- und Y-Skalierungsfaktor in %
Proportional		X- und Y-Skalierung sind immer gleich gross
An Fenster anpassen		Bild wird genau auf Fenstergrösse skaliert

Tabelle 50: Grössen zur Darstellung des Hintergrundbildes zum Kreisell

⁹² Eine ausführliche Beschreibung der Herleitung befindet sich im Anhang A 2.1.5.

Die Skizze der Kreisellgeometrie kann mittels der Maus an das Hintergrundbild angepasst werden (vgl. Kap. 5.5). Dabei sind folgende Manipulationen der Anzeigegrößen möglich:

- Verschiebung der Koordinaten des Kreisellmittelpunktes (in X- und Y-Richtung)
- Änderung des Aussendurchmessers des Kreisells
- Änderung der Skalierung (Größenanpassungen)
- Änderung des Winkels zwischen den Zubringern (Richtung der Zubringer)
- Drehung des Kreisells (Lage der Zubringer)
- Veränderung des Zubringerwinkels

9.3 Darstellung als Luftaufnahme

Analog zur Projektdarstellung kann eine Luftaufnahme als Hintergrundbild verwendet werden. Die Geometrieobjekte können ebenfalls entsprechend angepasst werden.

9.4 Darstellung der Simulationsobjekte

Die Simulation kennt mehrere Darstellungsformen. Es wird entweder auf einer abstrakten Skizze, auf einem eingelesebenen Projektplan (mittels Scanner) oder auf einer Luftaufnahme der Situation simuliert. Entsprechend werden auch die Objekte anders dargestellt.

Bei einer stark zeitgerafften Simulation ist keine Darstellung sinnvoll, deshalb wird hier die Simulation im Hintergrund durchgeführt. Eine Fortschrittsanzeige informiert über den Zustand der Simulation.

9.4.1 Darstellung der Fahrzeuge (inkl. Bus und Tram)

Aufgrund der Masse aus den Fahrzeugparametern werden die Fahrzeuge wie folgt dargestellt:

Darstellungsform Geometrie	Fahrzeug
abstrakte Skizze	Rechteck
eingeleseener Projektplan	Rechteck
Luftaufnahme	Fahrzeugfoto

Tabelle 51: Darstellungsformen der Fahrzeuge

Die Fahrzeuge haben aufgrund ihres Fahrzieles verschiedene Farben.

Bus und Tram werden analog den Fahrzeugen allerdings in einer anderen Farbe dargestellt.

9.4.2 Darstellung der Fussgänger

Fussgänger werden wie folgt dargestellt:

Darstellungsform Geometrie	Fussgänger
abstrakte Skizze	Kreis (\emptyset 0.4m)
eingeleseener Projektplan	Kreis (\emptyset 0.4m)
Luftaufnahme	Foto

Tabelle 52: Darstellungsformen der Fussgänger

10 Beurteilung des Modelleinsatzes und der Simulationsergebnisse anhand von Beispielen

Durch die Simulation der folgenden Beispiele soll eine Beurteilung des Lösungsansatzes und des erstellten Simulationsprogramms vorgenommen werden. Dabei wird versucht jeweils die Leistungsgrenze des entsprechenden Kreisels zu evaluieren.

Folgende Kreisels wurden ausgewählt:

- Kreisels Allmend, 6000 Luzern: 3 Zubringer einstreifig, einstreifiger Kreisels
- Kreisels Mattenhof, 6000 Luzern: 5 Zubringer, 3 zweistreifig, einstreifiger Kreisels
- Kreisels Sihlbrugg, 6340 Sihlbrugg: 5 Zubringer, 3 zweistreifig, zweistreifiger Kreisels

Für jeden Kreisels wurden mehrere Simulationen mit unterschiedlichen Verkehrsmengen und Fahrstreifenanordnungen durchgeführt.

10.1 Kreisels Allmend

Bei diesem Kreisels handelt es sich um einen einstreifigen Knotens mit drei Zubringern.

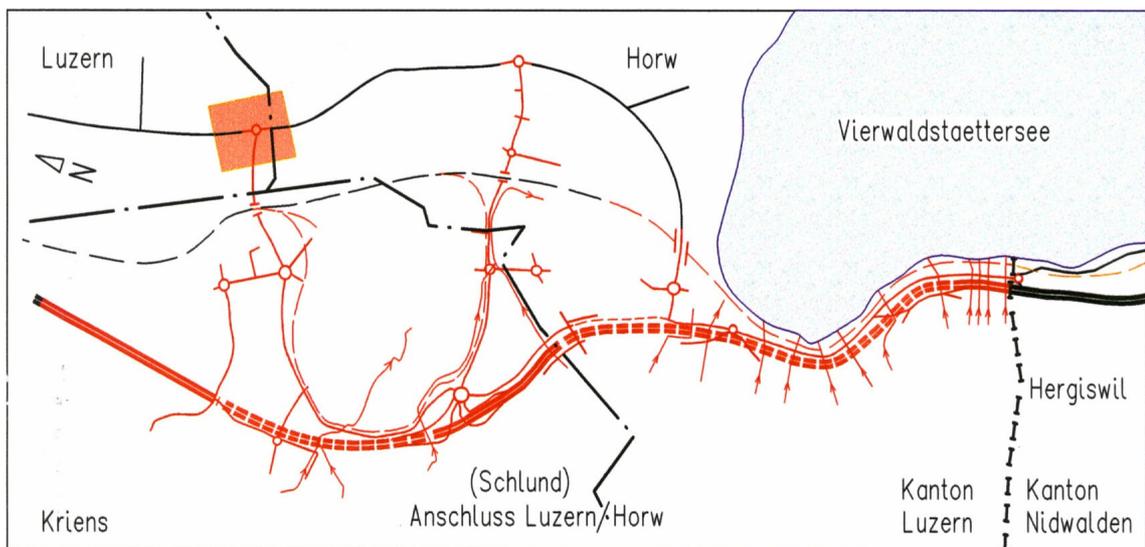


Abbildung 72: Übersicht Verkehrssituation Kreisels Allmend

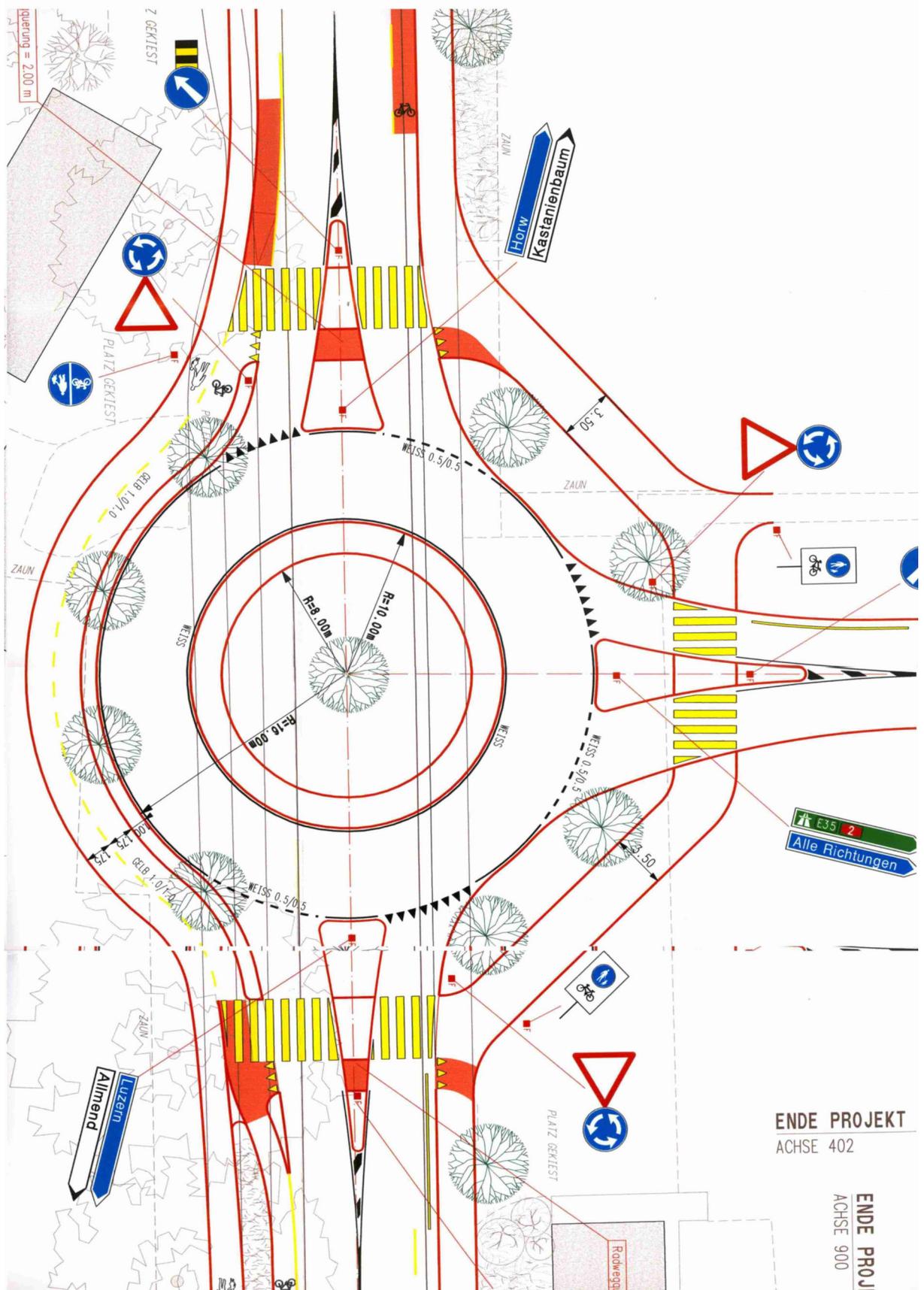


Abbildung 73: Detailplan Kreisell Allmend

10.1.1 Simulationen

Anhand dieses Kreisels sollen folgende Aufgabenstellungen mittels Simulation gelöst werden:

- Ermittlung der Leistungsgrenze
- Verbesserungspotenzial bei zweistreifigen Einfahrten
- Verbesserungspotenzial bei zweistreifigen Einfahrten und Kreisfahrbahn

10.1.2 Ermittlung der Leistungsgrenze

Um die Leistungsgrenze dieses einstreifigen Kreisels zu ermitteln, wurde eine ungefähr gleichmässig verteilte Menge an Fahrzeugen und Fussgänger angenommen, die nach jeder Simulation erhöht wird.

	Horwerstrasse	Zubringer Nord	Kantonsstrasse	Total
Horwerstrasse	0	250	250	500
Zubringer Nord	300	0	250	550
Kantonsstrasse	200	300	0	500
Total	500	550	500	1550
Fussgänger	10	10	10	30
Anteil BU in %	5	5	5	5
Anteil LW in %	7	15	15	12.4
Anteil MR in %	10	10	10	10
Anteil PW in %	78	70	70	72.6
Total	100	100	100	100

Abbildung 74: Initiale Verkehrsstärken für Kreisel Allmend

Bei der initialen Verkehrsstärke ergeben sich folgende Leistungsmerkmale:

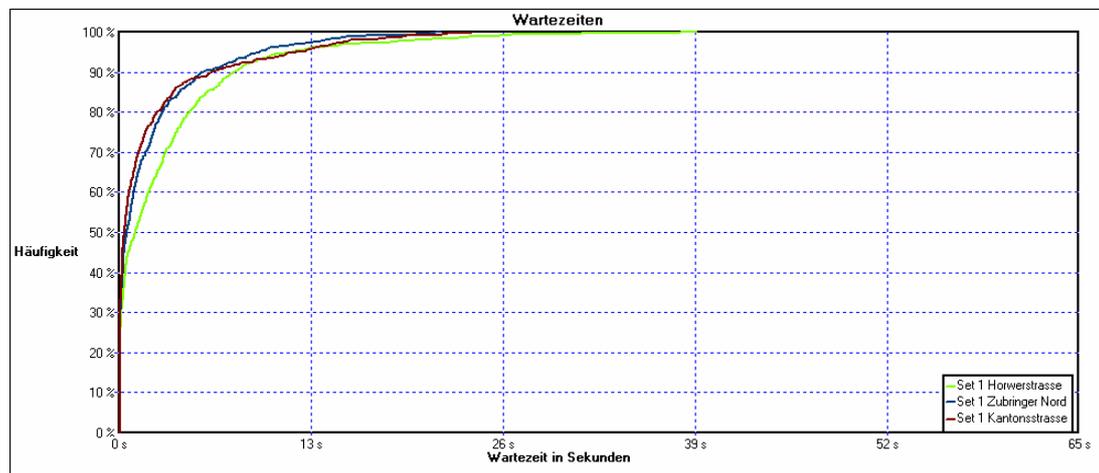


Abbildung 75: Ogive der Wartezeiten bei initialer Verkehrsstärke Kreisel Allmend

10. Beurteilung des Modelleinsatzes und der Simulationsergebnisse anhand von Beispielen

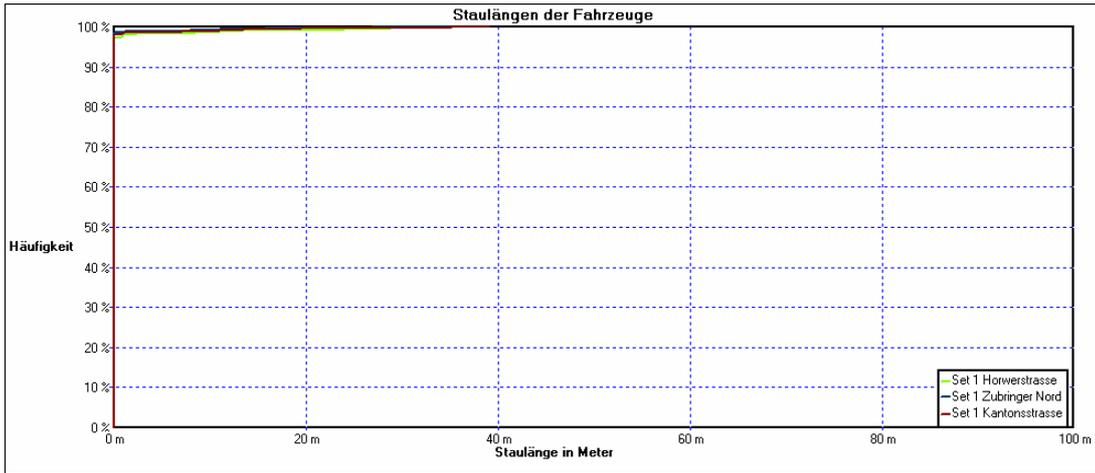


Abbildung 76: Ogive der Staulängen bei initialer Verkehrsstärke Kreisell Allmend

Durch die Erhöhung der Verkehrsstärke steigt die Wartezeit und Staulänge:

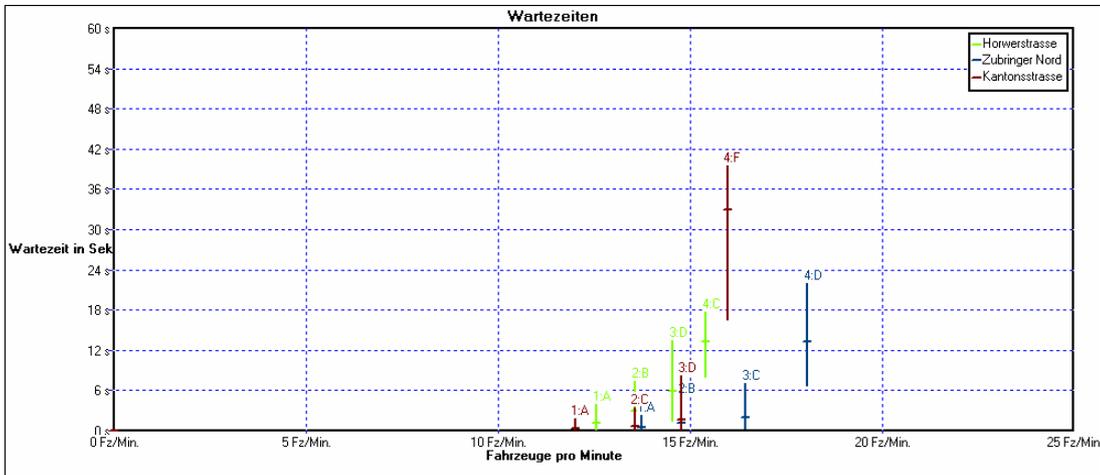


Abbildung 77: Wartezeiten (Mittelwert(MW) und 25% Streuung(St)) der Simulationsreihe Kreisell Allmend

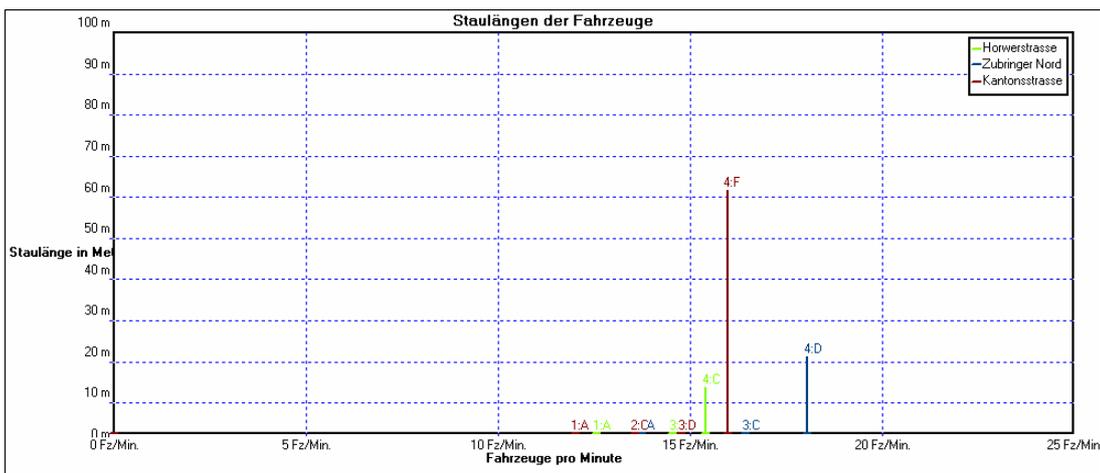


Abbildung 78: Staulängen (MW und 25% St) der Simulationsreihe Kreisell Allmend

Die Zahl über dem Streubalken bezeichnet die Simulationsnummer. Der Buchstabe gibt die Qualitätsklasse des Verkehrsflusses gemäss Kap. 8.2.2 an.

Eine weitere Erhöhung der Fahrzeugmenge ergab nur auf der Horwerstrasse einen erhöhten Durchsatz an Fahrzeugen. Bei den anderen Einfahrten reduzierte sich die

Durchlassmenge sogar gering, da die aufgestauten Fahrzeuge die Einfahrten nicht genügend schnell in den Kreisel verlassen konnten. Deshalb wurde die Simulation auch wegen einer vollen Einfahrt vorzeitig beendet (nach 12 Minuten).

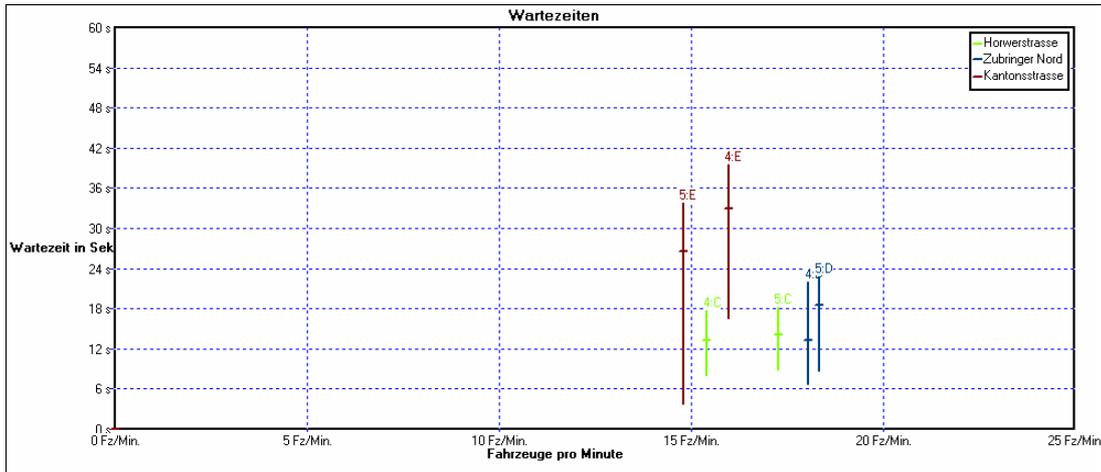


Abbildung 79: Wartezeiten (MW und 25% St) an der Leistungsgrenze Kreisel Allmend

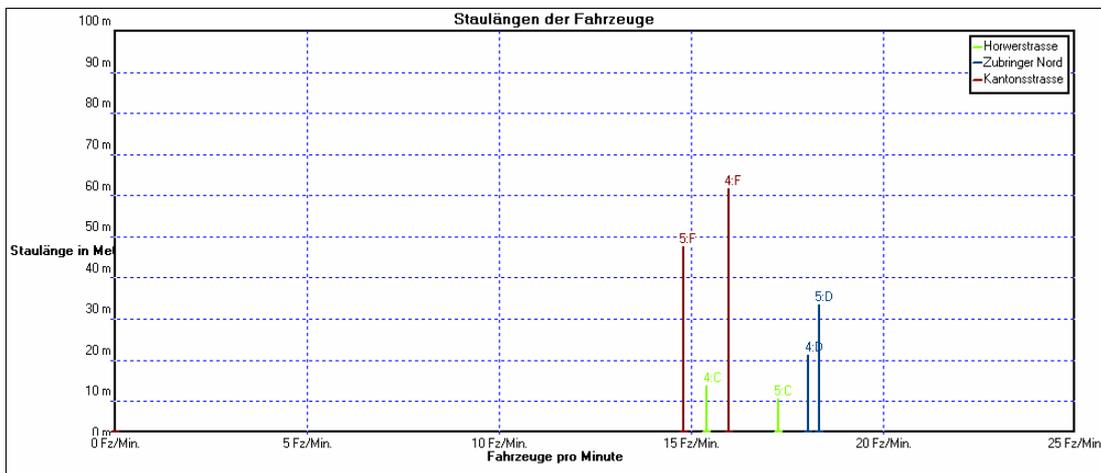


Abbildung 80: Staulängen (MW und 25% St) an der Leistungsgrenze Kreisel Allmend

Es ist ersichtlich, dass zwischen Simulation 4 und 5 die Fahrzeugmenge im Zubringer Kantonsstrasse von 16 Fahrzeugen pro Minute auf unter 15 Fahrzeuge pro Minute zurückgegangen ist.

Somit kann für diese Konstellation von einer Leistungsgrenze von 16 bis 18 Fahrzeugen pro Minute ausgegangen werden.

10.1.3 Leistungspotenzial bei zweistreifigen Einfahrten

Zur Ermittlung des Verbesserungspotenzials wurde mit sonst unveränderten Parametern die Anzahl der Fahrstreifen der Einfahrten verdoppelt. Somit haben in der neuen Konstellation alle Einfahrten zwei Fahrstreifen.

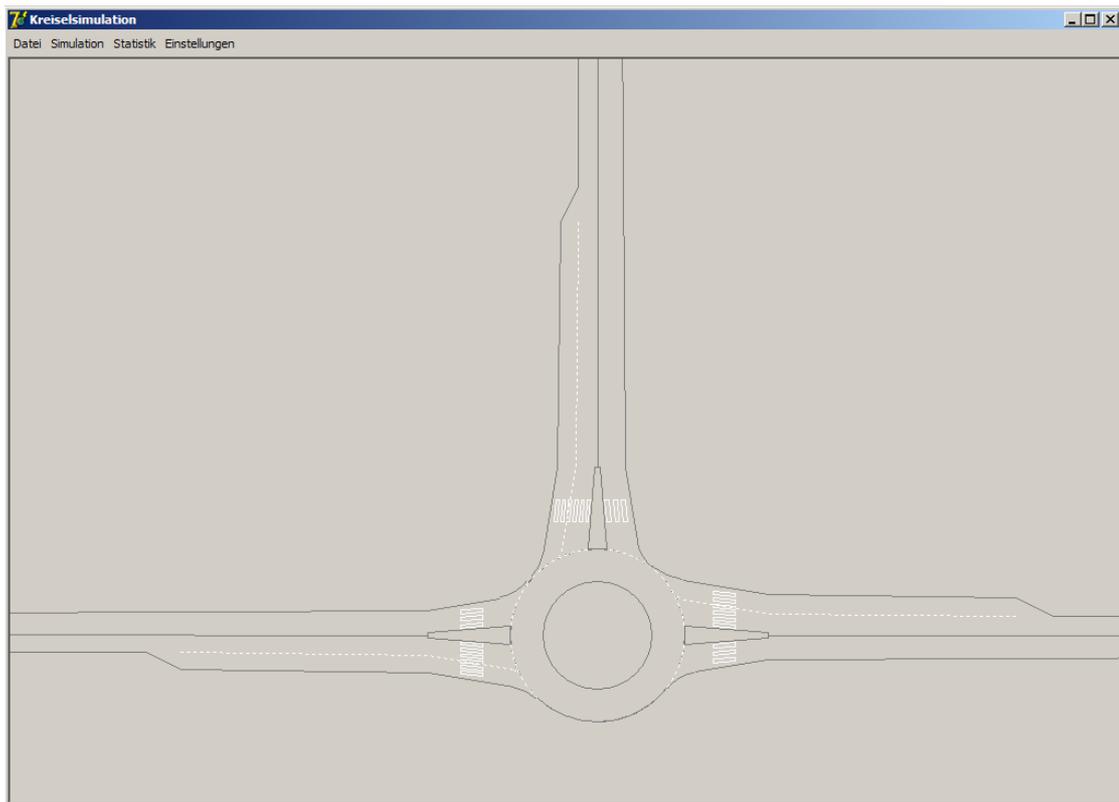


Abbildung 81: Erweiterte Einfahrten Kreisel Allmend

Diese Erweiterung vergrößert die Stauräume der Einfahrten ohne den 'Flaschenhals' Kreisel zu erweitern. Es ist somit davon auszugehen, dass bezüglich der Kapazität keine Verbesserung erzielt werden kann. Zu erwarten ist allerdings aufgrund der Vergrößerung der Warteräume eine Verkürzung der Staulängen.

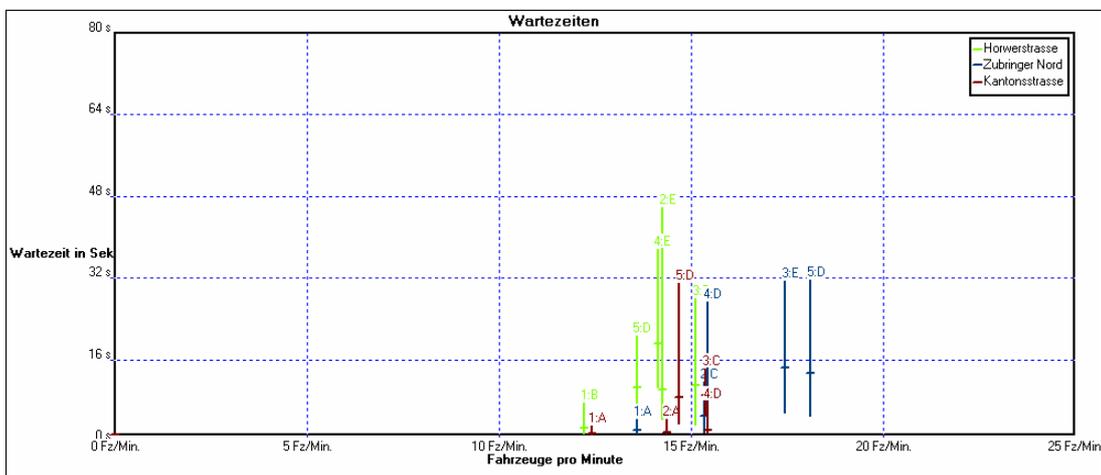


Abbildung 82: Wartezeiten (MW und 25% St) Kreisel Allmend, 2-streifige Einfahrten

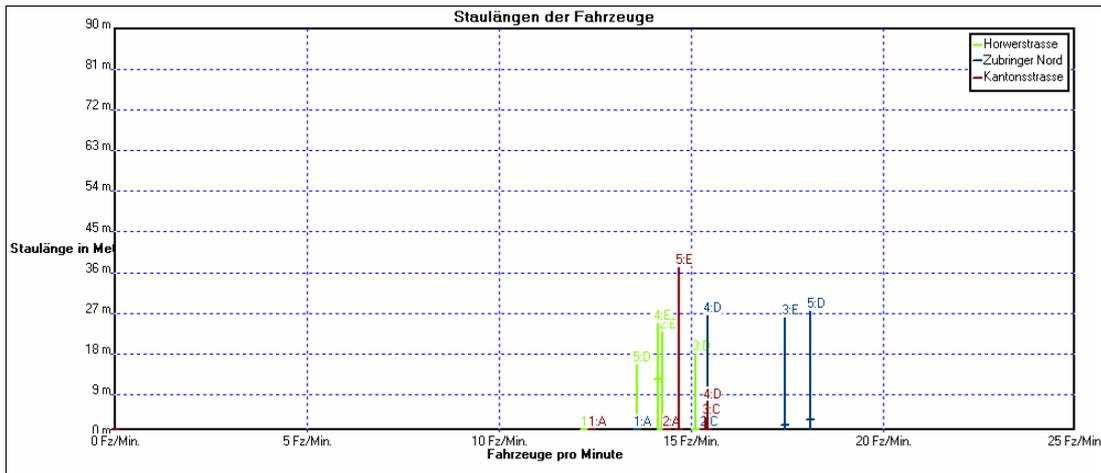


Abbildung 83: Staulängen (MW und 25% St) Kreisel Allmend, 2-streifige Einfahrten

Eine Verbesserung der Durchsatzmenge der Fahrzeuge für die neue Anordnung konnte aufgrund der oben dargestellten Mittel- und Streuwerte keine festgestellt werden. Dies lässt sich aber auch damit begründen, dass der Engpass (der Kreisel) immer noch die gleiche Kapazität aufweist wie bei der Anordnung zuvor.

Die Staulängen für eine gegebene Fahrzeugmenge haben sich dafür generell verkürzt.

10.1.4 Leistungssteigerung bei zweistreifigen Einfahrten und Kreisfahrbahn

Für die folgende Simulationsreihe wurde die Anzahl der Fahrstreifen im Kreisel auf zwei erhöht.

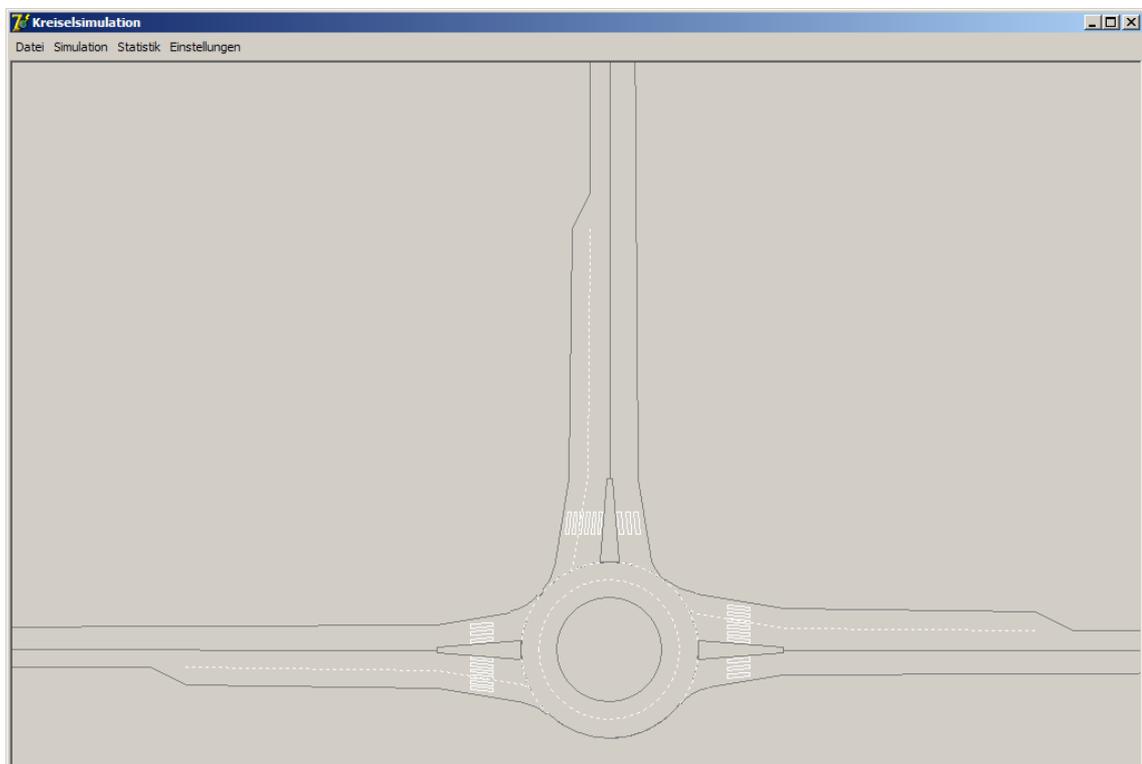


Abbildung 84: Erweiterte Einfahrten und Kreisfahrbahn im Kreisel Allmend

Mit dieser Massnahme wurde eine wesentlich höhere Durchsatzmenge der Fahrzeuge an der Leistungsgrenze erreicht:

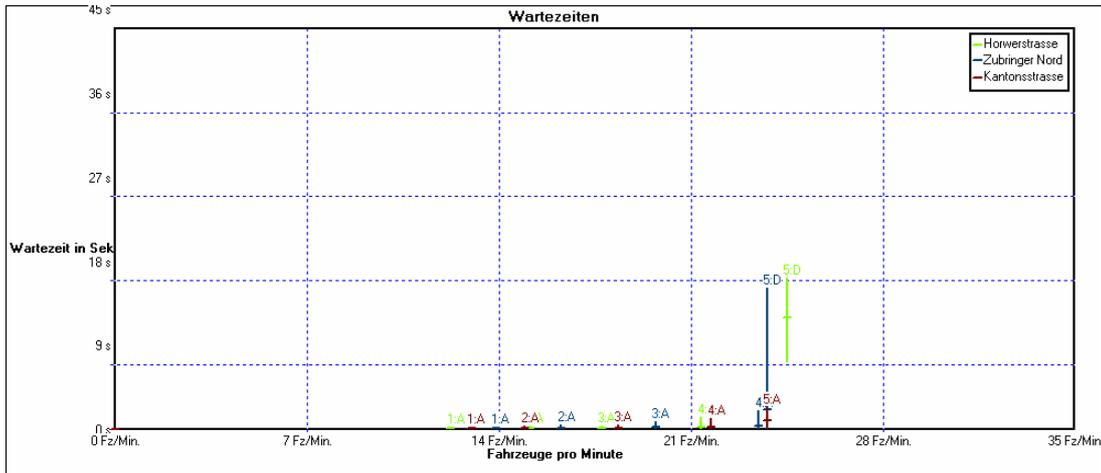


Abbildung 85: Wartezeiten (MW und 25% St) Kreisell Allmend, komplett 2-streifig

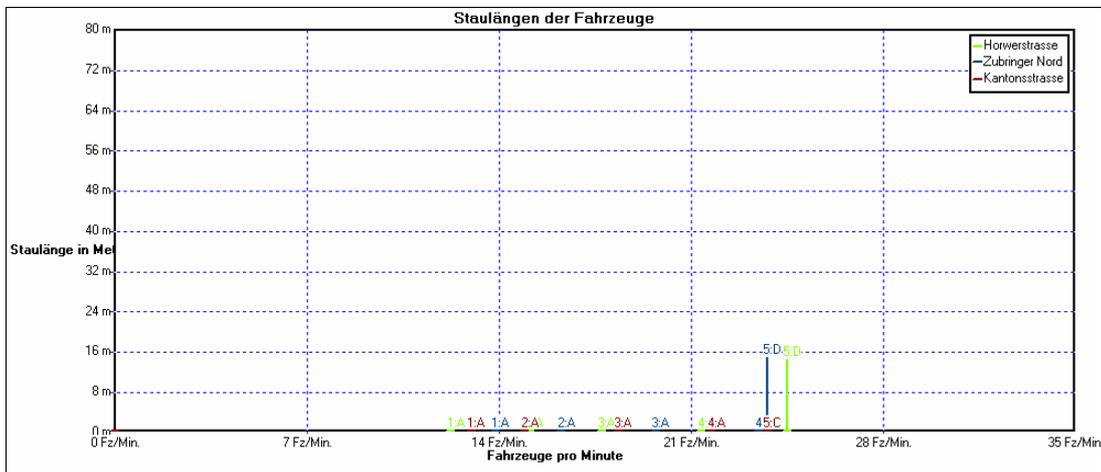


Abbildung 86: Staulängen (MW und 25% St) Kreisell Allmend, komplett 2-streifig

Die obigen Ergebnisse zeigen eine Durchsatzmenge von 25 Fahrzeugen pro Minute an, bevor die Staulängen grösser als die Warteräume wurden und somit die Leistungsgrenze erreicht war. Dies entspricht einer Steigerung gegenüber den 15 bis 16 Fahrzeugen aus der einstreifigen Ausprägung von 65%.

10.2 Kreisel Mattenhof

Beim Kreisel Mattenhof handelt es sich um einen einstreifigen Kreisel mit fünf Einfahrten, wovon sich drei kurz vor der Einfahrt auf zwei Fahrstreifen aufteilen.

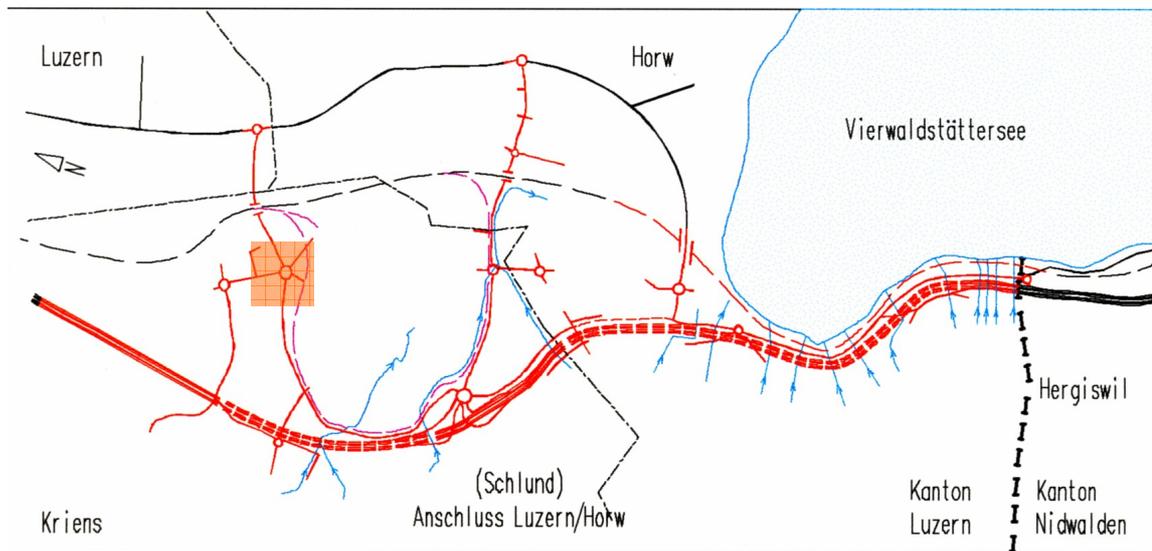


Abbildung 87: Übersicht Verkehrssituation Kreisel Mattenhof

10.2.1 Simulation

Anhand dieses Kreisels sollen folgende Aufgabenstellungen mittels Simulation gelöst werden:

- Ermittlung der Leistungsgrenze
- Einfluss überbreiter Fahrbahnen auf die Leistung

10.2.2 Ermittlung der Leistungsgrenze

Um für diesen einstreifigen Kreisels die Leistungsgrenze zu ermitteln, wurde eine Menge an Fahrzeugen und Fussgänger angenommen, die den Verkehrsgegebenheiten des Kreisels entspricht. Bei diesem Kreisels treffen drei Hauptströme zusammen, die den grösseren Teil der Verkehrsbewegungen verursachen und übernehmen. Darum sind diese mit zwei Streifen in der Einfahrt ausgestattet.

Zusätzlich führen zwei einstreifige Nebenäste kleinere Verkehrsmengen in den Knoten.

	Zubringer 1	Zubringer Nord	Zubringer 3	Zubringer Nord	Zubringer 5	Total
Zubringer 1	0	100	100	150	50	400
Zubringer Nord	50	0	100	150	50	350
Zubringer 3	50	100	0	150	50	350
Zubringer Nord	50	100	100	0	50	300
Zubringer 5	50	100	100	150	0	400
Total	200	400	400	600	200	1800
Fussgänger	20	20	0	20	20	80
Anteil BU in %	0	0	0	0	0	0
Anteil LW in %	5	15	15	15	10.6	11.8
Anteil MR in %	5	5	5	5	5	5
Anteil PW in %	90	80	80	80	84.4	83.2
Total	100	100	100	100	100	100

Abbildung 89: Initiale Verkehrsstärken für Kreisels Mattenhof

Folgende Leistungsmerkmale ergaben sich bei der initialen Verkehrsstärke:

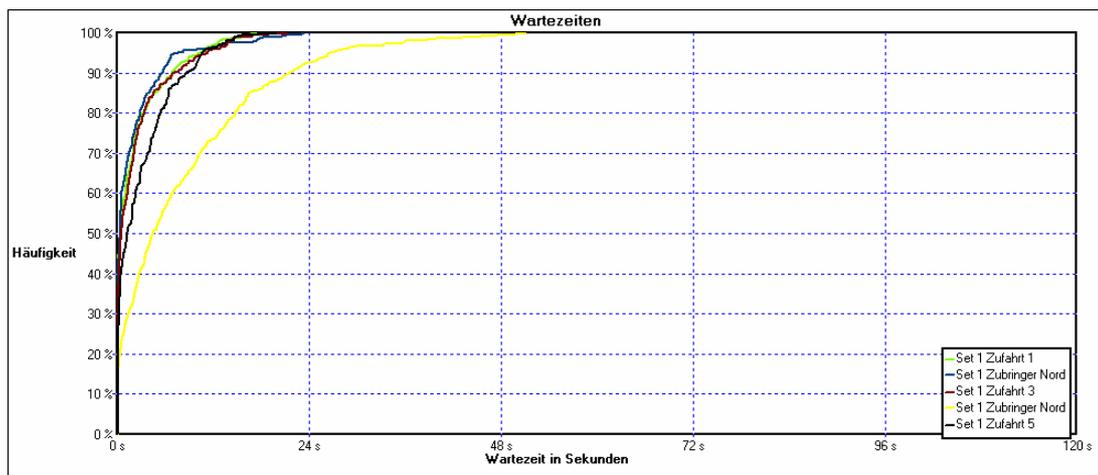


Abbildung 90: Ogive der Wartezeiten bei initialer Verkehrsstärke Kreisels Mattenhof

10. Beurteilung des Modelleinsatzes und der Simulationsergebnisse anhand von Beispielen

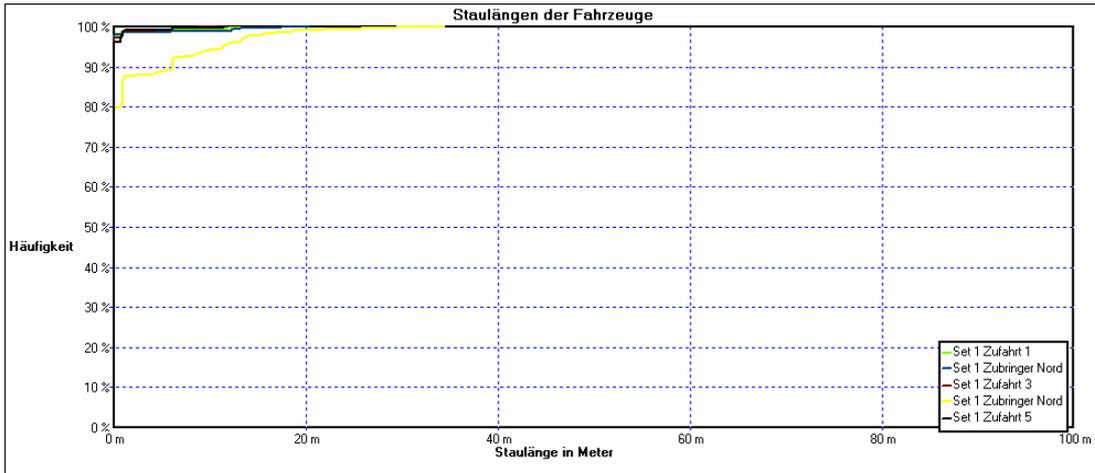


Abbildung 91: Ogive der Wartezeiten bei initialer Verkehrsstärke Kreisel Mattenhof

Durch die Erhöhung der Verkehrsstärke steigt die Wartezeit und Staulänge bis zur Leistungsgrenze:

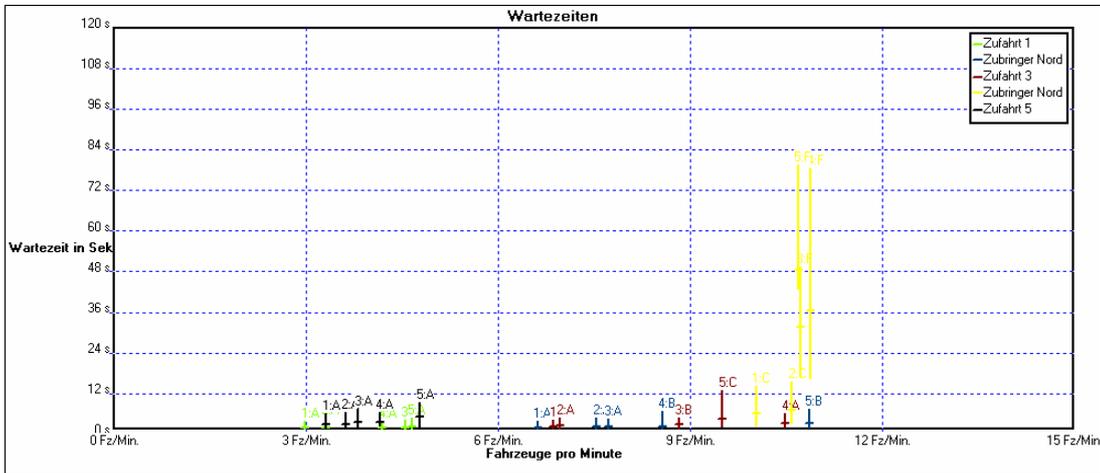


Abbildung 92: Wartezeiten (MW und 25% St) Kreisel Mattenhof

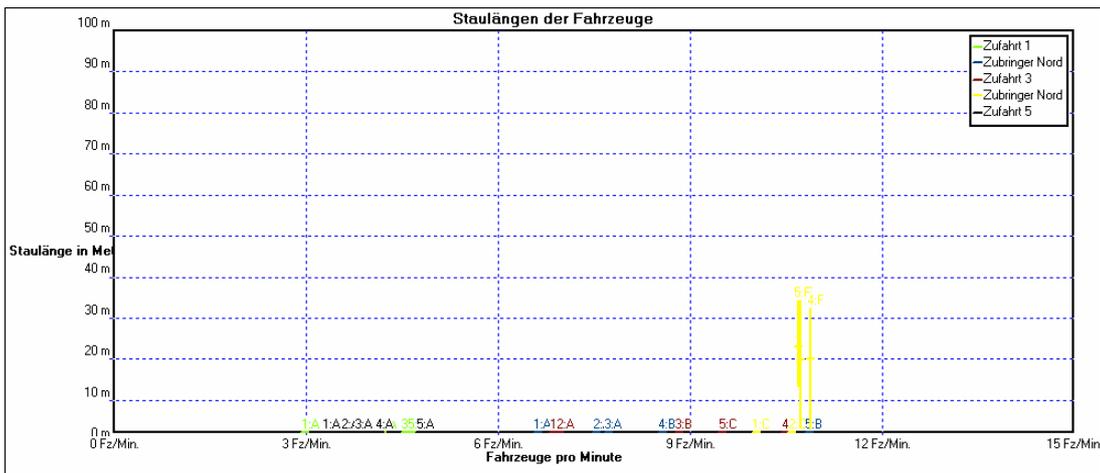


Abbildung 93: Staulängen (MW und 25% St) Kreisel Mattenhof

Ab der Simulation 5 beginnt das System instabil zu werden, was zu verfrühten Simulationsabbrüchen wegen voller Einfahrten führte. Damit ergibt sich für diese Simulationsanordnung eine Leistungsgrenze von 10 Fahrzeugen pro Minute für den Zubringer

Nord. Für die restlichen Zubringer besteht noch keine Beeinträchtigung oder Anzeichen zur Instabilität. Hier wurde die Leistungsgrenze noch nicht erreicht.

10.2.3 Einfluss einer überbreiten Kreisfahrbahn auf die Leistung

Um den Einfluss einer überbreiten Fahrbahn zu simulieren, wurde dieselbe Simulationsanordnung ohne diesen Parameter verwendet. Zusätzlich wurde noch eine Simulationsreihe mit zwei Fahrstreifen im Kreisel simuliert und folgende Ergebnisse ermittelt.

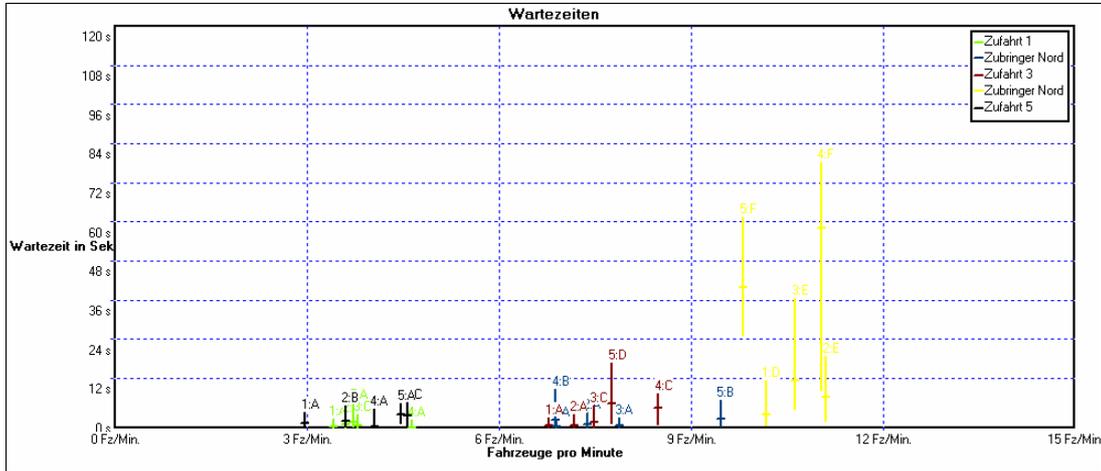


Abbildung 94: Wartezeiten (MW und 25% St) Kreisel Mattenhof ohne UBFB

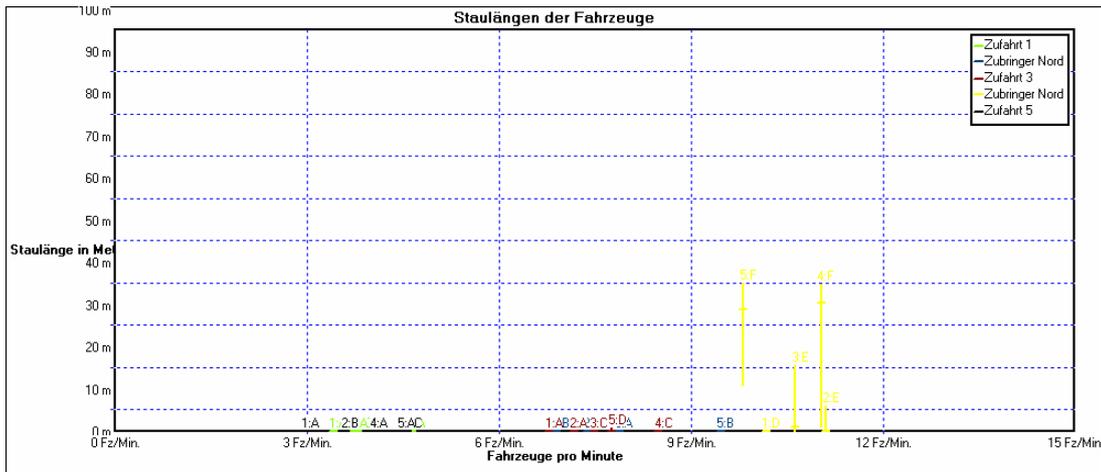


Abbildung 95: Staulängen (MW und 25% St) Kreisel Mattenhof ohne UBFB

Bei dieser Simulationsreihe lagen die Leistungsgrenzen zwar ähnlich hoch wie bei der überbreiten Fahrbahn, jedoch ist hier zu erkennen, dass die Wartezeiten bereits bei kleineren Verkehrsstärken höher ausfallen.

Zum Vergleich wurde die Anzahl der Fahrstreifen der Kreisfahrbahn auf zwei erhöht.

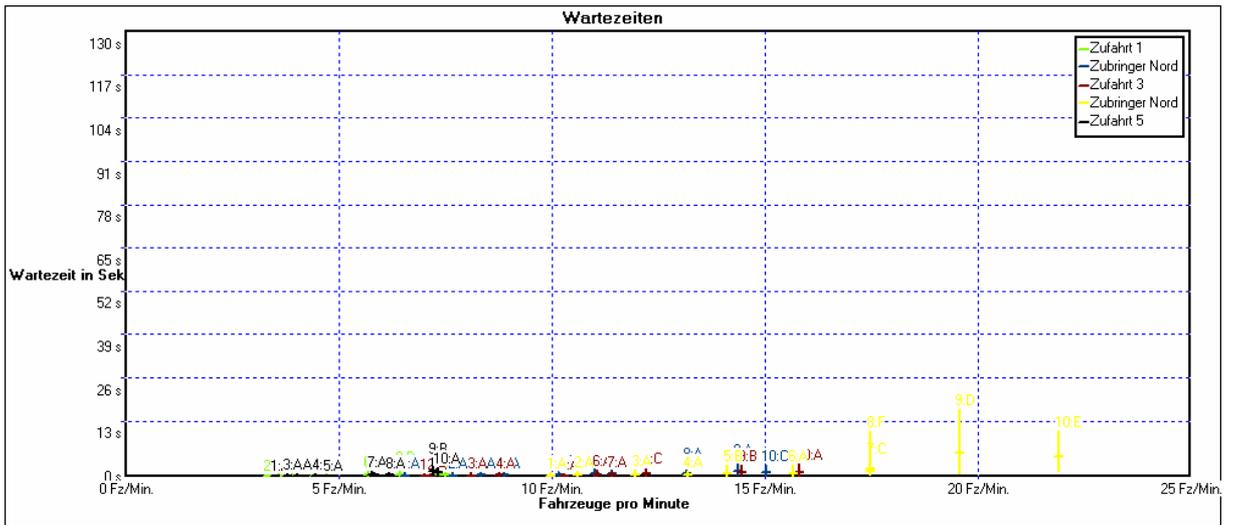
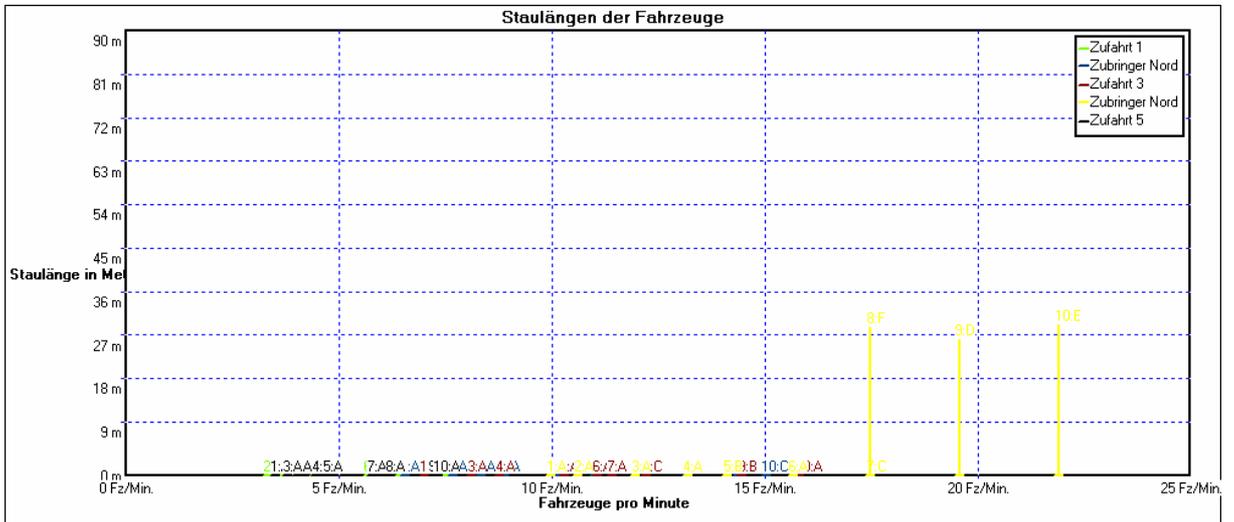


Abbildung 96: Wartezeiten (MW und 25% St) Kreisell Mattenhof 2-streifiger Kreisell



10.3 Kreisel Sihlbrugg

Beim Kreisel Sihlbrugg handelt es sich um einen zweistreifigen Kreisel mit fünf Zubringern, wovon drei eine Einfahrt mit zwei Fahrstreifen haben.



Abbildung 98: Übersicht Verkehrssituation Kreisel Sihlbrugg

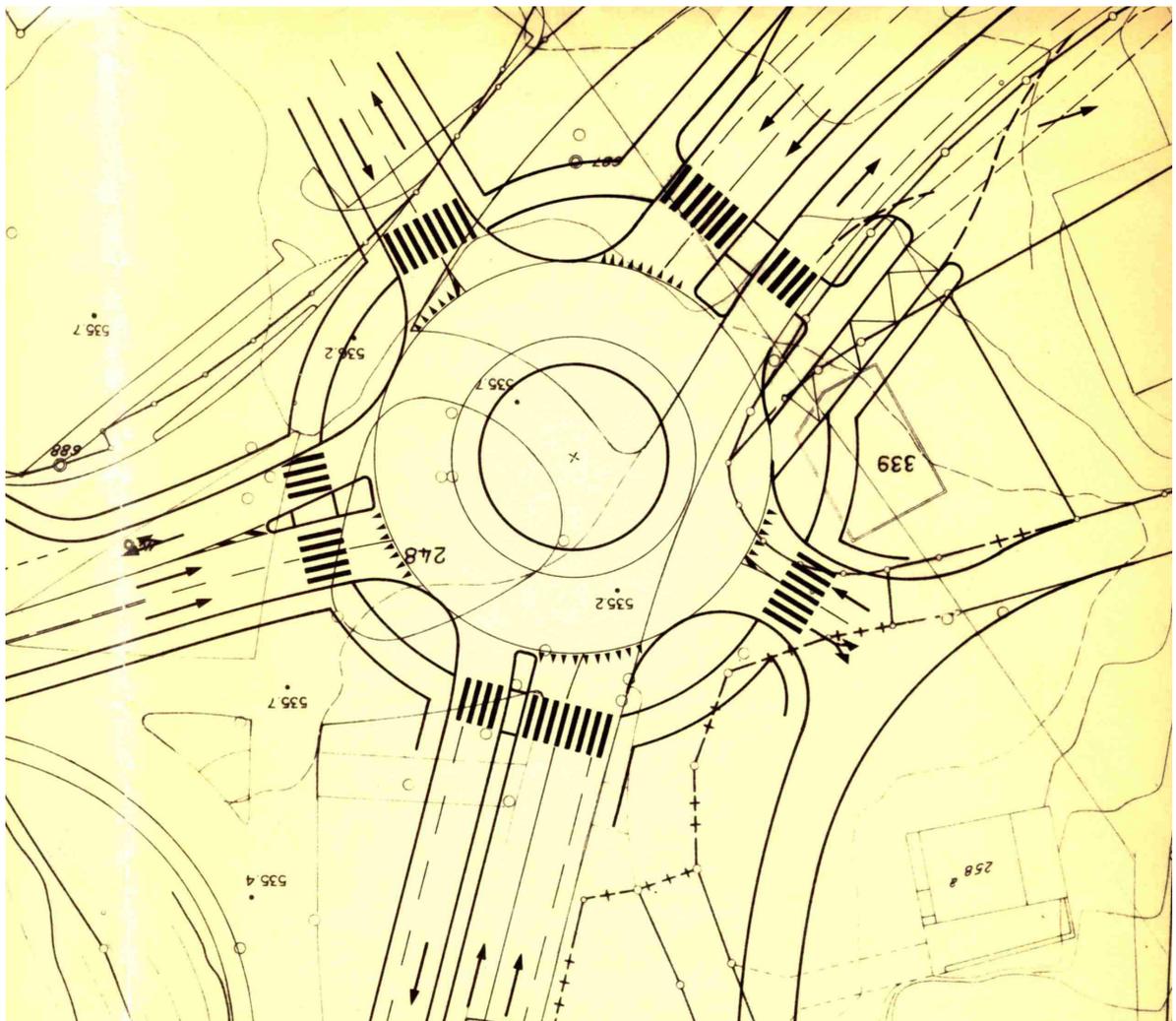


Abbildung 99: Detailplan Kreisel Sihlbrugg (Vorprojekt)

10.3.1 Simulation

Folgende Aufgabenstellungen sollen anhand dieses dritten Kreisels gelöst werden:

- Ermittlung der Leistungsgrenze
- Einfluss der Fussgänger auf die Leistung

10.3.2 Ermittlung der Leistungsgrenze

Analog zu den obigen Beispielen wurde erneut eine Menge an Fahrzeugen und Fussgänger angenommen, die den Verkehrsgegebenheiten des Kreisels entspricht. Bei diesem Kreisel treffen drei Hauptströme zusammen, die den grossen Teil der Verkehrsbewegungen verursachen und übernehmen. Darum sind diese mit zwei Fahrstreifen in der Einfahrt ausgestattet.

Zusätzlich führen zwei einstreifige Nebenäste kleinere Verkehrsmengen in den Knoten.

Angaben in Fz pro Std.	Hirzelstrasse	Zürichstrasse	Parkplatz Nord	Zugerstrasse	Parkplatz süd	Total
Hirzelstrasse	0	100	20	200	0	320
Zürichstrasse	100	0	20	200	20	340
Parkplatz	5	0	0	15	0	20
Zugerstrasse	200	200	10	0	20	430
Parkplatz süd	15	10	0	0	0	25
Total	320	310	50	415	40	1135
Fussgänger	20	20	20	20	20	100
Anteil BU in %	0	0	0	0	0	0
Anteil LW in %	15	15	5	15	14.6	14.8
Anteil MR in %	10	10	10	10	10	10
Anteil PW in %						
	75	75	85	75	75.4	75.2
Total	100	100	100	100	100	100

Abbildung 100: Initiale Verkehrsstärken für Kreisel Sihlbrugg

Die initiale Verkehrsstärke ergibt folgende Leistungsmerkmale:

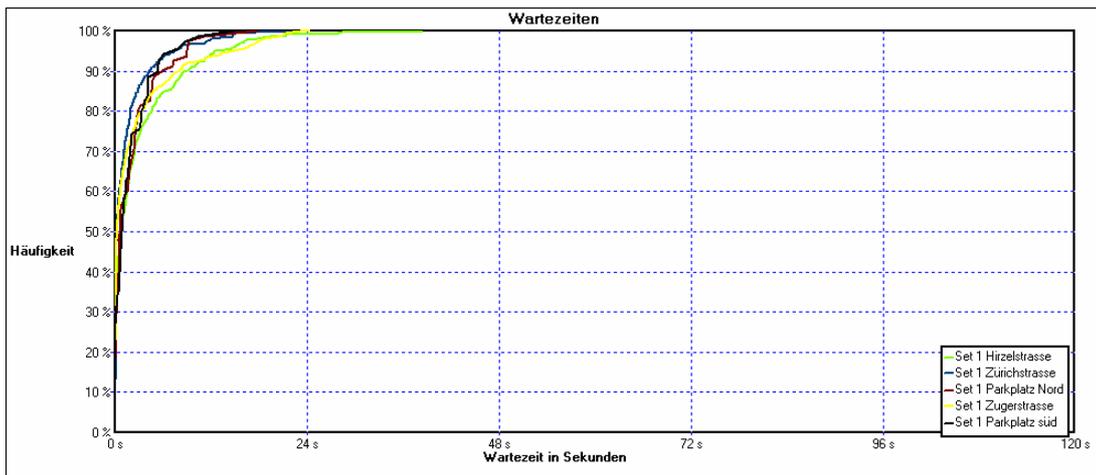


Abbildung 101: Ogive der Wartezeiten bei initialer Verkehrsstärke Kreisel Sihlbrugg

10. Beurteilung des Modelleinsatzes und der Simulationsergebnisse anhand von Beispielen

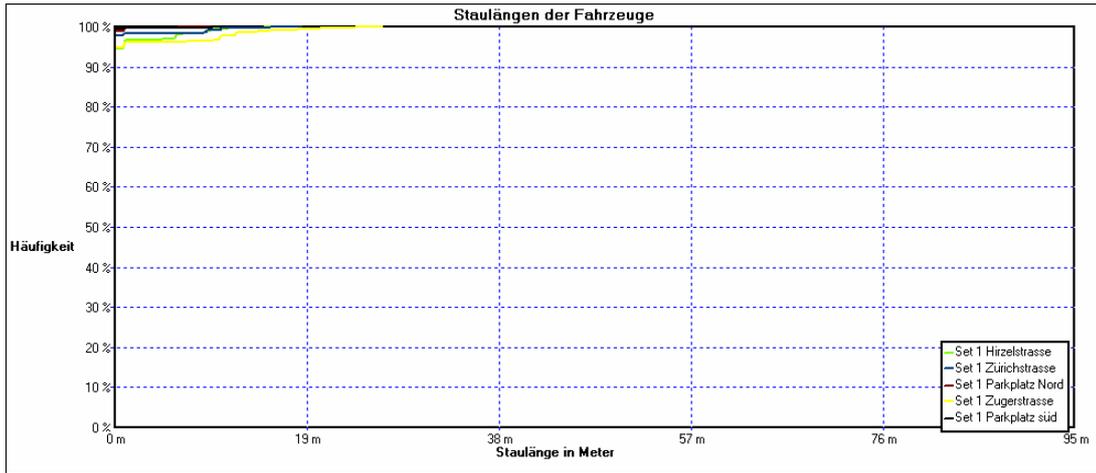


Abbildung 102: Ogive der Staulängen bei initialer Verkehrsstärke Kreisell Sihlbrugg

Durch die kontinuierliche Erhöhung der Verkehrsstärke steigt die Wartezeit und Staulänge bis zur Leistungsgrenze:

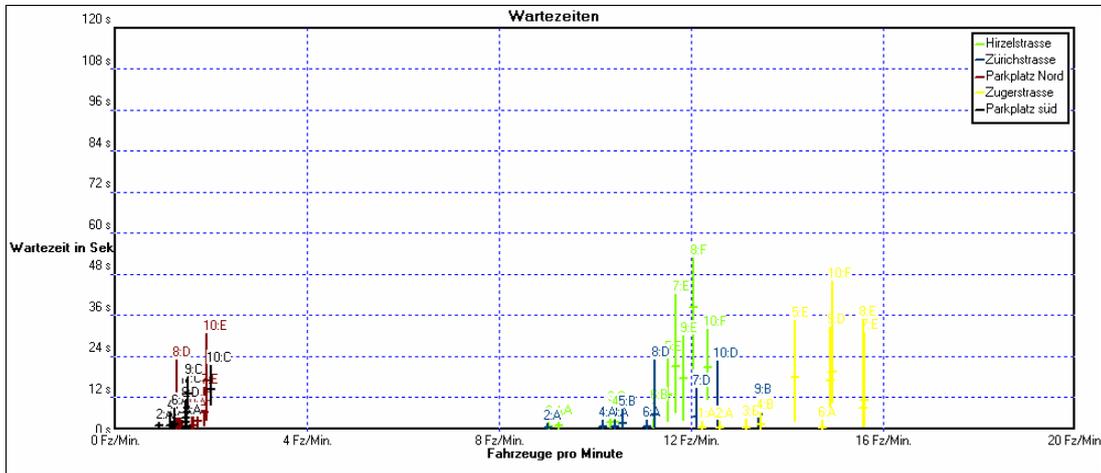


Abbildung 103: Wartezeiten (MW und 25% St) Kreisell Sihlbrugg

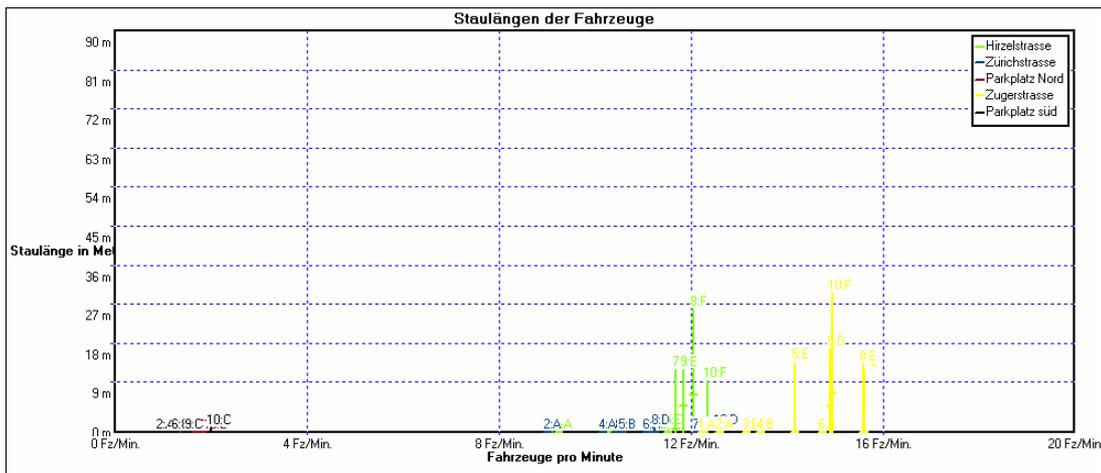


Abbildung 104: Staulängen (MW und 25% St) Kreisell Sihlbrugg

Ab der Simulation 5 beginnt das System instabil zu werden, was zu verfrühten Simulationsabbrüchen wegen voller Einfahrten führte. Damit ergibt sich für diese Simulationsanordnung eine Leistungsgrenze von 12 Fahrzeugen pro Minute für die Zubringer Hir-

zel- und Zürichstrasse und für den Zubringer Zugerstrasse ein Wert von 15 Fahrzeugen.

An den effektiven Rückstaulängen der Einfahrten kann man diese Überlastung ebenfalls gut erkennen. So zeigt die folgende Staulängen-Grafik der Zubringer Zugerstrasse während der gesamten Simulation gestaute Fahrzeuge.

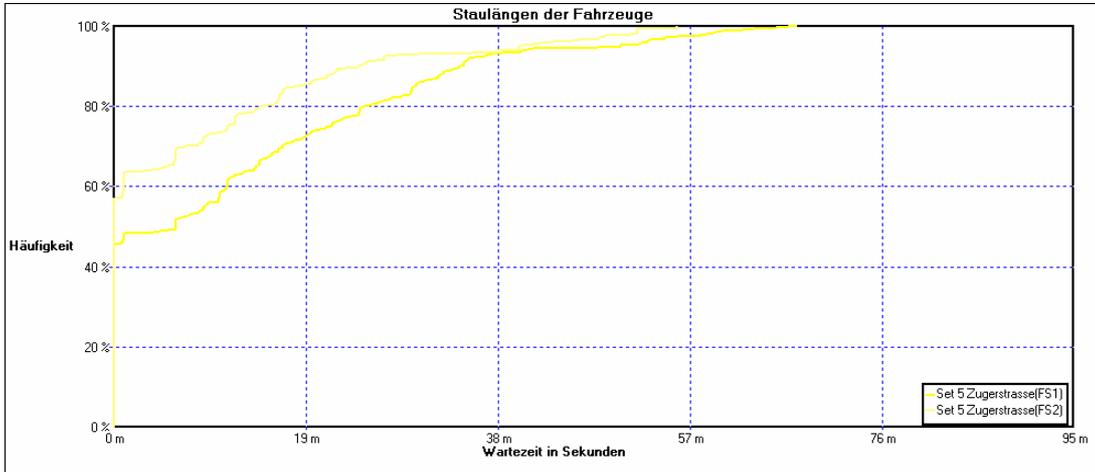


Abbildung 105: Ogive der Staulängen einer 2-streifigen Einfahrt, Kreisel Sihlbrugg

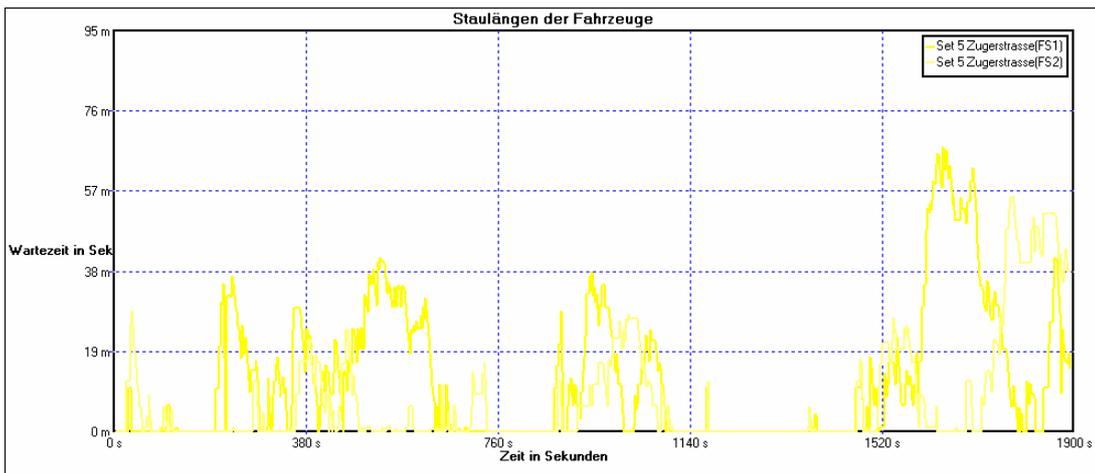


Abbildung 106: Effektive Staulängen einer 2-streifigen Einfahrt, Kreisel Sihlbrugg

Auffallend an Abbildung 106 ist ein Wechselspiel der Rückstaulängen zwischen den beiden Fahrstreifen. Wobei der äussere Fahrstreifen (Nummer 2) grundsätzlich weniger belastet war und somit auch weniger Rückstau produzierte.

Es ist zu beobachten, dass sich meist zuerst ein Rückstau auf dem inneren Fahrstreifen bildet. Sobald sich dieser abbaut, wächst zunächst der Rückstau auf dem äusseren Fahrstreifen. Dies ist auf die definierte Vortrittsregelung bei der Einfahrt zurück zu führen, welche dem inneren, linken Fahrstreifen Vorfahrt gewährt, gegenüber dem äusseren rechten Fahrstreifen.

10.3.3 Einfluss der Fussgänger auf die Leistung

Um den Einfluss der Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit des Kreisels zu ermitteln, wurde für den Kreisel Sihlbrugg die Verkehrsstärke verwendet, welche in der obigen Simulation als Leistungsgrenze ermittelt wurde. Bei der durchgeführten Simulationsreihe wurde die Fussgängermenge kontinuierlich erhöht. Beginnend mit einem Fussgänger pro Stunde wurde nach immer zwei Simulationen die Menge verdoppelt, so dass bei den beiden letzten Läufen je 32 Fussgänger pro Stunde die Fahrbahn querten.

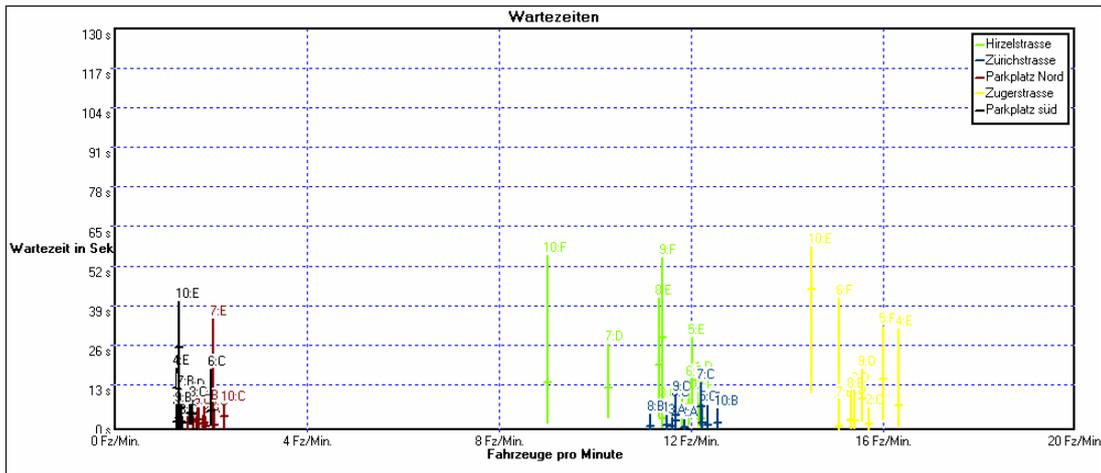


Abbildung 107: Wartezeiten (MW und 25% St) Fussgänger Kreisel Sihlbrugg

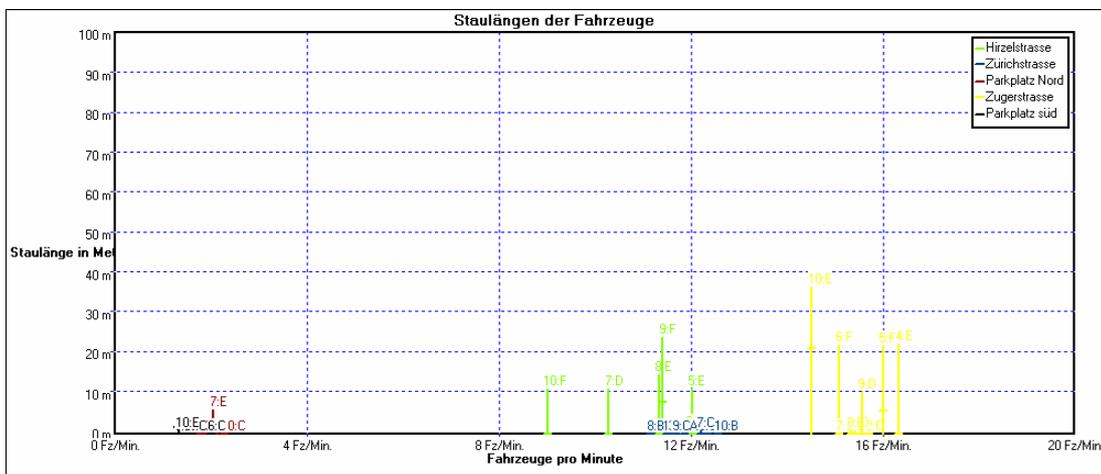


Abbildung 108: Staulängen (MW und 25% St) Fussgänger Kreisel Sihlbrugg

Aufgrund der ermittelten Wartezeiten und Staulängen, ist ersichtlich, dass ab Simulation 4 das System instabil wird, das heisst die Leistungsgrenze erreicht ist. Alle grösseren Fussgängermengen führten zu noch grösseren Staulängen und Wartezeiten und schliesslich zu einem Rückgang der Durchflussmenge.

10.4 Beurteilung

Aufgrund der oben dokumentierten Beispiele kann folgende Schlussfolgerung gezogen werden:

Die Simulation ergibt Resultate, welche mit den beobachtbaren Gegebenheiten an Kreiseln übereinstimmen. Veränderungen der Parameter wirken sich vorhersehbar auf das Ergebnis der Simulation aus.

Mehrere Simulationen mit den gleichen Parametern ergeben ähnliche Resultate mit einer gewissen zufälligen Streuung.

Zu kurze Simulationsintervalle können daher das Resultat verfälschen.

Die Erhöhung der Verkehrsstärken zur Ermittlung der Leistungsgrenze ergibt bei allen Simulationsreihen folgende ähnliche Kurve:

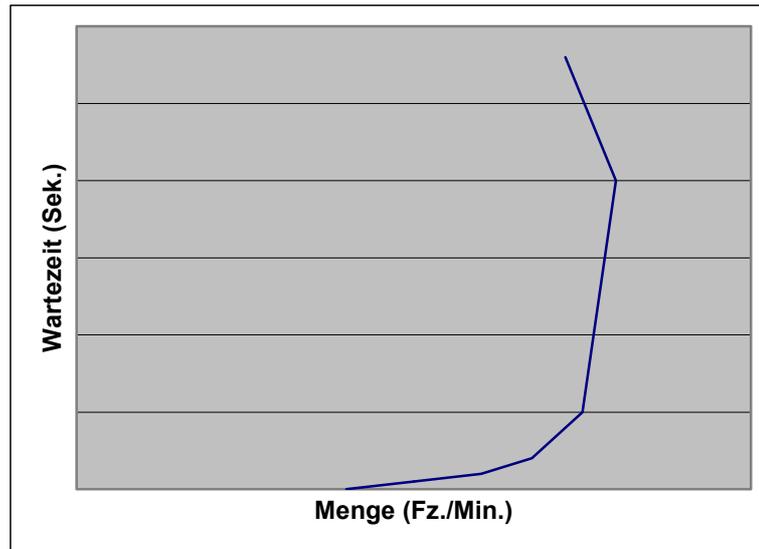


Abbildung 109: Zusammenhang Fahrzeugmenge - Wartezeit

Der steile Anstieg und die rückläufige Durchflussmenge sind ein deutliches Zeichen für eine Überlastung, wobei die Leistungsgrenze des Kreisels erreicht wird.

Die rückläufige Menge an Fahrzeugen entsteht durch die gegenseitige Blockade im Kreis. Bei zu grossen Fahrzeugmengen können diese nicht mehr genügend schnell die Kreisfahrbahn verlassen und behindern somit Fahrzeuge aus anderen Zubringern. Dies resultiert in einer rückläufigen Durchflussmenge.

10.5 Ungelöste Fragen zur Modellierung

Bei der Modellierung des Verkehrssystems Kreisels wurde versucht möglichst umfassend vorliegende Ergebnisse aus Untersuchungen und Studien zu berücksichtigen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, spätere Erkenntnisse mit Hilfe der Veränderung von Regeln und Parameter zu implementieren.

10.5.1 Annahmen zur vorliegenden Modellierung

Trotz allem mussten zur Modellierung einige Annahmen getroffen werden, weil noch keine empirischen Untersuchungen zu den Sachverhalten verfügbar sind:

- Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Durchfahrtsbreite
- Abhängigkeit des Einschlagwinkels von der Fahrgeschwindigkeit

Für die Modellierung wurden deshalb Annahmen getroffen, die einerseits auf Beobachtungen des Autors beruhen und andererseits durch die Simulation von Beispielen verifiziert wurden.

10.5.2 Kollisionen

Das Thema Kollisionen wurde in dieser Arbeit zwar am Rande angedacht, könnte aber wesentlich detaillierter berücksichtigt werden. Diese Arbeit beschränkt sich darauf Fahrsituationen aufzuzeichnen, welche zu einer Kollision geführt hätten.

Neben der Leistungsfähigkeit von Kreiseln interessiert aber ebenfalls, bei der Wahl der Knotenform, die Wahrscheinlichkeit von Unfällen. Dabei wäre es wünschenswert, diese in Abhängigkeit der Verkehrsstärke und der Kieselgeometrie vorher sagen zu können.

10.5.3 Kreiselformen

Durch Einstellung der Parameter lassen sich beinahe alle gängigen Kreiselformen modellieren. Trotzdem wurde auf sämtliche Formen von Bypassen verzichtet. Diese entflechten einen Verkehrstrom und führen ihn ausserhalb des Kreisels vorbei. Somit reduziert sich die Belastung des Kreisels entsprechend und könnte mit angepassten Verkehrsstärken trotzdem simuliert werden.

10.5.4 Einfluss von Wegweisungszielen auf die Leistungsfähigkeit

Grössere Kreisel werden häufig mit Wegweisern bei der Einfahrt versehen, welche den Verkehr auf der Einfahrt auf die vorhandenen Fahrstreifen verteilt. Grundsätzlich wäre es denkbar, die Aufteilung und Aufstellung der Fahrzeuge in der Einfahrt optimal auf die Fahrstreifen zu verteilen und somit eine Leistungssteigerung zu erzielen. Es wurden aber diesbezüglich noch keine Studien erstellt, welche diesen Zusammenhang beschreiben, sofern es einen gibt. Dieses Gebiet ist im Moment noch nicht erforscht.

Die vorgesehene Möglichkeit in dieser Modellierung, die Aufstellung der Fahrzeuge in der Einfahrt je nach Fahrziel vorzugeben, führt demnach nur zu theoretischen Ergebnissen, welche nicht mit Werten aus der Praxis verglichen und verifiziert werden können.

10.5.5 Leistungsmerkmale beim zeitweisen Anhalten des Verkehrs

Bei Kreiseln mit einer Tramdurchfahrt wird zeitweise der gesamte Verkehr eines Zubringers oder auf der Kreisfahrbahn angehalten. Dass damit die Leistungsfähigkeit des Kreisels verringert wird ist offensichtlich, jedoch gibt es noch keine Untersuchungen in welchem Ausmass dieser Einfluss steht. So wäre es für die Planung solcher Verkehrsknoten wichtig zu wissen, um wie viele Prozente sich die Leistungsfähigkeit verringert (Verlust-Prozente) wenn in vorgegebenem Takt der Verkehr angehalten wird.

Diese Form des Kreisels ist in der Modellierung ebenfalls vorgesehen. Die Ergebnisse können aber wiederum mangels Praxisuntersuchungen nicht verifiziert werden.

11 Ausblick

Diese Arbeit versucht eine Vorhersage für die Qualität des Verkehrsablaufes für hochbelastete Kreiseln zu ermöglichen und verwendet dabei die aktuell verfügbaren Ergebnisse aus Untersuchungen an ein- und mehrstreifigen Kreiseln. Dabei wurden aus den beobachteten Verhaltensmustern Regeln für die Simulation modelliert.

Zukünftiger Ergebnisse von Untersuchungen der Verhaltensmuster von Fahrzeugen in mehrstreifigen Kreiseln können später zur Analyse im vorliegenden Programm eingebaut werden. Die dafür vorgesehene Schnittstelle lässt eine abweichende Modellierung des Fahrzeugverhaltens zu, und bietet somit die Möglichkeit dieser Erweiterungen.

Bei der Modellierung wurden dabei immer nur solche Details berücksichtigt, welche einen Einfluss auf das Ergebnis, auf die Qualität des Verkehrsablaufes haben. Damit wurde vielerorts ein Kompromiss geschlossen, zwischen einer möglichst genauen Abbildung und einer in der verfügbaren Rechenzeit durchführbaren.

Eine Erweiterung des Einsatzgebietes dieser Simulation wäre im Bereich der Unfallvorhersage möglich. Dabei könnten verschiedene Verhaltensmuster von Fahrzeugen ausgewertet und dadurch eine Vorhersage über die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls getroffen werden.

Dafür müssten Fragestellungen in folgenden Bereichen gelöst werden:

- Weicht das Fahrverhalten in Unfallsituationen vom modellierten Verhalten ab?
- Welche Auswirkungen hat ein Unfall auf nicht beteiligte Fahrzeuge?
- Ab wann wird eine Situation als Unfall bezeichnet?
- Wie gross ist der Anteil an Fahrzeugen die von den Regeln abweicht und wie soll dieses Verhalten modelliert werden?
- Ist eine Abweichung von einer Regel meistens die Ursache eines Unfalls?

Viele dieser Fragestellungen wurden noch wenig oder überhaupt nicht in der Praxis untersucht. Es müssten deshalb Untersuchungen und Tests mit verschiedenen Verhaltensmustern durchgeführt werden.

Das Ziel dieser Dissertation ist es, eine Aussage über die Qualität des Verkehrsablaufes und über die Leistungsgrenze bei hochbelasteten Kreiseln treffen zu können. Dies kann mit dem vorhandenen Simulationsprogramm erreicht werden.

12 Literaturverzeichnis

- [AKCEL98] Akcelik R., Chung E., Besley M.
"Roundabouts: Capacity and performance analysis", Australian Road Research Board, ARR 321, 1998
- [ARAG88] Aragao P. de,
"Carrefours giratoires: huitante années d'évolution en Europe", Strasse und Verkehr Nr. 6, pp. 383-396, 1988
- [BOLEY92] Boley Peter Dr.
"Statistik, Einführendes Lehrbuch für Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler", 5. Auflage, R. Oldenbourg Verlag München Wien, 1992
- [BOVY88] Bovy H., Aragao P. de
"Vers une modération intelligente de la circulation: les nouveaux giratoires", Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne, Publication No. 242, 1988
- [BRANOLTE83] Branolte U. und Hotz S.
„Simulation des Verkehrsablaufes auf Landstraßen – Modellerweiterung“, Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 201, 1983
- [BRILON76] Brilon W. Prof. Dr.
„Warteschlangemodell des Verkehrsablaufes auf zweispurigen Landstraßen“, Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 201, 1976
- [BRILON86] Brilon W. Prof. Dr., Kahrman B., Ohadi H.
„Untersuchung des Verkehrsknotenpunktes ‚Berliner Kreisel‘ in Hildesheim“, Gutachten für das Strassenbauamt Hildesheim, Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, April 1986
- [BRILON88a] Brilon W. Prof. Dr.
"Leistungsfähigkeit von Kreisverkehrsplätzen – Ein Zwischenbericht", Strassenverkehrstechnik 32 Nr. 5, Kirschbaumverlag, Bonn 1988
- [BRILON88b] Brilon W. Prof. Dr. und Grossmann M.
„Entwicklung eines Simulationsmodells für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlagen, Forschungsauftrag des Bundesministers für Verkehr: FE Nr. 01.107 G85H“, Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, 1988
- [BRILON92] Brilon W. Prof. Dr.
„Kreiselhandbuch V 4.0, Berechnungen der Leistungsfähigkeit und Verkehrsqualität an Kreisverkehrsplätzen“, Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, 1992
- [BRILON93] Brilon W. Prof. Dr., Stuwe B., Drews O.
"Sicherheit und Leistungsfähigkeit von Kreisverkehrsplätzen", Forschungsbericht Nr. 77359/91 an das Bundesverkehrsministerium, 1993
- [BRILON96] Brilon W. Prof. Dr.
"Handbuch zum Programm KREISEL, Version 4.2", Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, 1996

- [BROWN79] Brown Peter John
"Writing interactive compilers and interpreters", Chichester a.o.: Wiley, 1979
- [BUEHL97] Bühlmann F., Spacek P.
"Unfallgeschehen und Geometrie der Kreiselanlagen", Bundesamt für Strassenbau, Bern, 1997
- [BUWAL95] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL),
"Fahrverhalten von Personenwagen in der Schweiz, Schlussbericht", Umwelt-Materialien Nr. 40 Luft, 1995
- [CETUR89] CETUR
"Conception des carrefours à sens giratoire implantés en milieu urbain", CETUR, 1989
- [DAWSON68] Dawson R.F.
„The Hyperlang Probability Distribution – A Generalized Traffic Headway Model“, Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 86, 1968
- [EMCH87] Emch + Berger AG
"Veloverhalten im Kreisel. Arbeitsbericht Nr. 1", Emch + Berger AG, Aarau, 1987
- [FORSCH94] Forschungsverbund Lebensraum Stadt
"Faktoren des Verkehrshandelns", Berichte aus den Teilprojekten, Ernst & Sohn Verlag, 1994
- [FGSV98] FGSV
"Merkblatt für die Anlage von kleinen Kreisverkehrsplätzen", Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln, 1998
- [GELLERT70] Gellert W., Küstner H. Dr., Hellwich M. Dr., Kästner H.
"Großes Handbuch der Mathematik", Buch und Zeit Verlag GmbH, Köln, 1970
- [HACKENB82] Hackenberg U. und Heißing B.
„Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Strassenverkehr“, Automobiltechnische Zeitschrift Bd. 84 (1982), Nr. 7/8, 1982
- [HAMMER83] Hammer Anton und Hammer Karl
„Taschenbuch der Physik“, Lindauers häuslicher Unterricht Band 3, J. Lindauer Verlag, München, 1983
- [HARDERS68] Harders J.
"Die Leistungsfähigkeit nicht signal geregelter städtischer Verkehrsknoten", Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 76, 1968
- [HARDERS76] Harders J.
"Messung von Grenz- und Folgezeitlücken als Grundlage für die Berechnung der Leistungsfähigkeit von Landstrassenknoten", Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 216, 1976
- [HOEFS72] Hoefs D. H.
"Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen", Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr: Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 140, 1972
- [HOELSKEN65] Hölsken D.
"Der mehrspurige Verkehrsablauf auf Stadtstrassen. Leistungsfä-

- higkeit von zweispurigen Spurwechselstrecken", Dissertation, Fakultät für Bauwesen der RWTH Aachen, 1965
- [HOFFMANN90] Hoffmann G., Holz D., Schober W., Slapa R.
„Untersuchungen der Auswirkungen spezieller Signalprogramme als Alternativlösung zu zeitweisen Signalabschaltungen in verkehrsschwachen Zeiten“, Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 588, 1990
- [HOLLIS79] Hollis E.M.
"A program to model flows, queues and delays at a roundabout", Traffic Engineering and Control, 4/1979, pp. 163-165
- [HUBER94] Huber C.A., Bühlmann F.
"Sicherheit von Kreiselanlagen - Erfahrungen und vorläufige Empfehlungen", bfu-Bericht, Bern, Dez. 1994
- [JENSCH78] Jensch M., Spoerer E., Utzelmann H. D.
"Verkehrsverhaltenslehre", Bundesanstalt für Strassenwesen, Köln, Sicherheitsforschung Strassenverkehr, Heft 20, 1978
- [KÄPPLER93] Käßpler Wolf-Dieter Dipl.-Ing.
"Beitrag zur Vorhersage von Einschätzungen des Fahrverhaltens", Fortschrittberichte VDI Reihe 12 Nr. 198, 1993
- [KIMBER78] Kimber R.M., Hollis E.M.
"Peak-period traffic delays at road junctions and other bottlenecks", TEC, 10/1978, pp. 442-446, 1978
- [KIMBER79] Kimber R.M., Hollis E.M.
"Traffic queues and delay at road junctions", TRRL LR 909, 1979
- [KIMBER80a] Kimber R.M.
"The Traffic capacity of roundabouts", TRRL-Report LR 942, 1980
- [KIMBER80b] Kimber R.M.
"The prediction of delays and queue lengths at roundabouts", PTRC Meeting on Highway Planning and Design, 1980
- [KIMBER80c] Kimber R.M., Maycock G.
"Roundabout capacity", PTRC Meeting on Highway Planning and Design, 1980
- [KOEPPPEL79] Köppel G., Bock H.
"Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Kurvigkeit", Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr: Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 269, 1979
- [KOEHLER74] Köhler U.
"Stabilität von Fahrzeugkolonnen", Dissertation, Universität Karlsruhe, 1974
- [KUESTER01] Küster Heinz-Gerd
"Das Compiler-Buch: freie Compiler und Interpreter", MITP-Verlag, Bonn, 2001

- [KYTE91] Kyte M., Zegeer J.D.
"Empirical Models for Estimating Capacity and Delay at Stop-Controlled Intersections", Workshop Ruhr-Universität Bochum, 7/1991, Springer Verlag, 1991
- [HEUER97] Heuer A., Saake G.
"Datenbanken, Konzepte und Sprachen", 1. korrigierter Nachdruck, International Thomson Publishing, Bonn, 1997
- [LIPPS01] Lipps Oliver
"Modellierung der individuellen Verhaltensvariationen bei der Verkehrsentstehung", Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, Schriftenreihe Heft 58, 2001
- [LINDENM00] Lindenmann HP., Weber R., Ranft B., Chabot-Zhang Y.
"Unfallgeschehen auf stark belasteten Autobahnen", Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik der ETH Zürich, 2000
- [LINDENM01a] Lindenmann HP.
"Skript zur Vorlesung", Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik der ETH Zürich, 2001
- [LINDENM01b] Lindenmann HP.
"Netzmodelle und Simulation" Teil 2 Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik der ETH Zürich, 2001
- [LINDENM04] Lindenmann HP., Belopitov I., Spacek P.
"Leistungsfähigkeit hochbelasteter Kreisel (Grundlagen)", Forschungsauftrag VSS 1998/076 vom Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik der ETH Zürich, 2004
- [LEUTZBA86] Leutzbach Wilhelm und Wiedemann Rainer
"Development and applications of traffic simulation models at Karlsruhe Institut für Verkehrswesen", Traffic engineering + control, Volume 27, 1986
- [LOCKEMA87] Lockemann P.C. und Schmidt J.W.
"Datenbank-Handbuch", Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1987
- [LOUAH88] Louah G.
"Recent French studies on capacity and waiting times at rural un-signalised intersections", in [BRILON88], 1998
- [MATTE95] Mattern Friedmann
"Modellbildung und Simulation", Beitrag zum Projekt "Identität der Informatik", Fachbereich Informatik, Technische Hochschule Darmstadt, 1995
- [MAYER82] Mayer Otto
"Syntaxanalyse", Reihe Informatik/27, B.I. Wissenschaftsverlag, Zürich, 1982
- [MARLOW82] Marlow M., Maycock G.
"The effect of Zebra crossing on junction entry capacities", TRRL SR724, 1982
- [MUNAWAR94] Munawar Achmed
„Entwicklung eines Simulationsmodells für Kreisverkehrsplätze mit Lichtsignalanlagen“, Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, 1994
- [NRW93] NRW
"Kleine Kreisverkehrsplätze - Empfehlungen zum Einsatz und zur

- Gestaltung" Bausteine Nr. 16, herausgegeben vom Ministerium für Stadtentwicklung und Verkehrs des Landes Nordrhein-Westfalen, 1993
- [POEFFEL98] Poeffel Alexander
„Kreiselsimulation 2.0“ Diplomarbeit im Fach Informatik am Institut für Informatik der Universität Zürich, 1998
- [PTV00] "VISSIM 3.50", Benutzerhandbuch, PTV Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, 2000
- [REKERSBR95] Rekersbrink Andreas
"Mikroskopische Verkehrssimulationsmodelle, Fahrverhaltensbeschreibung mit Hilfe potentieller Kollisionszeiten" in Strassenverkehrstechnik 19/95, 1995
- [RISSE91] Risse Hermann-Josef
"Das Fahrverhalten bei normaler Fahrzeugführung", Fortschrittsberichte VDI Reihe 12 Nr. 160, 1991
- [ROMMEL94] Rommelfanger H.
"Mathematik für Wirtschaftswissenschaftler", Band 2, 3., überarbeitete Auflage, Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG, Mannheim, 1994
- [RP96] RP Freiburg
Dokumentation der Kreisverkehrsplätze im Bereich des RP Freiburg, Jan. 1996
- [SCHIEDERM87] Schiedermeier Reinhard
"Entwurf einer interpretierenden Programmierungsumgebung für mehrere Sprachen", Dissertation am Institut für mathematische Maschinen und Datenverarbeitung (Informatik) Erlangen, Arbeitsberichte des Institut für mathematische Maschinen und Datenverarbeitung (Informatik), Heft 20, Nummer 6, Erlangen, Juli 1987
- [SCHNABEL98] Schnabel Werner und Knotte Thoralf
„Untersuchungen zur Durchlässigkeit und zur Qualität des Verkehrsablaufes auf Kreisverkehrsplätzen“, Strassenverkehrstechnik Heft 4/98, 1998
- [SEDGEWICK95] Sedgewick Robert
„Algorithmen“, Addison-Wesley (Deutschland) GmbH, 2. korrigierter Nachdruck, 1995
- [SEMMENS82] Semmens Marie C.,
"The capacity of some grade-separated roundabout entries", Transport and road research laboratory supplementary report 721, 1982
- [SETRA84] SETRA
"Carrefours giratoires. Les carrefours plans sur routes interurbaines", SETRA, 1984
- [SIEGLOCH81] Siegloch W.
"Anmerkungen zur Leistungsermittlung von Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen", Strassenverkehrstechnik, 6/1981, pp. 198-202, 1981
- [SIMON88] Simon M., Rutz H.
"Sicherheit von Verkehrskreiseln innerorts." Schlussbericht, Emch + Berger AG, Aarau, 1988

- [STUWE92] Stuwe B.
Untersuchung der Leistungsfähigkeit und Verkehrssicherheit an deutschen Kreisverkehrsplätzen", Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen, Ruhr Universität Bochum, Heft 4, 1992
- [SWISS95] Swiss Simulation Engineering GmbH, Luzern und Basel, www.SwissSimulation.ch
- [TRANSP098] Transportation research board
"Modern roundabout practice in the United States", National cooperative Highway research program NCHRP Synthesis 264, 1998
- [TROUTBE84] Troutbeck R.J.
"The theory of traffic flow on roundabouts", Australian Road Research Board, 11/1984
- [TROUTBE] Troutbeck R.J.
"Does gap-acceptance theory adequately predict the capacity of a roundabout?", Proc. 12th ARRB Conf. 12(4), pp. 62-75
- [VSS640135] Vereinigung Schweizer Strassenfachleute
Norm SN 640 135, Linienführung Mittelstreifenüberfahrten, VSS Zürich, 1996
- [VSS640263] Vereinigung Schweizer Strassenfachleute
Norm SN 640 263, Knoten mit Kreisverkehr, VSS Zürich, 1999
- [VSS640847] Vereinigung Schweizer Strassenfachleute
Norm SN 640 847, Signale, Anordnung an Kreisverkehrsplätzen, VSS Zürich, 1999
- [VRV69] Verkehrsregelverordnung von 13. November 1962 (Stand am 23. August 2005), erlassen durch den Bundesrat der Schweiz, Werk Nr. 741.11 der Sammlung der Gesetzestexte
- [WARKEN02] Warken Elmar
"Delphi 6", Eddison-Wesley Verlag, München, 2002
- [WU94] Wu N.
"An approximation for the distribution of queue length at unsignalized intersections", 2nd International Symposium of Highway Capacity, Sydney, 1994

Anhänge

A 1 Begriffsdefinitionen

Im diesem Dokument werden nachfolgende Begriffe verwendet:

Begriff	Definition
Kreisverkehr	Verkehrsablauf auf dem Kreisel
Kreisel	Kreisfahrbahn ohne Zubringer aber mit Ein- und Ausfahrbereich
Zubringer	Anschlussstrassen an den Kreisel mit ein- oder mehrspuriger Ein- und Ausfahrten
Zufahrtsbereich	Ein- oder mehrstreifige Fahrbahn und Stauraum vor dem Kreisfahrbahnrand
Einfahrt	Ein- oder mehrstreifige Fahrbahn vor dem Rand der Kreisfahrbahn
Ausfahrt	Ein- oder mehrstreifige Fahrbahn nach dem Rand der Kreisfahrbahn
Einfahren	Verknüpfung der Verkehrsströme der Einfahrt und der Kreisfahrbahn (Einfädeln)
Ausfahren	Entflechtung der Verkehrsströme der Kreisfahrbahn in die Ausfahrt (Ausfädeln)
Fahrstreifen	Verkehrsfläche für den fließenden Verkehr eines Verkehrsstromes
Zeitlücke	Zeitlicher Abstand (Lücke) zwischen zwei direkt aufeinander folgenden Fahrzeugen. Zeitlücken auf der Kreisfahrbahn sind für die Einfahrtsentscheidung relevant. Mithilfe der Hyperlangverteilung werden die Zeitlücken der in die Simulation eintretenden Fahrzeuge ermittelt. Diese bestimmt somit näherungsweise die Verteilung der Zeitlücken der Einfahrt.
Grenzzeitlücke	Minimale Zeitlücke im vortrittsberechtigten Verkehrsstrom aus Sicht des einfahrenden Fahrzeuges, welche noch zu einer Einfahrtsentscheidung führt.
Folgezeitlücke	Minimale Zeitlücke im vortrittsberechtigten Verkehrsstrom aus Sicht eines Folgefahrzeuges, welche noch zu einer Einfahrtsentscheidung führt.
Verkehrszusammensetzung	Aufteilung der Verkehrsstärke nach Fahrzeugtypen (PW, LW, MR, etc.)
Fahrzeugtyp	Gruppierung von Fahrzeugen mit ähnlichen Merkmalen (Grösse, Verhalten, etc.), z.B. PW, LW, etc.
Verkehrsstärke	Menge der Fahrzeuge pro Zeiteinheit (Fz/h oder Fz/Zeiteinheit)
Fahrstreifenwechsel	Wechsel eines Fahrzeuges vom aktuell befahrenen in den benachbarten Fahrstreifen des Zubringers oder der Kreisfahrbahn
Freier Verkehrsablauf	Fahrzeuge werden durch das vorausfahrende Fahrzeug nicht beeinflusst. Dieser Zustand wird bei genügend grossem Abstand erreicht.
Gebundener Verkehrsablauf	Fahrzeuge passen ihr Verhalten dem vorausfahrenden Fahrzeug an. Dieser Zustand wird bei Unterschreitung eines fahrzeugindividuellen Abstandes erreicht.
Teilgebundener Verkehrsablauf	In dem Verkehrsstrom befinden sich freie und gebundene Fahrzeuge

Quelle	Startpunkt eines Fahrzeuges in der Modellierung des Verkehrsablaufes.
Senke	Endpunkt eines Fahrzeuges in der Modellierung des Verkehrsablaufes.

Tabelle 53: Begriffsdefinitionen

A 2 Herleitungen und Formeln

A 2.1 Darstellung des Verkehrssystems Kreisel als abstrakte Skizze

A 2.1.1 Kreisel

Die Grössen zur Darstellung des Kreisels werden wie folgt hergeleitet:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{abs}}[\mathbf{m}]: & \text{Zubringerwinkel absolut} \\ & = \gamma_{\text{abs}}[\mathbf{m}-1] + \gamma_{\text{rel}}[\mathbf{m}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}[\mathbf{n}]: & \text{Radius der Fahrstreifen:} \\ & = \mathbf{r}[\mathbf{n}-1] + \mathbf{bK}[\mathbf{n}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}: & \text{Radius Aussenrand:} \\ & = \mathbf{d}/2 \end{aligned}$$

A 2.1.2 Zubringer

Die Grössen zur Darstellung des Zubringers werden nachfolgend erläutert:

$$\begin{aligned} \mathbf{ZFwink}: & \text{Zubringerwinkel} \\ & = \gamma_{\text{rel}}[\mathbf{m}] + \delta[\mathbf{m}] + \text{Pi}/2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Mk}: & \text{Schnittpunkt der Zubringermitte mit dem Kreisel} \\ & = \text{Kreispunkt}^{93} (\mathbf{M}, \mathbf{d}/2, \gamma_{\text{abs}}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Mg}: & \text{Schnittpunkt der Zubringermitte mit dem Ende der Insel} \\ & = \text{Kreispunkt} (\mathbf{M}, \mathbf{d}/2 + \mathbf{li}, \gamma_{\text{abs}}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Me}: & \text{Beginn der Zubringermitte bei der Quelle} \\ & = \text{Kreispunkt} (\mathbf{M}, \mathbf{d}/2 + \mathbf{g}, \gamma_{\text{abs}}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Ik}_{1,2}: & \text{Schnittpunkte Inselaussenseite mit Kreisel} \\ & = \text{Kreispunkt} (\mathbf{M}, \mathbf{d}/2, \gamma_{\text{abs}} \pm \delta_{\text{rel}}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Ie}_{1,2}: & \text{Endpunkte der Insel} \\ & = \text{Kreispunkt} (\mathbf{Mg}, \mathbf{bi}_2/2, \gamma_{\text{abs}} \pm 90^\circ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Zg}: & \text{Endpunkt der Aussenseite der Einfahrt vor der Inselaufweitung} \\ & = \text{Kreispunkt} (\mathbf{Mg}, \text{Summe}(\mathbf{bz1}:\mathbf{bzn}), \gamma_{\text{abs}} + 90^\circ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Zi}: & \text{Endpunkt der Aussenseite der Einfahrt vor dem Einfahrtsbogen} \\ & = \text{Kreispunkt} (\mathbf{Mg}, \text{Summe}(\mathbf{bz1}:\mathbf{bzn}), \gamma_{\text{abs}} + 90^\circ - \text{atan}((\mathbf{bi}_1 - \mathbf{bi}_2)/\mathbf{li})) \end{aligned}$$

⁹³ Kreispunkt ist eine Funktion um die Koordinaten eines Punktes relativ zu einem Referenzpunkt zu bestimmen.

Zk: Schnittpunkt der Aussenseite der Einfahrt mit dem Kreisel

$$h = \frac{dMy \cdot dr - 2 \cdot dMy \cdot Mx \cdot dMx - 2 \cdot My \cdot dMx^2}{2 \cdot dMx^2}$$

$$Zky = h \pm \sqrt{h^2 - \frac{dr^2}{4 \cdot dMx^2} - \frac{dr \cdot Mx}{2 \cdot dMx} - Mx^2 - My^2 - r^2}$$

$$Zkx = \frac{dMy}{dMx} \cdot Zky + \frac{dr^2}{2 \cdot dMx}$$

wobei:

$$dMx = Mx - M_{zx}$$

$$dMy = My - M_{zy}$$

$$dr = r^2 - r_z^2$$

Ze: Beginn der Aussenseite der Einfahrt (kürzester Fahrstreifen)

= Kreispunkt (M, d/2+min(lz1:lzn), γ_{abs})

Mz: Mittelpunkt des Einfahrtbogens

= Kreispunkt (M, aMz, ϵ)

MZng: Endpunkt der n-ten Fahrstreifentrennlinie der Einfahrt vor der Inselaufweitung (wobei n maximal FZ1 -1 sein kann)

= Kreispunkt (Mg, Summe(bz1:bn), $\gamma_{abs} + 90^\circ$)

MZni: Endpunkt der n-ten Fahrstreifentrennlinie der Einfahrt vor dem Einfahrtbogens (wobei n maximal FZ1 -1 sein kann)

= Kreispunkt (Mg, Summe(bz1:bn), $\gamma_{abs} + 90^\circ - \text{atan}((bi1-bi2)/li)$)

MZnk: Schnittpunkt der n-ten Fahrstreifentrennlinie der Einfahrt mit dem Kreisel

= Kreispunkt (M, r, $\gamma_{abs} + \text{Kreiswinkel}(\delta_{rel}, \epsilon_{rel}, 1) / k * n$)

EZnk: Einfahrtspunkt der n-ten Fahrstreifen in den Kreisel

= Mittelpunkt zwischen MZnk und MZn+1k.

MZne: Endpunkt der n-ten Fahrstreifentrennlinie der Einfahrt

= Kreispunkt (M, d/2+lzn+1, γ_{abs})

Zne: Punkt der n-ten Aufgabelung der Einfahrt

= Kreispunkt (MZne, 2*bn+1, γ_{abs})

Zze: Endpunkt der längsten Einfahrt

= Kreispunkt (Me, max(bz1:bn), $\gamma_{abs} + \pi/2$)

MZna: n-ter Aufspaltungspunkt der Fahrstreifen der Einfahrt

= Kreispunkt (Zne, bn, $\gamma_{abs} - \pi/2^\circ$)

Je nach Aufspaltung der Einfahrt (AUZn) wird die Fahrstreifentrennlinie gezeichnet:

rechts: Verbinden von Zne mit MZne.

links: Verbinden von MZna mit MZne

mitte: keine Verbindung

A 2.1.3 Fussgängerstreifen

Folgende Berechnungen sind für den Fussgängerstreifen notwendig:

MFk: Kreiseseitiger Startpunkt des FGS an der Mittelachse des Zubringers

= Kreispunkt (M, d/2+af, γ_{abs})

MFz: Zubringerseitiger Endpunkt des FGS an der Mittelachse des Zubringers
 = Kreispunkt (M, $d/2+af+bf$, γ_{abs})

bif1: Breite der Insel bei Anfang des Fussgängerstreifens
 = $(b1-b2 + b1*li - b2*li - af*b1+af*b2) / li$

bif2: Breite der Insel am Ende des Fussgängerstreifens
 = $(b1-b2 + b1*li - b2*li - af*b1+af*b2 - bf*b1 + bf*b2) / li$

bsz: Breite eines Streifens in der Einfahrt
 = $\text{Summe}(bz1:bn) / 9 / Zn$

Ee1_n, Ee2_n: Eckpunkte eines Streifens auf Seite des Zubringers
 = Kreispunkt(MFz, $bif2 + n*bsz$, $\gamma_{abs} + 90^\circ$), bzw. Kreispunkt(MFz, $bif2 + (n+1)*bsz$, $\gamma_{abs} + 90^\circ$)

Ek1_n, Ek2_n: Eckpunkte eines Streifens auf Seite des Kreisels
 = Kreispunkt(MFk, $bif1 + n*bsz$, $\gamma_{abs} + 90^\circ$), bzw. Kreispunkt(MFk, $bif1 + (n+1)*bsz$, $\gamma_{abs} + 90^\circ$)

A 2.1.4 Busspur

Alle Punkte werden aus einer Verschiebung der Begrenzungspunkte des äussersten Fahrstreifens der Einfahrt um die Breite der Busspur bb ermittelt.

Z.B.: $Zgb = \text{Kreispunkt}(Zg, bb, \gamma_{abs} + 90^\circ)$

MZzzb: Einfahrtspunkt in die Busspur
 = Kreispunkt (Zzzb, $bz1$, $ZFwink - \pi/2$);

A 2.1.5 Tramlinie

Folgende Berechnungen sind für Tramlinien notwendig:

TP_n: Endpunkt der Tramschiene
 = Kreispunkt(M, TRA_n , TRW_n)

TPr_n, TPl_n: Projizierte Verbindungspunkte der Tramschienen

$TPr_n = \text{Kreispunkt}(Tp_n, 1/\sin(\tau), \tau)$

$TPl_n = \text{Kreispunkt}(Tp_n, 1/\sin(\Pi-\tau), \Pi-\tau)$

TPM_n: Mittelpunkt des Kreisbogen
 = Kreispunkt (TPl_n , 4 , τ)

TPVl_n, TPVr_n, TPNl_n, TPNr_n: Anschlusspunkte gerade Schienen an Bogen.

$TPVl_n = \text{Kreispunkt}(TPl_n, 4*\cos(\phi_n+\Pi), \phi_n+\Pi)$

$TPVr_n = \text{Kreispunkt}(TPr_n, 4*\cos(\phi_n+\Pi), \phi_n+\Pi)$

$TPNl_n = \text{Kreispunkt}(TPl_n, 4*\cos(\phi_{n+1}), \phi_{n+1})$

$TPNr_n = \text{Kreispunkt}(TPr_n, 4*\cos(\phi_{n+1}), \phi_{n+1})$

A 2.2 Wichtige Attribute der Geometrieobjekte

Klasse TQuelle

Endpunkt der Fahrlinie (E) = Kreispunkt (Me , $\max(bz_1:bn) / 2$, $\gamma_{abs(z)} + \pi/2$)

Nachfolgendes Objekt = Gerade

Klasse TSenke

Startpunkt der Fahrlinie (S) = Kreispunkt (Me , $\max(ba_1:bn) / 2$, $\gamma_{abs(z)} + \pi/2$)

Klasse TGerade

Folgende Werte werden für die Gerade in der Einfahrt gespeichert:

Anzahl Fahrstreifen = AFz

Endpunkt der Fahrlinie (E_n) = Kreispunkt (Mg, Summe ($b_{z_1}:b_{z_{n-1}}$) + $b_{z_n}/2$, $\gamma_{abs(z)} + \pi/2$)

Startpunkt der Fahrlinie (S_n) = Kreispunkt (Me, $\max(b_{z_1}:b_{z_n}) / 2$, $\gamma_{abs(z)} + \pi/2$)

Nachfolgendes Objekt = Einfahrt

Vorgänger Objekt = Quelle

Folgende Werte werden für die Gerade in der Ausfahrt gespeichert:

Anzahl Fahrstreifen = AFa

Endpunkt der Fahrlinie (E_n) = Kreispunkt (Me, $\max(b_{a_1}:b_{a_n}) / 2$, $\gamma_{abs(z)} + \pi/2$)

Startpunkt der Fahrlinie (S_n) = Kreispunkt (Mg, Summe ($b_{a_1}:b_{a_{n-1}}$) + $b_{a_n}/2$, $\gamma_{abs(z)} + \pi/2$)

Nachfolgendes Objekt = Senke

Vorgänger Objekt = Ausfahrt

Dabei werden die Fahrlinien für jeden Fahrstreifen berechnet und gespeichert.

Klasse TZEinfahrt

Folgende Werte werden gespeichert:

Anzahl Fahrstreifen = AFz

Endpunkt der Fahrlinie (E_n) = Kreispunkt (Ik_2 , Summe ($b_{z_1}:b_{z_{n-1}}$) + $b_{z_n}/2$, $\gamma_{abs(z)} + \pi/2$)

Startpunkt der Fahrlinie (S_n) = Kreispunkt (Mg, Summe ($b_{z_1}:b_{z_{n-1}}$) + $b_{z_n}/2$, $\gamma_{abs(z)} + \pi/2$)

Nachfolgendes Objekt = Einfahrt

Vorgänger Objekt = Gerade

Dabei werden die Fahrlinien für jeden Fahrstreifen berechnet und gespeichert. Die Attribute für die Ausfahrt werden analog berechnet.

Klasse TBogen, TEinfahrt und TAusfahrt

Folgende Werte werden für eine Einfahrt gespeichert:

Anzahl Fahrstreifen = AFz

Endpunkt der Fahrlinie (E_n) = Kreispunkt (M, $d/2 + \text{Summe}(b_1:b_{n-1}) + b_n/2$, $\gamma_{abs(z+1)}$)

Startpunkt der Fahrlinie (S_n) = Kreispunkt (M, $d/2 + \text{Summe}(b_1:b_{n-1}) + b_n/2$, $\gamma_{abs(z)}$)

Nachfolgendes Objekt = Ausfahrt $K_{n(z+1)}$

Vorgänger Objekt = Ausfahrt $K_{n(z)}$

Überbreite Fahrbahn = üb

Dabei werden die Fahrlinien für jeden Fahrstreifen berechnet und gespeichert. Die Attribute für die Ausfahrt werden analog berechnet.

A 2.3 Formeln und Verteilungen für das Verhalten der Fahrzeuge

A 2.3.1 Hyperlang Verteilung nach Dawson

Die Zeitlücke der freien Fahrzeuge wird mit einer verschobenen Exponentialverteilung berechnet.⁹⁴

$$(8) \quad F_1(t) = e^{-(t-t_0)/(t_1-t_0)}$$

$$(9) \quad \text{Zeitlücke} = t_0 - (t_1 - t_0) \cdot \ln(Z)$$

Die Zeitlücke der abhängigen Fahrzeuge wird mit einer verschobenen Erlang-Verteilung berechnet:

$$(10) \quad F_2(t) = e^{-k(t-t_0)/(t_2-t_0)} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{k \cdot (t-t_0)^i / (t_2-t_0)^i}{i!}$$

$$(11) \quad \text{Zeitlücke} = \{-(t_2 - t_0) \cdot \ln(Z_1 \cdot Z_2) + 2 \cdot t_0\} / 2$$

Gesamtmodell:

$$(12) \quad F(t) = a \cdot F_1(t) + (1-a) \cdot F_2(t)$$

Wobei:	F(t):	Wahrscheinlichkeit dass t auftritt
	t ₀ :	minimale Zeitlücke
	t ₁ :	mittlere Zeitlücke zwischen freien Fahrzeugen
	t ₂ :	mittlere Zeitlücke zwischen abhängigen Fahrzeugen
	t:	Zeitlücke
	a:	Anteil freier Fahrzeuge
	k:	Index der Nichtzufälligkeit bei abhängigen Fahrzeugen
	F ₁ (t):	Wahrscheinlichkeit, dass t bei freien Fahrzeugen auftritt
	F ₂ (t):	Wahrscheinlichkeit, dass t bei abhängigen Fahrzeugen auftritt
	Z, Z ₁ , Z ₂ :	Gleichverteilte Zufallszahlen im Intervall [0,1[

A 2.3.2 Bestimmung des Fahrzeugtyps

Mit Hilfe einer Zufallszahl Z wird der Fahrzeugtyp, gemäss den eingegebenen Anteilen bestimmt:

$$(13) \quad \begin{array}{l} \text{FzTyp} = \\ \text{Typ 1:} \end{array} \quad 0 \leq Z < \text{Ant. Typ}_1$$

...

$$\text{Typ n:} \quad \sum_{i=1}^{n-1} \text{Ant. Typ}_i \leq Z < \sum_{i=1}^n \text{Ant. Typ}_i$$

Wobei:	FzTyp:	Typ des Fahrzeuges
	Ant. Typ _i :	Anteil der Fahrzeuge vom Typ i am gesamten Verkehrsaufkommen der Einfahrt ist
	Z:	Gleichverteilte Zufallszahl im Intervall [0,1[

⁹⁴ Alle Zeitlückenfunktionen stammen aus [MUNAVAR94] S. 55f.

A 2.3.3 Ermittlung einer Log-Normalen Zufallszahl

Um eine log-normalverteilte Zufallszahl zu erhalten wird folgende Formel angewendet⁹⁵:

$$(14) \quad ZN = \frac{1}{\sigma \cdot Z \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln Z - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}$$

wobei: ZN: Log-normalverteilte Zufallszahl
 σ, μ: Standardabweichung und Erwartungswert der Log-Normalverteilung
 Z Gleichverteilte Zufallszahl im Intervall [0,1[

A 2.3.4 Ermittlung des Fahrziels

Mithilfe einer Zufallszahl Z wird das Fahrziel ermittelt:

$$(15) \quad \text{Fahrziel} =$$

Ausfahrt 1:	0	≤	Z	<	Ant1
Ausfahrt 2 :	Ant 1	≤	Z	<	Ant2
Ausfahrt 3 :	Ant 2	≤	Z	<	Ant3
...					
Ausfahrt n :	Ant n-1	≤	Z	<	1

Wobei: Fahrziel: Fahrziel des Fahrzeuges
 Ant 1 = q_{R1} / q_Z
 ...
 Ant n = Ant n-1 + q_{Rn} / q_Z
 q_{Rn} = Ant_{FZT} * Anz FZ_{Rn}
 q_Z = Ant_{FZT} * Anz FZ_Z
 Ant_{FZT}: Anteil der Fahrzeuge vom Typ FZT in der Einfahrt
 Anz FZ_{Rn}: Anzahl der Fahrzeuge in der Einfahrt mit dem Fahrziel n
 Anz FZ_Z: Anzahl der Fahrzeuge in der Einfahrt
 Z: Gleichverteilte Zufallszahl im Intervall [0,1[

A 2.3.5 Fahrvermögen und Erfahrung

Das Fahrvermögen beeinflusst folgende Größen:

Reaktionsfaktor beim Bremsen und Beschleunigen (ra):

Bremsen ohne Bremslicht: ra = -(FuE + 20) / 240

Bremsen mit Bremslicht: ra = -(FuE + 5) / 20

Beschleunigen: ra = 2 * (FuE + 30) / 750

Einflussfaktor der Durchfahrtsbreite auf die Geschwindigkeit (ebv):

a = (FuE + 10) / 20

⁹⁵ Vgl. [BOHLEY92] S.419ff

A 2.3.6 Fahrzeugabstand

Abstandsangaben zwischen Fahrzeugen werden in Sekunden gemessen, weil für Entscheidungen immer auch die aktuelle Geschwindigkeit massgeblich ist. Der effektive und zeitliche Abstand lässt sich wie folgt in einander überführen:

$$(16) \quad d = s * v$$

$$(17) \quad s = d / v$$

wobei: d: Abstand in Metern
 s: Abstand in Sekunden
 v: Geschwindigkeit

Für die Berechnung des Abstandes zwischen zwei Fahrzeugen werden sämtliche vier möglichen Distanzen zwischen den zugewandten Eckpunkten der Fahrzeuge errechnet. Die kürzeste dieser Distanzen ist der Abstand zwischen den Fahrzeugen.

$$d = \min(\text{VL1.Abst}(\text{HL2}); \text{VL1.Abst}(\text{HR2}); \text{VR1.Abst}(\text{HL2}); \text{VR1.Abst}(\text{HR2}))$$

wobei: d: kleinster Abstand zwischen zwei Fahrzeugen
 VR1,VL1: vordere Ecken des 1. Fahrzeuges
 HR2,HL2: hintere Ecken des 2. Fahrzeuges

A 2.3.7 Fahrgeschwindigkeit bei gebundenem Verkehrsablauf

Die Fahrgeschwindigkeit wird in dieser Modellierung von der Veränderung des Abstandes abgeleitet:

$$(18) \quad a = z * d_{\text{abst}}$$

Beobachtungen des Autors⁹⁶ haben ergeben, dass die Wahrnehmung der Abstandsveränderung nicht linear ist (d.h. eine grosse Abstandsveränderung wird überproportional bewertet, und somit erfolgt eine grössere Beschleunigung als notwendig). In dieser Modellierung wird deshalb ein quadratischer Zusammenhang angenommen. Auch wird angenommen, dass der Effekt beim Bremsen stärker als bei der Beschleunigung auftritt, wahrscheinlich aus Sicherheitsüberlegungen der Fahrer.

$$(19) \quad a = z * d_{\text{abst}}^2$$

Daraus können folgende Formeln abgeleitet werden:

Beschleunigung:

$$(20) \quad \text{Ohne Bremslicht: } a(t) = z * ds_{\text{abst}}^2 / dt^2$$

$$(21) \quad \text{Mit Bremslicht: } a(t) = ds_{\text{abst}} / dt$$

wobei a maximal a_{max} oder b_{max} sein kann

Geschwindigkeit:

$$(22) \quad \text{Ohne Bremslicht: } g(t) = g(t-1) + z * ds_{\text{abst}}^2 / dt$$

⁹⁶ Systematische Beobachtungen an verschiedenen Kreiseln der Schweiz.

(23) Mit Bremslicht: $g(t) = g(t-1) + z \cdot ds_{\text{abst}}$

wobei: $g(t)$: Neue Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t
 $a(t)$: Neue Beschleunigung zum Zeitpunkt t
 ds_{abst} : Delta Abstand (in m/s)
 d_{abst} : Delta Abstand (in m)
 $g(t-1)$: Momentane Geschwindigkeit zum Zeitpunkt $t-1$ (in m/s)
 dt : Delta Zeit (in s)
 z : Reaktionsfaktor
 a : Beschleunigung des Fahrzeuges

Beim Bremsen ohne Bremslicht liefert ein Faktor zwischen $-1/8$ und $-1/12$, mit Bremslicht zwischen $-1/4$ und $-3/4$ realistische Ergebnisse, beim Beschleunigen ein Wert zwischen $1/15$ und $1/25$ (vgl. Kap. 4.4).

Diese Werte werden beim Erzeugen des Fahrzeuges zufällig ermittelt und qualifizieren das Können und die Erfahrung des Fahrers.

Dabei darf die aktuell gültige Maximalgeschwindigkeit des Streckenabschnittes oder des Fahrzeuges nicht überschritten werden.

A 2.3.8 Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Kurvenradius

Die Fahrgeschwindigkeit in der Kurve wird hauptsächlich durch die Fliehkraft begrenzt. Die Fliehkraft eines Fahrzeuges wird mit folgender Formel⁹⁷ beschrieben:

$$(24) \quad F'_z = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

wobei: F'_z : Fliehkraft
 m : Masse des Objektes
 v : Geschwindigkeit
 r : Kurvenradius

Beim Auflösen der Formel (24) nach der Geschwindigkeit v unter Berücksichtigung des

Parameters gFa bzw. gFz ($= \frac{F_{\text{max}}}{m \cdot g}$) ergibt sich folgende Abhängigkeit:

$$(25) \quad v_{\text{max}} = \sqrt{r \cdot \min(gFa, gFz) \cdot g}$$

wobei: v_{max} : maximale Kurvengeschwindigkeit
 gFa : maximale Querbeschleunigung des Fahrers
 gFz : maximale Querbeschleunigung des Fahrzeuges
 r : Kurvenradius
 g : Erdbeschleunigung (9.81 m/s^2)

A 2.3.9 Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Durchfahrtsbreite

Bei grosser Geschwindigkeit wirkt die Durchfahrt für den Fahrer schmaler, was zu einer überproportionalen Reduktion der Geschwindigkeit führt.

⁹⁷ Vgl. zum Beispiel [HAMMER83] S. 16

Daraus lässt sich folgende Formel ableiten:

$$(26) \quad v = v_{\max} \cdot a \cdot \sqrt{Db - Fzb}$$

wobei: v: neue Geschwindigkeit
 Db: Breite der Durchfahrt
 Fzb: Breite des Fahrzeuges
 a: Einflussfaktor (vgl. Kap.4.4)
 v_{max}: aktuelle Sollgeschwindigkeit (vgl. Kap. 0)

A 2.3.10 Beschleunigung

Branolte und Hotz haben folgende Verteilung für die „normale“ Beschleunigung und Verzögerung entwickelt⁹⁸:

$$(27) \quad a_{\text{beschl}} = a_{\text{max beschl}} - 0.07 \cdot v + 0.5 \cdot Z_n + 1.5 \cdot Z_g$$

Bei Lastkraftwagen und Lastzügen sieht sie folgendermassen aus:

$$(28) \quad a_{\text{beschl}} = a_{\text{max beschl}} - 0.07 \cdot v + 0.25 \cdot Z_n + 0.75 \cdot Z_g$$

wobei: a_{beschl}: Beschleunigung
 a_{maxbeschl}: maximale Beschleunigung
 v: Geschwindigkeit
 Z_n: (0.5,0.15) Normalverteilte Zufallsvariable
 Z_g: (0,1) Gleichverteilte Zufallsvariable

Die Kollisionszeit gemäss Rekersbrink kann wie folgt berechnet werden:

$$(29) \quad tk = -dx / dv$$

wobei: tk: Kollisionszeit
 dx: Nettoabstand zwischen zwei Fahrzeugen
 dv: Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Fahrzeuge

Das negative Vorzeichen ergibt sich aus der Definition der Geschwindigkeitsdifferenz: Nur wenn v₂ > v₁ ist, ergibt sich eine Annäherung der Fahrzeuge und somit eine Kollisionszeit.

Kurze Zeit vor dem Stillstand oder bei sehr geringem Abstand der Fahrzeuge wird die Beschleunigung des auffahrenden Fahrzeuges wie folgt berechnet:

$$(30) \quad a = v \cdot dv / dx$$

wobei: a: Beschleunigung
 v: aktuelle Geschwindigkeit
 dx, dv: aus Formel (29)

Vorraussetzung dafür ist eine negative Geschwindigkeitsdifferenz dv.

⁹⁸ Vgl. [MUNAWAR94] S.37

A 2.3.11 Erforderliche Bremsverzögerung

Die erforderliche Bremsverzögerung lässt sich wie folgt berechnen:

$$(31) \quad b_{\text{erf}} = \frac{v^2}{2 \cdot s}$$

Wobei: v: Aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeuges
s: Entfernung zur Stopposition

A 2.3.12 Aus- und einfahren in einen Verkehrsstrom

Zur Überprüfung ob ein Fahrzeug einen geraden Fahrstreifen vollständig verlassen hat, wird die Lage alle vier Eckpunkte bezüglich des Fahrstreifens betrachtet:

$$(32) \quad \begin{aligned} & \text{ccw}(\text{HL1}, \text{VL1}, \text{HL2}) * \text{ccw}(\text{HL1}, \text{VL1}, \text{VL2}) > 0 \text{ and} \\ & \text{ccw}(\text{HL1}, \text{VL1}, \text{HR2}) * \text{ccw}(\text{HL1}, \text{VL1}, \text{VR2}) > 0 \text{ and} \\ & \text{ccw}(\text{HR1}, \text{VR1}, \text{HL2}) * \text{ccw}(\text{HR1}, \text{VR1}, \text{VL2}) > 0 \text{ and} \\ & \text{ccw}(\text{HR1}, \text{VR1}, \text{HR2}) * \text{ccw}(\text{HR1}, \text{VR1}, \text{VR2}) > 0 \end{aligned}$$

wobei: VR1, VL1: vordere Ecken des 1. Fahrzeuges
HR1, HL1: hintere Ecken des 1. Fahrzeuges
HR2, HL2: hintere Ecken des 2. Fahrzeuges
HR2, HL2: hintere Ecken des 2. Fahrzeuges
ccw: bestimmt die die „Drehrichtung“ der Punkte (vgl. Kap. A 3.1)

Beim Einfahren in einen geraden Fahrstreifen gilt folgende Bedingung:

$$(33) \quad \begin{aligned} & \text{ccw}(\text{HL1}, \text{VL1}, \text{HL2}) * \text{ccw}(\text{HL1}, \text{VL1}, \text{VL2}) < 0 \text{ or} \\ & \text{ccw}(\text{HL1}, \text{VL1}, \text{HR2}) * \text{ccw}(\text{HL1}, \text{VL1}, \text{VR2}) < 0 \text{ or} \\ & \text{ccw}(\text{HR1}, \text{VR1}, \text{HL2}) * \text{ccw}(\text{HR1}, \text{VR1}, \text{VL2}) < 0 \text{ or} \\ & \text{ccw}(\text{HR1}, \text{VR1}, \text{HR2}) * \text{ccw}(\text{HR1}, \text{VR1}, \text{VR2}) < 0 \end{aligned}$$

Wobei: VR1, VL1: vordere Ecken des 1. Fahrzeuges
HR1, HL1: hintere Ecken des 1. Fahrzeuges
VR2, VL2: vordere Ecken des 2. Fahrzeuges
HR2, HL2: hintere Ecken des 2. Fahrzeuges
ccw: bestimmt die die „Drehrichtung“ der Punkte (vgl. Kap. A 3.1)

Befinden sich die Fahrzeuge auf einer Kreisfahrbahn gelten folgende Bedingungen für das Ausfahren aus einem Fahrstreifen:

$$(34) \quad \begin{aligned} & (\min(\text{VL1.Abst}(\text{M}), \text{VR1.Abst}(\text{M})) > \text{HL2.Abst}(\text{M}) \text{ and} \\ & \min(\text{VL1.Abst}(\text{M}), \text{VR1.Abst}(\text{M})) > \text{HR2.Abst}(\text{M}) \text{ and} \\ & \min(\text{VL1.Abst}(\text{M}), \text{VR1.Abst}(\text{M})) > \text{VL2.Abst}(\text{M}) \text{ and} \\ & \min(\text{VL1.Abst}(\text{M}), \text{VR1.Abst}(\text{M})) > \text{VR2.Abst}(\text{M})) \text{ or} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\max(\text{VL1.Abst}(\text{M}), \text{VR1.Abst}(\text{M})) < \text{HL2.Abst}(\text{M}) \text{ and} \\ & \max(\text{VL1.Abst}(\text{M}), \text{VR1.Abst}(\text{M})) < \text{HR2.Abst}(\text{M}) \text{ and} \\ & \max(\text{VL1.Abst}(\text{M}), \text{VR1.Abst}(\text{M})) < \text{VL2.Abst}(\text{M}) \text{ and} \\ & \max(\text{VL1.Abst}(\text{M}), \text{VR1.Abst}(\text{M})) < \text{VR2.Abst}(\text{M})) \end{aligned}$$

Wobei: M: Mittelpunkt des Kreisels
VR1, VL1: vordere Ecken des 1. Fahrzeuges
HR1, HL1: hintere Ecken des 1. Fahrzeuges
VR2, VL2: vordere Ecken des 2. Fahrzeuges
HR2, HL2: hintere Ecken des 2. Fahrzeuges

Nachfolgende Bedingungen gelten für das Einfahren in einen Fahrstreifen auf einer Kreisfahrbahn:

$$(35) \quad (\min(VL1.Abst(M), VR1.Abst(M)) < HL2.Abst(M) \text{ or } \min(VL1.Abst(M), VR1.Abst(M)) < HR2.Abst(M) \text{ or } \min(VL1.Abst(M), VR1.Abst(M)) < VL2.Abst(M) \text{ or } \min(VL1.Abst(M), VR1.Abst(M)) < VR2.Abst(M)) \text{ and}$$

$$(\max(VL1.Abst(M), VR1.Abst(M)) > HL2.Abst(M) \text{ or } \max(VL1.Abst(M), VR1.Abst(M)) > HR2.Abst(M) \text{ or } \max(VL1.Abst(M), VR1.Abst(M)) > VL2.Abst(M) \text{ or } \max(VL1.Abst(M), VR1.Abst(M)) > VR2.Abst(M))$$

Wobei: M: Mittelpunkt des Kreises
 VR1, VL1: vordere Ecken des 1. Fahrzeuges
 HR1, HL1: hintere Ecken des 1. Fahrzeuges
 VR2, VL2: vordere Ecken des 2. Fahrzeuges
 HR2, HL2: hintere Ecken des 2. Fahrzeuges

A 2.3.13 Abhängigkeit des Einschlagwinkels von der Fahrgeschwindigkeit

Diese Abhängigkeit kann mit folgender Funktion näherungsweise abgebildet werden:

$$(36) \quad \lambda = \frac{swma}{\left(\frac{v}{20}\right)^3}$$

Wobei: λ : Einschlagwinkel
 swma: maximaler Einschlagwinkel
 v: aktuelle Geschwindigkeit

A 2.3.14 Fahrlinie beim Einfahren in den Kreis

$$(37) \quad \lambda = \arctan\left(\frac{fzl}{2 \cdot rfe}\right)$$

$$(38) \quad rz = Abst(M, Mz) - (ri + \text{Summe}(bk_1:bk_{n-1}) + bk_n/2)$$

Wobei: λ : Einschlagwinkel
 fzl: Fahrzeuglänge
 rfe: Radius Einfahrtskreis des Fahrzeuges
 M: Mittelpunkt Kreis
 Mz: Mittelpunkt Einfahrtskreis
 ri: Radius des inneren Fahrbahnrandes des Kreises
 bk_n : Breite Fahrstreifen Kreisfahrbahn

Fahrzeuge, die von der Ideallinie abkommen, werden mit einem angepassten Einschlagwinkel wieder auf den richtigen Weg gebracht:

Abst(F0, Mz) > rfe:

Das Fahrzeug steht zu weit aussen für einen ‚normalen‘ Einfahrkreis. Deshalb wird der Einschlagwinkel λ im Verhältnis des effektiven Abstands zum Einfahrtsradius erhöht.

$$(39) \quad \lambda_{\text{neu}} = \lambda * \text{Abst}(F0, Mz) / rfe$$

Wobei: λ_{neu} : Neuer Einschlagwinkel
 F0: Position Fahrzeug
 Mz: Mittelpunkt Einfahrtskreis
 rfe: Radius Einfahrtskreis des Fahrzeuges

Dieser neue Einschlagwinkel wird solange beibehalten bis der Abstand (F0, Mz) dem Einfahrtsradius rfe wieder entspricht.

Abst (F0, Mz) = rfe:

Das Fahrzeug fährt mit dem Einschlagwinkel α in den Kreisel, bis es die Kreisfahrlinie erreicht.

$$(40) \quad ((ri + \text{Summe}(bk_1:bk_{n-1}) + bk_n/2) = \text{Abst}(F0, M))$$

Wobei: M: Mittelpunkt Kreisel
 F0: Position Fahrzeug
 ri: Radius des inneren Fahrbahnrandes des Kreisels
 bk_n : Breite Fahrstreifen Kreisfahrbahn

Abst (F0, Mz) < rfe:

Das Fahrzeug fährt geradeaus in den Kreisel ein, bis der Abstand (F0, Mz) dem Einfahrtsradius rfe entspricht.

A 2.3.15 Fahrlinie beim Ausfahren aus dem Kreisel

Für den Ausfahrradius wird folgende Formel verwendet:

$$(41) \quad rfa = \text{Abst}(M, Ma) - (rw + \text{Summe}(bk_1:bk_{n-1}) + bk_n/2)$$

Wobei: rfa: Radius Ausfahrtskreis des Fahrzeuges
 M: Mittelpunkt Kreisel
 Ma: Mittelpunkt Ausfahrtskreis
 ri: Radius des inneren Fahrbahnrandes des Kreisels
 bkn : Breite Fahrstreifen Kreisfahrbahn

Fahrzeuge, die von der Ideallinie abkommen, werden mit einem angepassten Einschlagwinkel wieder auf den richtigen Weg gebracht:

Abst(Ma, F0) > rfa:

Das Fahrzeug steht zu weit aussen für einen ‚normalen‘ Ausfahrtskreis. Deshalb wird der Einschlagwinkel λ im Verhältnis des effektiven Abstands zum Ausfahrtsradius erhöht:

$$(42) \quad \lambda_{\text{neu}} = \lambda * \text{Abst}(F0, Ma) / rfa$$

Wobei: λ_{neu} : Neuer Einschlagwinkel
 F0: Position Fahrzeug
 Ma: Mittelpunkt Ausfahrtskreis
 rfa: Radius Ausfahrtskreis des Fahrbahnrandes

Dieser neue Einschlagwinkel wird solange beibehalten bis der Abstand (F0, Ma) dem Ausfahrtsradius rfa entspricht.

Abst (F0, Ma) = rfa:

Das Fahrzeug fährt mit dem Einschlagwinkel λ aus dem Kreisel, bis es die Fahrlinie des Ausfahrtsstreifens erreicht hat ($\text{Abst}(F0, M) > r$ und $\text{Abst}(F0, Ma) = rfa$).

Abst (F0, Ma) < rfa:

Das Fahrzeug fährt geradeaus weiter, bis der Abstand (F0, Ma) dem Ausfahrtsradius rfa entspricht.

A 2.3.16 Fahrlinie beim Ausfahren aus überbreiten Kreiseln

Das Fahrzeug reduziert den Einschlagwinkel bis es die äussere Fahrlinie erreicht hat, d.h. der Abstand zum Fahrbahnrand dem Mindestabstand entspricht.

$$(43) \quad \text{Abst} = \text{Max} (\text{Abst} (\text{VR}, \text{M}), \text{Abst} (\text{HR}, \text{M})) - r$$

Wobei: Abst: Abstand zum Fahrbahnrand
 Abst(): Funktion zur Berechnung des Abstands
 VR,HR: rechte Eckpositionen des Fahrzeuges
 M: Mittelpunkt des Kreisels
 r: Aussenradius des Kreisels

Anschliessend fährt es solange weiter bis

$$(44) \quad \text{Abst}(\text{Fa}, \text{Ma}) = rfa$$

Wobei: Abst(): Funktion zur Berechnung des Abstands
 Fa: Ausfahrendes Fahrzeug
 Ma: Mittelpunkt des Ausfahrkreises
 rfa: Radius der Ausfahrlinie

Von hier aus kann die Ausfahrt mit dem Einschlagwinkel λ beginnen (vgl.A 2.3.15).

A 2.3.17 Fahrlinie beim Überholen auf überbreiten Fahrbahnen

Der innere Fahrbahnrand ist erreicht wenn:

$$(45) \quad \text{Abst} = \text{Min} (\text{Abst} (\text{VL}, \text{M}), \text{Abst} (\text{HL}, \text{M})) - r$$

Wobei: Abst: Abstand zum Fahrbahnrand
 Abst(): Funktion zur Berechnung des Abstands
 VL,HL: linke Eckpositionen des Fahrzeuges
 M: Mittelpunkt des Kreisels
 r: Aussenradius des Kreisels

Anschliessend fährt es solange weiter bis der Ausfahrtpunkt Mk erreicht ist.

A 2.3.18 Fahrstreifen im Kreisel

Für die Wahl des Fahrstreifens im Kreisel lässt sich folgende Formel ableiten:

$$(46) \quad \text{ZFs} = \text{AFK} - d\text{Zuf} + 1$$

Wobei: ZFs: Zielfahrstreifen
 AFK: Anzahl Fahrstreifen der Kreisfahrbahn
 dZuf: Anzahl zu passierender Zubringer um zum Fahrziel zu gelangen

A 2.3.19 Fahrstreifen im Kreisel für die Ausfahrt

Die Bestimmung des Zielfahrstreifens im Kreisel für die Ausfahrt ist abhängig von der Anzahl der Fahrstreifen der Ausfahrt.

$$(47) \quad ZFs = \{n, \dots, (n - a)\}$$

Wobei n : Anzahl der Fahrstreifen im Kreis
 a : Anzahl der Fahrstreifen der Ausfahrt

Fährt ein Fahrzeug bereits auf einem Ausfahrstreifen, wird dieser beibehalten. Fährt ein Fahrzeug weiter innen im Kreis (Fahrstreifen 1, ..., $n - a - 1$) wird solange ein Fahrstreifenwechsel gemacht, bis der innerste Ausfahrstreifen erreicht ist (Fahrstreifen $n - a$).

A 2.3.20 Zeitlücken beim Einfahren in den Kreis

Zur Überprüfung der Einfahrt auf ein blockierendes Fahrzeug wird folgende Bedingung angewendet:

$$(48) \quad Fa < Mk \text{ or } Fa > Zk$$

Wobei: Fa : Winkel des Fahrzeuges Fa im Kreis
 Mk : Schnittpunkt der Mittellinie des Zubringers mit dem Aussenrand des Kreises
 Zk : Schnittpunkt des Aussenrands des Zubringers mit dem Kreis

Zur Berechnung der Zeitlücken der Fahrzeuge auf den Fahrstreifen wird folgende Formel verwendet:

$$(49) \quad \omega_n = \text{Winkeldifferenz (Fn.V, EZkn), ccw (Fn.H, Fn.V, M)}$$

$$(50) \quad ZLn = \omega_n * \text{Abst (Fn, M) / Fn.v}$$

Wobei: ω_n : Winkel zwischen Fahrzeug n und Einfahrpunkt
 $Fn.V$: Vorderkante Fahrzeug F_n
 $Fn.H$: Hinterkante Fahrzeug F_n
 $EZkn$: Einfahrpunkt Kreis der Einfahrt n
 ZLn : Zeitlücke zum Fahrzeug n
 M : Mittelpunkt des Kreises
 $Fn.v$: Geschwindigkeit des Fahrzeuges n
 ccw : Funktion zur Bestimmung der 'Drehrichtung' der Punkte (vgl. Kap. A 3.1)
 Winkeldifferenz: Funktion zur Berechnung der Differenz zweier Winkel (vgl. Kap. A 3.6)
 $\text{Abst}()$: Funktion zur Berechnung des Abstands

Ist der Winkel ω_n grösser als die maximale Sichtweite im Kreis (σ) wird das Fahrzeug nicht berücksichtigt ($ZLn = \infty$).

Zur Berechnung der Zeitlücke zum ersten Fahrzeug (F_c) in der Einfahrt links werden folgende Formeln verwendet:

$$(51) \quad \mu_n = \text{Winkeldifferenz (EZs-1k, EZkn, ccw (Fbn.H, Fbn.V, M)}$$

$$(52) \quad ZLz = (\mu_n * \text{Abst (EZks, M) + Abst (Fn.V, EZkn-1)) / Fn.v}$$

Wobei: μ_n : Winkel zwischen Einfahrt $s-1$ und Einfahrpunkt
 $Fn.V$: Vorderkante Fahrzeug F_n
 $Fn.H$: Hinterkante Fahrzeug F_n
 $EZkn$: Einfahrpunkt Kreis der Einfahrt n
 $EZkn-1$: Einfahrpunkt Kreis der Einfahrt $n-1$
 ZLz : Zeitlücke zum Fahrzeug n in der Einfahrt links
 M : Mittelpunkt des Kreises
 $Fn.v$: Geschwindigkeit des Fahrzeuges n

- ccw: Funktion zur Bestimmung der 'Drehrichtung' der Punkte (vgl. Kap. A 3.1)
 Winkeldifferenz: Funktion zur Berechnung der Differenz zweier Winkel (vgl. Kap. A 3.6)
 Abst(): Funktion zur Berechnung des Abstands

Ist der Abstand des Fahrzeuges F_n zum Einfahrtspunkt EZ_{kn-1} grösser als die mittlere Sichtweite in die Einfahrt (sl) wird das Fahrzeug nicht berücksichtigt ($ZLz = \infty$).

A 2.4 Formeln zur Beschreibung des Verhalten von Fussgängern und Trams

A 2.4.1 Zeitlücken

Zeitlücken zwischen Fussgängern und Trams werden mit folgender Formel⁹⁹ berechnet:

$$(53) \quad ZL = \frac{1}{\sigma\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(Z-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}$$

- Wobei: ZL: Zeitlücke
 Z: gleichverteilte Zufallsvariable
 σ : Standardabweichung der Normalverteilung
 μ : Mittelwert der Normalverteilung

A 2.4.2 Strassenseite

Für die Bestimmung der Strassenseite des Fussgängers wird folgende Formel verwendet:

$$(54) \quad \begin{array}{l} \text{SsFG} = \\ \text{Einfahrt:} \quad 0 \leq z < 0.5 \\ \text{Ausfahrt:} \quad 0.5 \leq z < 1 \end{array}$$

- Wobei SsFg: Strassenseite für Start des Fussgängers
 z: gleichverteilte Zufallszahl

A 2.4.3 Zeitlücken der Fahrzeuge vor dem Fussgängerstreifen

Aufgrund folgender Prüfung wird die Entscheidung zum Eintritt in die Fahrbahn gefällt:

$$(55) \quad ZLFG < \text{Abst}(F_0, FGS) / v_{Fz0}$$

- Wobei: ZLFG: individuelle normalverteilte Zeitlücke des Fussgängers
 F_0 : letztes Fahrzeug vor dem Fussgängerstreifen
 FGS: Fussgängerstreifen
 v_{Fz0} : Geschwindigkeit des Fahrzeuges F_0

⁹⁹ Vgl. [BOLEY92] S. 395ff

A 2.4.4 Startpunkte der Fussgänger

Zur Berechnung der Position der Startpunkte der Fussgänger wird folgende Formel verwendet:

$$(56) \quad \text{FGS}_z = \text{Kreispunkt} (\text{Kreispunkt} (\text{MFk}, \text{bf}/2, \gamma_{\text{abs}}), (\text{bif1}+\text{bif2})/2 + \text{Summe} (\text{bz1}:\text{bzn}), \gamma_{\text{abs}}+\pi/2)$$

$$(57) \quad \text{FGS}_a = \text{Kreispunkt} (\text{Kreispunkt} (\text{MFk}, \text{bf}/2, \gamma_{\text{abs}}), (\text{bif1}+\text{bif2})/2 + \text{Summe} (\text{ba1}:\text{ban}), \gamma_{\text{abs}}-\pi/2)$$

Wobei:	FGS _z :	Startpunkt Fussgänger der Einfahrt
	FGS _a :	Startpunkt Fussgänger der Ausfahrt
	MFk:	Mittelpunkt des Fussgängerstreifens auf Seite des Kreisels
	bf:	Breite des Fussgängerstreifens
	γ_{abs} :	Zubringerwinkel
	bif1, bif2:	Breiten der Mittelinsel
	bz1 .. bzn:	Breite der Fahrstreifen der Einfahrt
	ba1.. ban:	Breite der Fahrstreifen der Ausfahrt

A 2.4.5 Erreichen des Fahrbahnrandes

$$(58) \quad \text{Abst}(\text{FGS}_{\text{st}}, \text{FG0}) \geq \text{Summe} (\text{bz1}:\text{bzn})$$

Wobei	FGS _{st} :	Startpunkt des Fussgängers
	FG0:	Aktuelle Position des Fussgängers
	bz1:bzn:	Breite der Ein- oder Ausfahrten 1 bis n

A 3 Generelle Funktionen und Formeln

A 3.1 Funktion ccw (A, B, C)

Ccw ist eine Funktion, welche für die drei Punkte A, B und C bestimmt, ob sie sich, wenn sie vom ersten zum zweiten und dann zum dritten Punkt gehen, gegen den Urzeigersinn bewegen oder nicht (also im Urzeigersinn). Sie liefert den Wert -1 für im Urzeigersinn und 1 für gegen den Urzeigersinn. Falls die Punkte kollinear sind, wird 0 zurückgegeben.

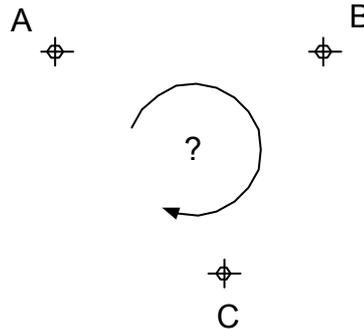


Abbildung 110: Prüfung der Drehrichtung der Punkte

- (59) Wenn $(B.x - A.x) * (C.y - A.y) > (B.y - A.y) * (C.x - A.x)$
 $Ccw = 1$
 Wenn $(B.x - A.x) * (C.y - A.y) < (B.y - A.y) * (C.x - A.x)$
 $Ccw = -1$
 Wenn $(B.x - A.x) * (C.y - A.y) = (B.y - A.y) * (C.x - A.x)$
 $Ccw = 0$

Wobei A, B, C: Punkte im zweidimensionalen Raum
 .x: X-Koordinate eines Punktes
 .y: Y-Koordinate eines Punktes

A 3.2 Funktion Winkel_ncw (W1, W2)

Die Funktion Winkel_ncw berechnet den Winkel im Gegenuhrzeigersinn zwischen den beiden Winkeln W1 und W2.

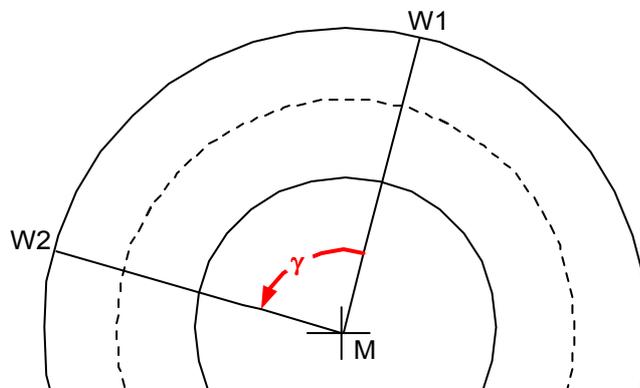


Abbildung 111: Berechnung des Winkels zwischen W1 und W2 im Gegenuhrzeigersinn

- (60) Wenn $W1 > W2$
 $Winkel_ncw = 2 * Pi + W1 + W2$
 Wenn $W1 \leq W2$
 $Winkel_ncw = W2 - W1$
- Wobei $W1, W2$: Winkel im radial System
 Pi : Kreiskonstante (3.1415)

A 3.3 Funktion $ZL_fz (FzA, FzB, v)$

Die Funktion ZL_fz berechnet den zeitlichen Abstand zwischen zwei Fahrzeugen unter Berücksichtigung des Minimalabstandes. Falls die Fahrzeuge in unterschiedlichen Fahrstreifen sind, wird nur der Abstand auf dem Fahrrichtungsvektor(v) gemessen.

In der Modellierung ist im Moment die Zeitlückensuche nur relevant beim Ausfahren aus dem Kreislauf, wenn in einen neuen Fahrstreifen gewechselt werden muss. Dadurch kann die Berechnung der Zeitlücke auf die Fahrstreifen im Kreislauf beschränkt werden.

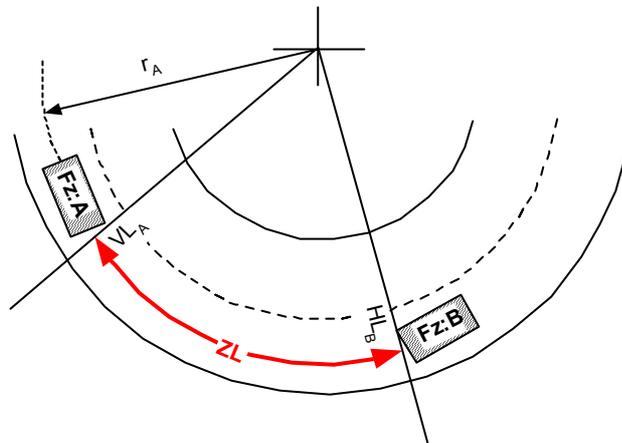


Abbildung 112: Ermittlung der Zeitlücke

- (61) $ZL_fz = Winkel_ncw(VLA,HLB) * rA / v$
- Wobei VL_A : Punkt vorne links von Fahrzeug A
 HL_B : Punkt hinten links von Fahrzeug B
 r_A : Radius Fahrkreis Fahrzeug A
 v : Geschwindigkeit
 $Winkel_ncw$: Winkel im Gegenuhrzeigersinn (vgl. Kap. A 3.2)

A 3.4 Funktion getprevFz (EZkn)

Es wird das Fahrzeug gesucht, welches gegen die Fahrrichtung das nächste vor dem Einfahrtspunkt EZkn ist.

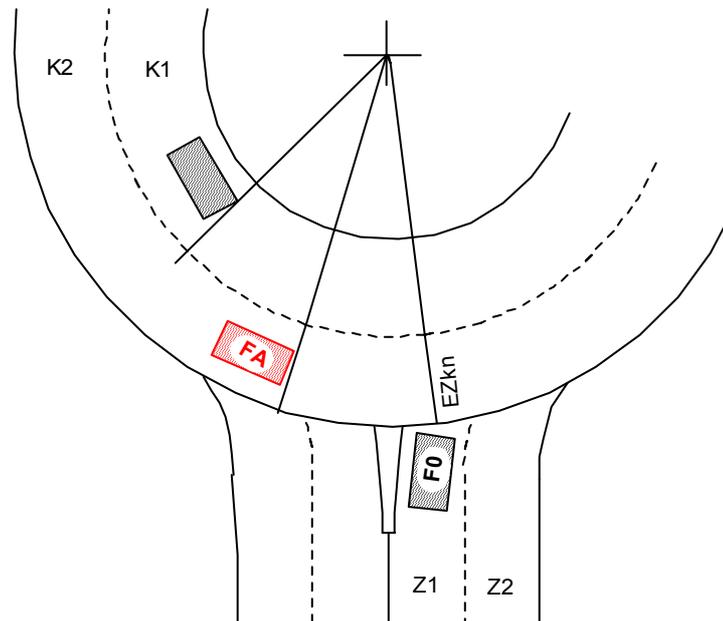


Abbildung 113: Ermittlung des nächsten Fahrzeuges vor dem Einfahrtspunkt

(62) \forall Fahrzeuge in der Kreisfahrbahnliste FZ1 bis FZn:
 $Fz = \text{Min} (\text{Winkeldifferenz} (\text{Kreiswinkel} (EZks, M), \text{Kreiswinkel} (FZn.V)), \text{ccw} (\text{Fn.H}, \text{Fn.V}, M))$

Wobei: Fz: Fahrzeug ID des gefundenen Fahrzeuges
 Fn.V: Vorderkante Fahrzeug Fn
 Fn.H: Hinterkante Fahrzeug Fn
 EZkn: Einfahrtspunkt Kreis der Einfahrt n
 M: Mittelpunkt des Kreises

Falls das Fahrzeug blinkt, und den Fahrstreifen verlässt, wird das Fahrzeug übersprungen und weiter zurück gegen die Fahrrichtung gesucht.

A 3.5 Funktion Kreiswinkel (P, M)

Berechnet den absoluten Winkel im Kreis.

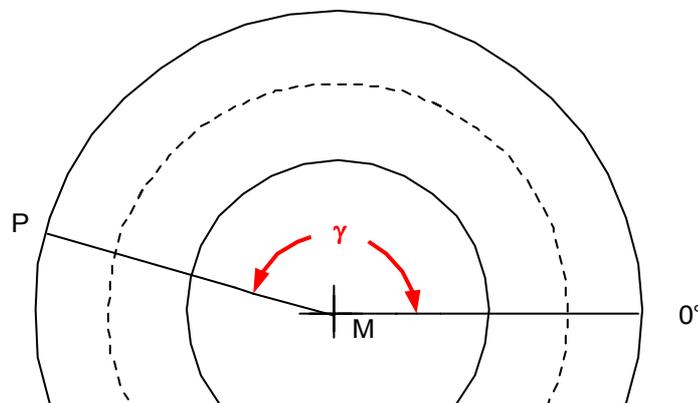


Abbildung 114: Berechneter Winkel der Funktion Kreiswinkel

(63) Wenn $P \neq M$:
 Kreiswinkel = $\arctan((P.Y - M.Y) / (P.X - M.X))$

Wobei: Kreiswinkel: Absoluter Winkel des Punktes P
 M: Mittelpunkt des Kreises
 P: Punkt auf dem Kreis

A 3.6 Funktion Winkeldifferenz (δ, γ, c)

Berechnet die Differenz richtungsabhängig ($c = 1$: im Uhrzeigersinn, $c = -1$: gegen den Uhrzeigersinn) zwischen zwei Winkeln.

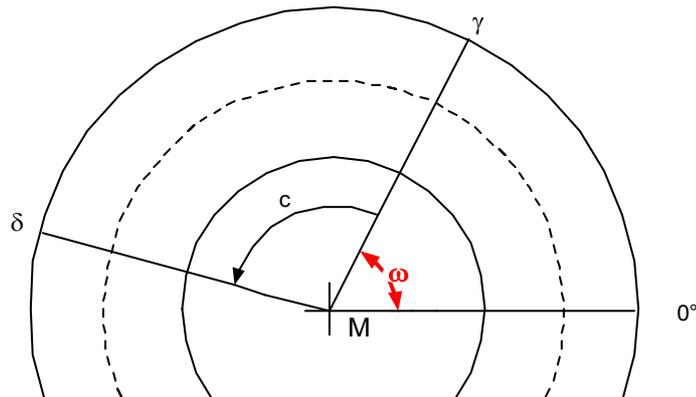


Abbildung 115: Berechneter der Winkeldifferenz

(64) Wenn $c = 1$:
 Wenn $\delta > \gamma$:
 Winkeldiff = $2 \cdot \pi + \gamma - \delta$
 Wenn $\delta \leq \gamma$:
 Winkeldiff = $\gamma - \delta$ Wenn $c = -1$:
 Wenn $\delta > \gamma$:
 Winkeldiff = $\gamma - \delta$
 Wenn $\delta \leq \gamma$:
 Winkeldiff = $\gamma - \delta - 2 \cdot \pi$

Wobei: Winkeldiff: Differenz zwischen den Winkeln
 δ, γ : Beliebige Winkel
 c: Richtung

A 4 Regeln zur Abbildung von Verkehrsabläufen

A 4.1 Modellierung des Fahrstreifenwechsels

A 4.1.1 Bestimmung des Fahrstreifens aufgrund des Fahrziels

Zur Bestimmung des Fahrstreifens in der Einfahrt werden entweder die Fahrstreifen-signalisation oder die Parameter des Zubringers verwendet:

1. Signalisation für Zubringer nicht definiert (Normalfall)
 - 1.1. Fahrzeug wählt Fahrstreifen gemäss Parametern des Zubringers.
2. Signalisation für Zubringer definiert (Ausnahmefall)
 - 2.1. Fahrzeug richtet sich nach Signalisation
 - 2.1.1. Fahrzeug wählt den Fahrstreifen gemäss Signalisation
 - 2.2. Fahrzeug richtet sich nicht nach Signalisation
 - 2.2.1. Fahrzeug wählt den Fahrstreifen gemäss Fahrziel

Somit ist sichergestellt, dass alle Fahrzeuge zu jedem Zeitpunkt während der Zufahrt einem Fahrstreifen zugeordnet sind.

Dieses Verhalten ist in der Modellierung als definierbare Regel hinterlegt und kann somit beliebig verändert werden.

A 4.1.2 Überprüfung der Zeitlücke auf Höhe des Fahrzeuges

Eine Zeitlücke wird als annehmbar angesehen, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Minimale Zeitlücke ist gegeben, d.h.:
 - $ZL_fz(A, B, v_A) > GZL$ and
 - $ZL_fz(A, 0, v_A) > GZL$ and
 - $ZL_fz(0, B, v_B) > \min \text{ Abst.}$

Wobei: ZL_fz : Funktion zur Berechnung des Abstandes der Fahrzeuge unter Berücksichtigung des Mindestabstandes (vgl. Funktionsbeschreibung Kap. 6.2.4)
 GZL : Minimale Zeitlücke im Verkehrsstrom, welche ein Fahrzeug benötigt, um einzufahren (Grenzzeitlücke). Diese wird individuell pro Fahrzeug ermittelt.

- 1.1. Geschwindigkeit v_0 ist grösser als Geschwindigkeit v_A
 - Bremsen bis v_A
 - und anschliessend Fahrstreifenwechsel
- 1.2. Geschwindigkeit v_0 ist gleich wie Geschwindigkeit v_A
 - Fahrstreifenwechsel
- 1.3. Geschwindigkeit v_0 ist kleiner als Geschwindigkeit v_A
 - Beschleunigen bis v_A
 - und anschliessend Fahrstreifenwechsel

2. Zeitlücke wird abgelehnt
→ Suche nach nächster Zeitlücke

A 4.1.3 Überprüfung der Zeitlücken weiter zurück im Verkehrsstrom

1. Es existiert eine Zeitlücke weiter zurück im Verkehrsstrom die grösser als die Minimalzeitlücke ist.
Prüfung, ob $ZL_{fz}(A_n, B_n, v_A) > ZL$
→ Verlangsamen (ohne Bremsen), um die zurückliegende ZL zu erreichen.
2. Es existiert keine Zeitlücke weiter zurück im Verkehrsstrom die grösser als die Minimalzeitlücke ist.
→ Fahrt im aktuellen Fahrstreifen fortsetzen und gegebenenfalls anhalten.

A 4.1.4 Fahrstreifenwechsel als Folgefahrzeug

Eine Folgezeitlücke wird als annehmbar angesehen, wenn folgende Bedingung gilt:

1. Minimale Zeitlücke ist gegeben, d.h.:
 $ZL_{fz}(A, B, v_A) > FZL + GZL$ and
 $ZL_{fz}(A, 0, v_A) > FZL$ and
 $ZL_{fz}(0, B, v_B) > \min \text{ Abst.} + GZL$

Wobei: ZL_{fz} : Funktion zur Berechnung des Abstandes der Fahrzeuge unter Berücksichtigung des Mindestabstandes (vgl. Funktionsbeschreibung Kap. 6.2.4)
 FZL : Minimale Zeitlücke im Verkehrsstrom, welche ein Fahrzeug benötigt, um als zweites Fahrzeug einzufahren (Folgezeitlücke). Diese wird individuell pro Fahrzeug ermittelt.
 GZL : Minimale Zeitlücke im Verkehrsstrom, welche ein Fahrzeug benötigt, um einzufahren. Dem Folgefahrzeug ist die Zeitlücke des vorausfahrenden Fahrzeuges nicht bekannt, deshalb verwendet es seine eigene Zeitlücke und projiziert sie auf das vorausfahrende Fahrzeug.

- 1.1. Geschwindigkeit v_0 ist grösser als Geschwindigkeit v_A
→ Bremsen bis v_A
und vorausfahrendes Fahrzeug den Fahrstreifen wechselt und anschliessend Fahrstreifenwechsel
- 1.2. Geschwindigkeit v_0 ist gleich wie Geschwindigkeit v_A
→ Warten bis vorausfahrendes Fahrzeug den Fahrstreifen wechselt und dann selber wechseln
- 1.3. Geschwindigkeit v_0 ist kleiner als Geschwindigkeit v_A
→ Warten bis vorausfahrendes Fahrzeug den Fahrstreifen wechselt und dann selber wechseln
2. Zeitlücke wird abgelehnt
 - 2.1. Vorausfahrendes Fahrzeug wechselt den Fahrstreifen
→ Suche nach nächster Zeitlücke (nicht mehr als Folgefahrzeug)
 - 2.2. Vorausfahrendes Fahrzeug wechselt nicht
→ weiterfahrt als abhängiges Fahrzeug

Curriculum Vitae

Name: Alexander Poeffel
Geburtstag: 11.01.1973
Geburtsort: Linz, Österreich
Nationalität: Österreich

08/1980 - 07/1993	Grund- und Mittelschule inklusive Matura in der Schweiz
10/1994 - 07/1998	Universität Zürich Wirtschaftsinformatikstudium Abschluss als Dipl. Inform. Richtung Wirtschaftsinformatik
09/1997 - 08/2000	Rentenanstalt/Swiss Life Projektleiter, Entwickler SAP Systeme
09/2000 - 01/2002	SAP AG Senior Consultant SAP Insurance
05/2002 - heute	P-con GmbH Geschäftsführer, Senior Consultant SAP
01/2003 - 06/2006	Institut für Informatik Universität Zürich Doktorandenstudium Unter Betreuung von Prof. Dr. H. Schauer