

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

BACHELOR-THESIS

---

**Entwicklung eines Simulationsprogramms  
zur Stautentstehung auf Grundlage des  
Nagel-Schreckenberg-Modells**

---

vorgelegt von

**Maurice Noll**

Matrikelnummer: 1095454

**Betreuer:** Prof. Dr. Thomas Gabel  
**Korreferent:** Prof. Dr. Christian Baun

Abgabedatum: 28. August 2017

## Zusammenfassung

Die Entstehung eines Verkehrsstaus erzeugt bei Autofahrern bereits seit vielen Jahren schlechte Laune. Oft fahren sie deshalb von der betroffenen Straße ab, nehmen einen großen Umweg in Kauf, verlieren zusätzlich wertvolle Zeit und kommen aufgrund dessen zu spät am gewünschten Zielort an. In dieser Arbeit wird untersucht, wie der legendäre „Stau aus dem Nichts“ entsteht und welche Faktoren besonderen Einfluss darauf haben. Dazu wurde ein Simulationsprogramm entworfen, das auf Grundlage des Nagel-Schreckenberg-Modells arbeitet und mit dem verschiedene Verkehrssituationen dargestellt, untersucht und abgespeichert werden können. Es bietet neben den individuell einstellbaren Parametern auch verschiedene Ansichten an, um den Stau sowohl in der Gesamtsituation als auch im Detail betrachten zu können. Eine wichtige Erkenntnis bei den durchgeführten Simulationsvorgängen war, dass das richtige Verhältnis von Beschleunigung, Verlangsamung und Rauschparameter ausschlaggebend dafür ist, ob ein einzelnes Fahrzeug den gesamten Verkehr zum Erliegen bringt oder eine Gleichverteilung der Fahrzeuge vorliegt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Einordnung des Themas	1
1.2	Aufgabenstellung	2
1.3	Aufbau der Arbeit	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Das Nagel-Schreckenberg-Modell	4
2.2	Literaturübersicht	8
2.3	Verkehrsdarstellung	9
<b>3</b>	<b>Design</b>	<b>12</b>
3.1	Aufbau des Simulationsprogramms	12
3.2	Zusätzliche Funktionsmöglichkeiten	17
3.3	Speicherung der Ergebnisse	19
<b>4</b>	<b>Implementierung</b>	<b>21</b>
4.1	Klassenstruktur	21
4.1.1	Klasse „Interface“	21
4.1.2	Klasse „Row“	23
4.1.3	Klasse „Vehicle“	25
4.2	Programmablauf	26
4.3	Berechnung der Fahrzeugpositionen	26
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>29</b>
5.1	Versuchsanordnung	29
5.2	Versuchsdurchführung	30
5.3	Simulationsergebnisse	35
5.4	Aussagekraft und Realitätsnähe	36
5.5	Grenzen des Simulationsprogramms	39

<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b> . . . . .	<b>41</b>
6.1 Zusammenfassung . . . . .	41
6.2 Ausblick . . . . .	42
<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	<b>44</b>
<b>Eidesstattliche Erklärung</b> . . . . .	<b>45</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Simulationsergebnis als Pixelgrafik . . . . .	10
2.2	Simulationsergebnis mit sichtbaren Fahrzeuggeschwindigkeiten . . . . .	11
3.1	Grafische Benutzeroberfläche . . . . .	12
3.2	Berechnungsschritte der Geschwindigkeit und Verfolgung . . . . .	17
3.3	Durchschnittswerte eines Zeitschritts . . . . .	18
4.1	Klassenstruktur . . . . .	21
4.2	Klasse „Interface“ . . . . .	22
4.3	Klasse „Row“ . . . . .	23
4.4	Klasse „Vehicle“ . . . . .	25
5.1	Extreme Verkehrssituationen im Vergleich . . . . .	30
5.2	Ergebnisse mit $a < b$ und niedrigen Parameterwerten . . . . .	31
5.3	Ergebnisse mit $a < b$ und durchschnittlichen Parameterwerten . . . . .	32
5.4	Ergebnisse mit $a > b$ und niedrigen Parameterwerten . . . . .	33
5.5	Ergebnisse mit $a = b$ und niedrigen Parameterwerten . . . . .	34

# 1 Einleitung

Viele Jahre lang war die Entstehung eines „Staus aus dem Nichts“ für die meisten Autofahrer ein großes ungelöstes Mysterium. Sie gerieten in einen stockenden Verkehr und nach kurzer Zeit wunderten sie sich, wie er sich von selbst wieder auflösen konnte, obwohl weder ein Unfall zu sehen war noch ein Fahrzeug die Fahrbahn blockiert hatte. Dieses Phänomen wird in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen und mithilfe des Nagel-Schreckenberg-Modells versucht zu erklären. Dieses Kapitel dient zur Einführung in das Thema dieser Arbeit. Nach einer kurzen Einordnung des Themas folgt eine Beschreibung der konkreten Aufgabenstellung. Anschließend erhält der Leser einen Überblick über den Aufbau dieser Arbeit.

## 1.1 Einordnung des Themas

Durch das hohe Verkehrsaufkommen ist es für viele Autofahrer alltäglich, auf Autobahnen und Landstraßen Staus zu beobachten. Es gibt wohl kaum jemanden, für den der Start in den Tag noch nicht mit dem Zeitfresser Stau begonnen hat. Jeder wird früher oder später in seinem Leben damit konfrontiert. Er tritt meistens genau dann auf, wenn man es besonders eilig hat und zur Arbeit kommen muss. Insbesondere in Großstädten ist ein Unfall, eine Verengung der Fahrspuren durch eine Baustelle oder stockender Verkehr häufig vorzufinden. Morgens und am späten Nachmittag im Berufsverkehr ist der Frust und Ärger der Autofahrer daher besonders groß. Das Fahren mit der Bahn oder dem Bus bietet zwar eine Alternative, ist für lange Strecken jedoch ungeeignet, da man mit dem Auto meistens eine kürzere Zeit unterwegs ist und sowohl Umstiege als auch Wartezeiten vermeiden möchte. Insbesondere Pendler verzichten ungern auf die Möglichkeit, schnell von A nach B zu gelangen. Zudem sind einige Arbeitnehmer wie beispielsweise Lieferdienste, Handwerker und die Müllabfuhr berufsbedingt auf ein Auto angewiesen. Für viele ist das Auto eines der wichtigsten Gegenstände, auf das sie auf keinen Fall verzichten möchten.

Lange Zeit war unklar, unter welchen Bedingungen ein Stau, insbesondere ein „Stau aus dem Nichts“, zustande kommt und welches Verhalten der Autofahrer dabei ausschlaggebend ist. Aus diesem Grund entwickelten Kai Nagel und Michael Schreckenberg 1992 das Nagel-Schreckenberg-Modell (NaSch-Modell) [1]. Die Physiker entwarfen elementare Regeln, nach denen sich der Straßenverkehr richtet. Dadurch können Voraussagen darüber getroffen werden, ob es in einer Verkehrssimulation mit ausgewählten Parametern des Modells zu einer Entstehung eines Staus kommt oder nicht. Mithilfe des Modells erhoffen sich die Wissenschaftler, die Realität so gut wie möglich abzubilden, damit entsprechende Vorkehrungen im Straßenverlauf getroffen werden können, um dem erhöhten Verkehrsaufkommen entgegenzuwirken und die Entstehung von Staus zukünftig zu vermeiden.

## 1.2 Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, auf Grundlage des Nagel-Schreckenberg-Modells ein Simulationsprogramm zu entwerfen, das eine ausgewählte Verkehrssituation darstellt und dabei eine mögliche Entstehung eines Staus untersucht. Zusätzlich erhält der Nutzer die Möglichkeit, sämtliche für eine Simulation relevanten Parameter individuell einstellen zu können und die Auswirkungen der Änderungen auf den Straßenverkehr zu beobachten. Durch die Vielzahl an Einstellungsmöglichkeiten kann durch mehrere Testversuche ermittelt werden, welches die ausschlaggebendsten Parameter des Modells sind und welche Bedingungen gegeben sein müssen, damit ein Stau zustande kommt und ob sich dieser von alleine auflösen kann oder der Verkehr völlig zum Erliegen kommt. Einfache Steuerelemente wie Schieberegler, Kontrollkästchen und Schaltflächen sollen für eine intuitive Bedienung des Programms sorgen. Die Simulationsergebnisse können zudem abgespeichert und in andere Dokumente eingebunden werden, um sie miteinander vergleichen und genauere Aussagen über den Straßenverkehr treffen zu können.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Im zweiten Kapitel sind die Grundlagen formuliert, auf denen diese Arbeit aufbaut. Die Funktionsweise und die einzelnen Bestandteile des Nagel-Schreckenberg-Modells stehen hierbei im Vordergrund. Eine Erklärung über den Aufbau und die Lesbarkeit der späteren Testergebnisse sorgt für eine bessere Nachvollziehbarkeit. Im dritten Kapitel folgt die Vorstellung des Designs des entworfenen Simulationsprogramms.

Ein Thema des Kapitels wird darauf eingehen, wie der Benutzer seine Simulationsergebnisse abspeichern kann, die er mithilfe des Programms erzeugt hat, in welchem Format die Daten anschließend vorliegen und wie sie in andere Dokumente für Veröffentlichungen eingebunden werden können. Nach der Vorstellung der Funktionsweise folgt eine Beschreibung der Implementierung des Programms im vierten Kapitel. Hier findet das Nagel-Schreckenberg-Modell konkret Anwendung, indem die Fahrzeugpositionen berechnet und ausgegeben werden. Im darauffolgenden fünften Kapitel spielt die Auswertung der Simulationsergebnisse eine zentrale Rolle. Dem Leser soll vor Augen geführt werden, welche die ausschlaggebendsten Parameter bei der Entstehung eines Staus sind und welche Aussagekraft die Ergebnisse liefern. Zudem wird ein Vergleich herangezogen, inwiefern die Simulation dem tatsächlichen Verkehrsfluss in der Realität entspricht. Abgerundet wird diese Arbeit im sechsten Kapitel durch eine Zusammenfassung und einem Ausblick.

## 2 Grundlagen

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau und die Funktionsweise des Nagel-Schreckenberg-Modells [1]. Durch Erklärungen für die Bedeutung der einzelnen Parameter in den Formeln des Modells soll eine bessere Nachvollziehbarkeit vermittelt werden. Eine zusätzliche Beschreibung für die Interpretierung und Lesbarkeit der Ausgabegrafiken unterstützt diesen Prozess.

### 2.1 Das Nagel-Schreckenberg-Modell

Die Grundform des Nagel-Schreckenberg-Modells (NaSch-Modell) beschreibt mithilfe von Formeln den Verkehrsfluss auf einer einspurigen Fahrbahn [1]. Dabei wird untersucht, unter welchen Umständen ein Stau zustande kommt. Überholvorgänge sind nicht möglich. Die Darstellung ist in sogenannte Zellen unterteilt. Befindet sich ein Fahrzeug in einer Zelle, ist sie mit einem schwarzen Rechteck oder einer anderen Kennzeichnung versehen. Eine leere Zelle kennzeichnet hingegen einen Abstand zum Vordermann. Das NaSch-Modell nimmt zudem zur Vereinfachung der Darstellung gegenüber einer realen Verkehrssituation an, dass alle Fahrzeuge gleich zu betrachten sind. Sie weisen die gleiche Fahrzeuggröße auf und sind bestrebt, die zugelassene Höchstgeschwindigkeit zu erreichen, sofern es die Verkehrssituation zulässt. Um Veränderungen in der simulierten Verkehrssituation betrachten zu können, ist sie in einzelne Zeitschritte unterteilt, die zeilenweise dargestellt werden. Ein Zeitschritt entspricht dabei einem Voranschreiten der Fahrzeuge innerhalb eines Zeitintervalls von einer Sekunde. In jedem Zeitschritt werden die Geschwindigkeiten aller Fahrzeuge bezogen auf die veränderte Situation neu berechnet. Dadurch können die Fahrer rechtzeitig auf unerwartete Veränderungen im Straßenverkehr sowohl mit Beschleunigen als auch mit Abbremsen reagieren. Die nachfolgenden vier Berechnungsschritte [1, S. 2222] beschreiben das Vorgehen der Geschwindigkeitsbestimmung und Positionierung eines Fahrzeugs im NaSch-Modell:

**1. Beschleunigung**

Ein Fahrzeug erhöht seine Geschwindigkeit  $v$  um eins, sofern es bislang nicht die Höchstgeschwindigkeit erreicht hat und der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug mindestens  $v + 1$  Einheiten beträgt.

**2. Unfallvermeidung**

Ist die Lücke zum Vordermann kleiner als die derzeitige Geschwindigkeit des Fahrzeugs, reduziert sich  $v$  auf den Abstandswert zum vorausfahrenden Fahrzeug. Somit sind Auffahrunfälle ausgeschlossen.

**3. Zufälliger Störeinfluss:**

Mit einer Wahrscheinlichkeit  $p$  reduziert sich die Fahrzeuggeschwindigkeit um eins, sofern es nicht bereits steht. Dieses Vorgehen repräsentiert das Ablenken des Fahrers durch den Beifahrer oder das Bedienen des Radios oder Navigationsgeräts.

**4. Berechnung der Fahrzeugposition:**

Das Fahrzeug fährt entsprechend seiner errechneten Geschwindigkeit so viele Zellen nach vorne.

Krauss hat sich das Grundprinzip des NaSch-Modells zunutze gemacht und es durch zusätzliche Parameter und Rechengänge erweitert, wodurch eine realitätsnähere Verkehrssituation erzeugt werden kann [2]. Die Simulationsergebnisse in dieser Arbeit basieren alle auf den Rechenvorschriften seiner Modellerweiterung. Zu den Parametern, die für die Berechnung notwendig sind, zählen unter anderem die Verkehrsdichte, die maximal zugelassene Höchstgeschwindigkeit, die Reaktionszeiten der Fahrer, der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und der einzuhaltende Sicherheitsabstand. Ein Rauschparameter, der mit einer zuvor festgelegten Wahrscheinlichkeit eintritt, symbolisiert eine unerwartete Geschwindigkeitsreduzierung des Vordermanns. Dadurch sind alle dahinter fahrenden Fahrzeuge gezwungen, auf die neue Situation zu reagieren. Dennoch kann es zu keinem Zeitpunkt zu einem Auffahrunfall kommen, da alle Fahrzeuge rechtzeitig reagieren und ihre Geschwindigkeit reduzieren. Die nachfolgenden vier Berechnungsschritte [2, S. 24] sind notwendig, um die neue Geschwindigkeit und die damit verbundene Position eines Fahrzeugs zu ermitteln:

**1. Unfallvermeidung:**

Berechnet die Geschwindigkeit, die maximal erreicht werden kann, bevor es zu einem Auffahrunfall kommt.

$$v_{safe}(t) = v_p(t) + \frac{g(t) - g_{des}(t)}{\tau_b + \tau} \quad (2.1)$$

**2. Erwünschte Geschwindigkeit:**

Ermittelt die tatsächliche Geschwindigkeit, die das Fahrzeug im nächsten Zeitschritt haben wird.

$$v_{des}(t) = \min[v_{max}, v(t) + a\Delta t, v_{safe}(t)] \quad (2.2)$$

**3. Zufälliger Störeinfluss:**

Mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit wird der Fahrer abgelenkt und verringert dadurch die berechnete Geschwindigkeit des Fahrzeugs im nächsten Zeitschritt.

$$v(t + \Delta t) = \max[0, v_{des}(t) - \eta] \quad (2.3)$$

**4. Berechnung der Fahrzeugposition:**

Berechnet mithilfe der vorherigen Position und der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Geschwindigkeit des Fahrzeugs die Position im darauffolgenden Zeitschritt.

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t \quad (2.4)$$

Tabelle 2.1 listet alle in den Berechnungsschritten vorkommenden Parameter auf und erläutert deren Bedeutung. Die ausgewählten Anfangswerte sind dem Krauss-Modell entnommen und in [3, S. 68 - 69] beschrieben.

**Tabelle 2.1:** Beschreibung der einzelnen Parameter des NaSch-Modells und deren Anfangswerte

Parameter	Anfangswert	Beschreibung
$v_p(t)$	0	Geschwindigkeit des Vorgängers
$g(t)$	-	Abstand zum Vorgänger
$g_{des}(t)$	$\tau \cdot v_p(t)$	Sicherheitsabstand
$\tau_b$	$\frac{v(t)+v_p(t)}{2b}$	Dauer bis zum Stillstand des Fahrzeugs
$b$	$0 < b \leq v_{max}$	maximale Verlangsamung
$\tau$	1 s	Reaktionszeit des Fahrers
$v_{max}$	$1 \leq v_{max} \leq 9$	Erlaubte Höchstgeschwindigkeit
$v(t)$	0	Fahrzeuggeschwindigkeit
$a$	$0 < a \leq v_{max}$	maximale Beschleunigung
$\Delta t$	1 s	Zeitschritt
$\eta$	$[0, a\epsilon]$	Gleichmäßig verteilte Zufallsmenge
$\epsilon$	$[0, 1]$	Rauschparameter
$x(t)$	-	Position des Fahrzeugs

Fügt man die einzelnen Rechenschritte 2.1, 2.2 und 2.3 für die Berechnung der Fahrzeuggeschwindigkeit im nächsten Zeitschritt zu einer Gesamtgleichung zusammen und ersetzt die Parameter durch deren in Tabelle 2.1 dargestellten Anfangswerte, erhält man das nachfolgende übersichtlichere Ergebnis:

$$\begin{aligned}
v(t + \Delta t) &= \max \left[ 0, \min \left[ v_{max}, v(t) + a\Delta t, v_p(t) + \frac{g(t) - g_{des}(t)}{\tau_b + \tau} \right] - \eta \right] \\
&= \max \left[ 0, \min \left[ v_{max}, v(t) + a\Delta t, v_p(t) + \frac{g(t) - \tau \cdot v_p(t)}{\frac{v(t)+v_p(t)}{2b} + \tau} \right] - \eta \right] \\
&= \max \left[ 0, \min \left[ v_{max}, v(t) + a \cdot 1s, v_p(t) + \frac{g(t) - v_p(t) \cdot 1s}{\frac{v(t)+v_p(t)}{2b} + 1s} \right] - \eta \right]
\end{aligned}$$

Durch diese Darstellung ist gut erkennbar, dass die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs im nächsten Zeitschritt nur einen von vier verschiedenen Werten annehmen kann.

Die Fahrzeuggeschwindigkeit

- bekommt den Wert Null zugewiesen, sofern das errechnete Ergebnis nach Abzug eines zufälligen Wertes durch  $\eta$  negativ ist. Das Fahrzeug kann dadurch nicht weiter fahren und muss warten, da vor ihm Fahrzeuge zu stark abgebremst haben oder bereits stehen.
- wird auf den maximal zu erreichenden Wert gesetzt. Dieser Fall tritt nur dann ein, wenn das Fahrzeug bereits die Maximalgeschwindigkeit erreicht hat, genügend Abstand zum Vordermann aufweist und theoretisch noch schneller fahren könnte als erlaubt ist.
- erhöht sich um den Wert des Beschleunigungsparameters. Hierfür ist die zugelassene Höchstgeschwindigkeit bislang nicht erreicht worden und der dafür notwendige Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug gegeben.
- setzt sich aus einer umfangreichen Formel zusammen, die den Abstand zum Vordermann, dessen Fahrzeuggeschwindigkeit und den Parameter für die maximale Verlangsamung mit einbezieht. Dadurch werden Auffahrunfälle vermieden und das Fahrzeug vorzeitig abgebremst.

Der Parameter  $\eta$  verlangsamt alle Fahrzeuge in jedem Zeitschritt um einen zufälligen Wert aus der Menge  $\eta \in [0, a\epsilon]$ . Dieser Vorgang entspricht dem zufälligen Ablenken des Fahrers durch den Beifahrer oder der fehlenden Konzentration beim Fahren. Der Wert des Rauschparameters  $\epsilon$  gilt für den gesamten Simulationsdurchlauf und ist zwischen null und eins beliebig wählbar.

## 2.2 Literaturübersicht

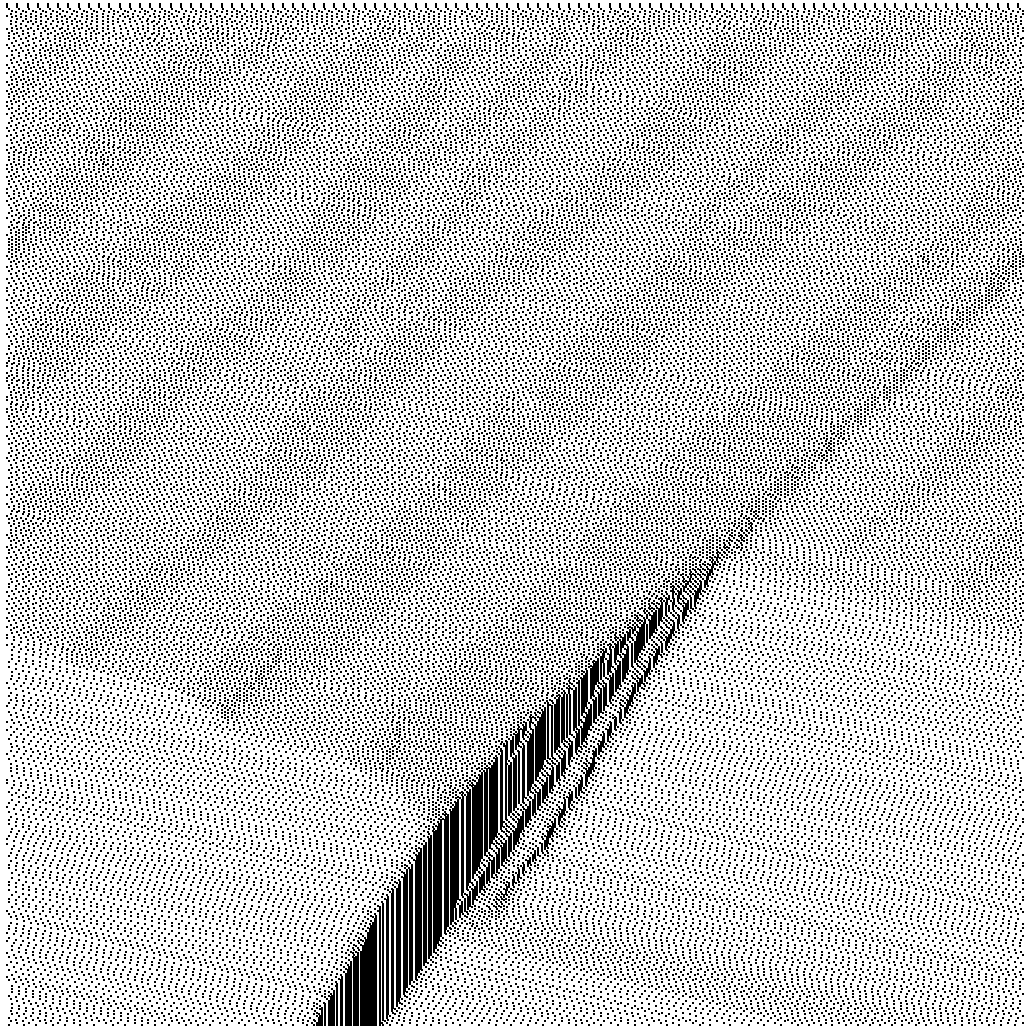
Das ursprüngliche Nagel-Schreckenberg-Modell wurde in den vergangenen Jahren kontinuierlich durch zusätzliche Parameter und Formeln in verschiedenen Ausarbeitungen erweitert, um detailliertere Aussagen über eine Stautentstehung treffen zu können. Krauss, auf dessen Modell die vorliegende Arbeit beruht, fügte den bereits vorhandenen Parametern Fahrzeuggeschwindigkeit, Abstand zum Vordermann, Höchstgeschwindigkeit und Rauschverhalten die zusätzlichen Parameter Beschleunigung, Verlangsamung, Geschwindigkeit des Vordermanns und Reaktionszeit der Fahrer hinzu [2, S. 24]. Die ursprünglichen Formeln wurden dadurch zwar komplexer, allerdings kamen durch die zusätzlichen Angaben realitätsnähere Ergebnisse zustande.

Mithilfe dieser Erweiterung konnte in [3] gezeigt werden, dass eine deutliche Verbesserung des Fahrverhaltens hinsichtlich der Vermeidung von Staus, der Aufrechterhaltung des fließenden Verkehrs und der Reduzierung des Treibstoffverbrauchs erreicht werden kann. Die Publikation stützt sich bei der Aussage allerdings darauf, die oftmals im Alltag vorzufindenden egoistischen Verkehrsteilnehmer durch Fahrzeuge mit agentenbasiertem Lernen zu ersetzen. Zusätzliche Erweiterungen des Ursprungsmodells versprechen eine Anwendung auf mehrspurigen Fahrbahnen und unterschiedlichen Fahrzeugtypen. In [4] sind permanente Fahrspurwechsel und die Unterscheidung zwischen Personen- und Lastkraftwagen in den Berechnungen mit inbegriffen. Zwar konnte in dem auf zwei Fahrspuren ausgelegten Modell keine Steigerung des Verkehrsflusses mit einem Fahrzeugtyp beobachtet werden, jedoch erhöht sich die Robustheit des Verkehrs durch Hinzufügen langsamer Fahrzeuge erheblich. Diese Erweiterung konnte in [5] nochmals konkretisiert und auf die Fahrsituationen auf deutschen Autobahnen übertragen werden.

## 2.3 Verkehrsdarstellung

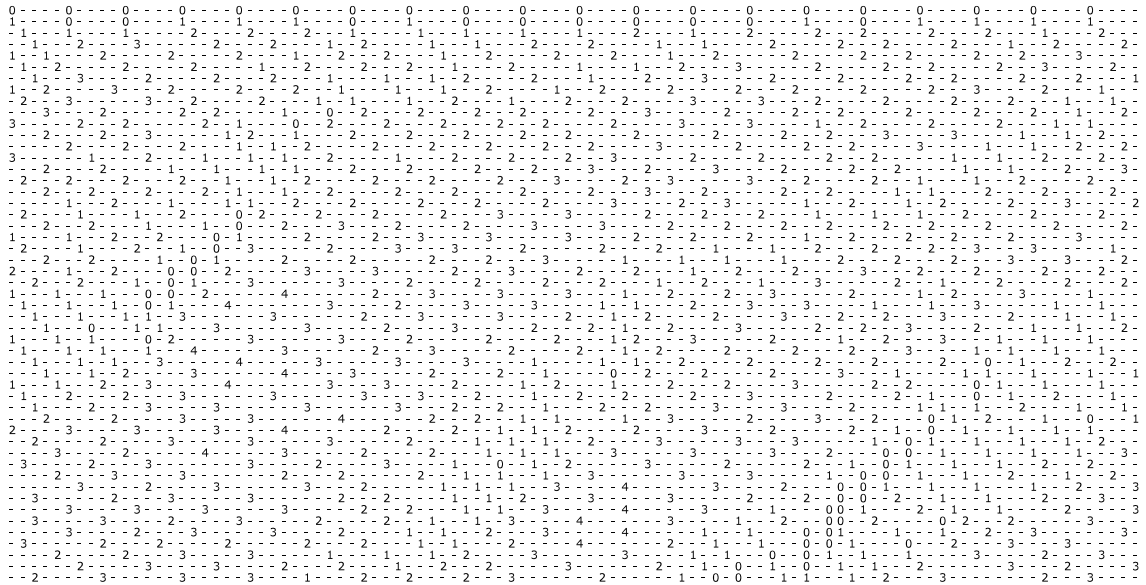
Es existieren zwei verschiedene Darstellungsweisen das Ergebnis einer Verkehrssituation anzuzeigen. In beiden Fällen ist die Ausgabe von links nach rechts und von oben nach unten zu lesen. Jede Zeile symbolisiert einen Zeitschritt und zeigt die neuen Positionen der Fahrzeuge, die sie nach einer Dauer von einer Sekunde eingenommen haben. Fahrzeuge, die den rechten Fahrbahnrand erreicht haben, erscheinen im nächsten Zeitschritt erneut auf der linken Seite. Bei einer gleichmäßigen Abstandsverteilung hat demnach zu Beginn in der Ausgangssituation in der ersten Zeile das letzte Fahrzeug den gleichen Abstand zum ersten Fahrzeug, wie jedes andere Fahrzeug zu seinem Vorgänger auch. Bei der Darstellungsweise handelt es sich demnach um einen Kreisverkehr, der als eine gerade Strecke dargestellt ist.

In der ersten Darstellungsweise sind die Zellen, in denen sich Fahrzeuge befinden, als schwarze Quadrate dargestellt, weshalb sie auch als Pixeldarstellung bekannt ist. Sie ermöglicht einen guten Gesamtüberblick über den Verkehrsverlauf und eine Bildung von Staus ist schnell erkennbar. Je dunkler die Schraffur dargestellt ist, desto mehr Fahrzeuge sind in diesem Augenblick mit engerem Abstand zueinander unterwegs. Abbildung 2.1 zeigt als Beispiel der Pixeldarstellung die ersten 600 Zeitschritte einer Verkehrssimulation mit einer Anzahl von 100 Fahrzeugen auf einer Gesamtstreckenlänge von 600 Einheiten und einer zu Beginn vorhandenen gleichmäßigen Abstandsverteilung der Fahrzeuge von 5 Einheiten zueinander.



**Abbildung 2.1:** Beispiel eines Simulationsergebnisses als Pixelgrafik. ( $n = 100$ ,  
 $l = 600$ ,  $v_{max} = 5$ ,  $a = 1.0$ ,  $b = 1.0$ ,  $\epsilon = 0.4$ ,  $m = 600$ )

Eine andere Darstellungsweise mit mehr Detailtiefe liefert Abbildung 2.2 mit einem gleichmäßigen Abstand in der Ausgangssituation von 4 Einheiten und 20 Fahrzeugen auf einer Gesamtstrecke von 100 Einheiten. Die Zellen, in denen sich Fahrzeuge befinden, sind nun anstelle von schwarzen Rechtecken mit einer Zahl versehen. Sie repräsentiert den abgerundeten Wert der derzeitigen Geschwindigkeit eines Fahrzeugs. Mit dieser Angabe lässt sich besser nachvollziehen, wie viele Einheiten ein Fahrzeug im nächsten Zeitschritt fährt. Zudem ist bei einem Stau die Anzahl der hintereinander stehenden Fahrzeuge besser erkennbar. Nachteil dieser Darstellung ist jedoch die Voraussetzung einer geeigneten Größe der Abbildung zur besseren Lesbarkeit der Werte. Der Fokus der Informationen liegt bei dieser Darstellungsart in dem Fahrverhalten und den Geschwindigkeitsveränderungen einzelner Fahrzeuge, wodurch nur in wenigen Fällen ein Überblick der gesamten Fahrsituation gegeben ist.



**Abbildung 2.2:** Beispiel eines Simulationsergebnisses mit sichtbaren Fahrzeuggeschwindigkeiten. ( $n = 20, l = 100, v_{max} = 5, a = 1.5, b = 1.1, \epsilon = 0.7, m = 50$ )

# 3 Design

Dieses Kapitel geht auf den Aufbau und das Aussehen der grafischen Benutzeroberfläche ein. Bei der Erstellung wurde auf einen einfachen Aufbau geachtet, damit die Handhabung des Programms schnell zu verstehen ist. Darüber hinaus werden die Funktionsmöglichkeiten des Simulationsprogramms aufgeführt, mit dem der Verkehrsfluss auf Grundlage des Nagel-Schreckenberg-Modells dargestellt und somit die Entstehung von Staus analysiert werden kann. Eine genaue Erklärung, wie die erstellten Simulationsergebnisse abgespeichert und in wissenschaftliche  $\text{\LaTeX}$ -Dokumente als Vektorgrafik eingebunden werden können, steht dabei im Vordergrund.

## 3.1 Aufbau des Simulationsprogramms

Abbildung 3.1 zeigt die grafische Benutzeroberfläche beim Start des entwickelten Simulationsprogramms auf Grundlage des NaSch-Modells.

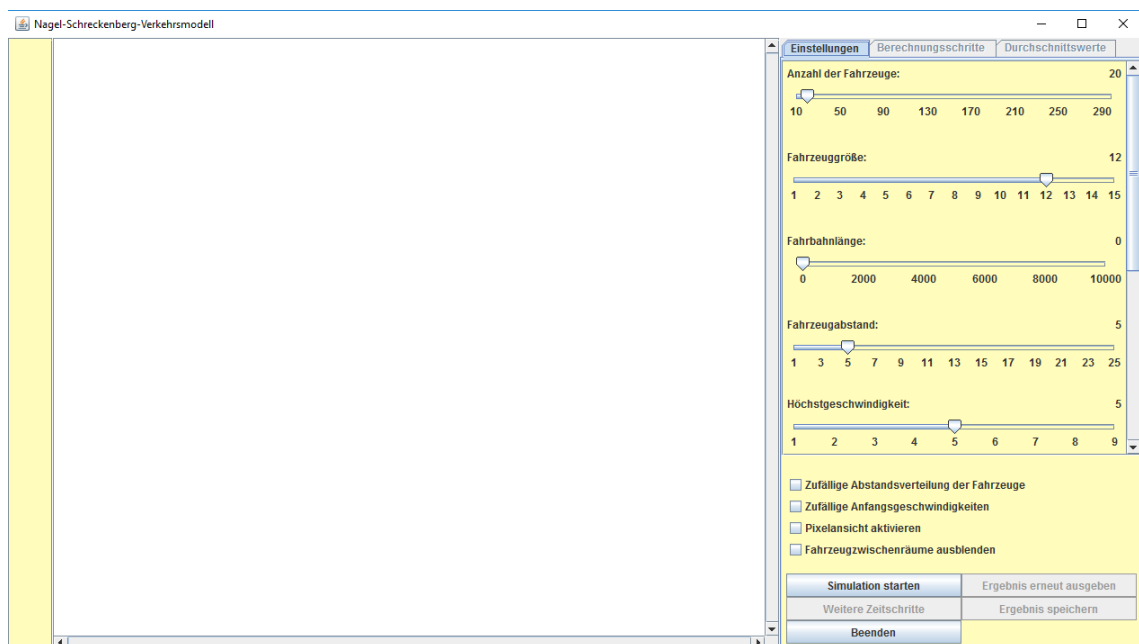


Abbildung 3.1: Grafische Benutzeroberfläche beim Start des Simulationsprogramms.

Die in der Mitte liegende weiße Fläche dient zum zeilenweise Anzeigen der Fahrzeuge nach dem Start einer Simulation. Dadurch entstehen Grafiken wie in Abbildung 2.1 oder 2.2 dargestellt, mit denen die Entstehung eines möglichen Staus im Detail nachvollzogen werden kann. In dem gelben Rand auf der linken Seite erscheint eine aufsteigende Nummerierung der einzelnen Zeilen für eine bessere Lesbarkeit. Die erste Zeile mit der Nummer Null kennzeichnet dabei die Ausgangssituation der Fahrzeuge mit den ausgewählten Werten der einzelnen Simulationsparameter. Die rechte Seite beherbergt alle Einstellungsmöglichkeiten und bietet auf zwei weiteren Tabs zusätzliche Informationen zu einer Simulation, sobald sie durchgeführt wurde. In dem Tab „Einstellungen“ kann der Nutzer mithilfe von Schiebereglern und Kontrollkästchen die Parameterwerte des NaSch-Modells individuell einstellen und zusätzliche Optionen aktivieren.

Zu den einstellbaren Parametern zählen:

- **Anzahl der Fahrzeuge**

Kürzel:	$n$
Untere Grenze:	10
Obere Grenze:	300
Schrittweise:	10

Die Fahrzeuge sind standardmäßig auf der angegebenen oder errechneten Fahrbahnlänge gleich verteilt und starten mit der Geschwindigkeit Null. Durch Optionen in den Einstellungen lassen sich diese Standardwerte ändern.

- **Fahrzeuggröße**

Kürzel:	—
Untere Grenze:	1
Obere Grenze:	15
Schrittweise:	1

Die Größendarstellung der Fahrzeuge hat lediglich visuelle Auswirkungen auf das Ergebnis. Durch das Verändern des Parameters ist eine Option des Vergrößerns und Verkleinerns gegeben, wodurch sowohl das Nachvollziehen der Positionsänderungen einzelner Fahrzeuge im Detail als auch eine Gesamtübersicht aller Zeitschritte gegeben ist.

- **Fahrbahnlänge**

Kürzel:	$l$
Untere Grenze:	0
Obere Grenze:	10.000
Schrittweise:	100

In der angegebenen Länge der Fahrbahn sind bereits die Größen aller Fahrzeuge mit inbegriffen, weshalb der Wert mindestens der ausgewählten Anzahl der Fahrzeuge entsprechen muss. Ist die Fahrbahnlänge mit Null angegeben, errechnet sie sich aus der Fahrzeuganzahl und den jeweiligen Abständen zueinander.

- **Fahrzeugabstand**

Kürzel:	$g(t)$
Untere Grenze:	0
Obere Grenze:	25
Schrittweise:	1

Der eingestellte Fahrzeugabstand ist lediglich zur Erstellung der Ausgangssituation in der ersten Zeile relevant, die als Zeile Null gekennzeichnet ist. In den weiteren Zeitschritten findet diese Einstellung keine Anwendung mehr. Die Möglichkeit den Abstand auf den Wert Null zu setzen ist nur dann möglich, sofern das Kontrollkästchen „Zufällige Abstandsverteilung der Fahrzeuge“ aktiviert ist.

- **Höchstgeschwindigkeit**

Kürzel:	$v_{max}$
Untere Grenze:	1
Obere Grenze:	9
Schrittweise:	1

Ist das zufällige Abbremsen der Fahrzeuge durch den Rauschparameter eingeschaltet, ist es nicht möglich, dass ein Fahrzeug visuell die eingestellte Höchstgeschwindigkeit erreicht, da die derzeitigen Fahrzeuggeschwindigkeiten zur Vereinfachung immer abgerundet dargestellt sind. Die korrekten Geschwindigkeiten finden jedoch in den internen Berechnungen Anwendung.

- **Maximale Beschleunigung**

Kürzel:	$a$
Untere Grenze:	0.1
Obere Grenze:	5.0
Schrittweise:	0.1

Die maximale Beschleunigung gibt an, um wie viel ein Fahrzeug seine Geschwindigkeit innerhalb eines Zeitschritts maximal erhöhen kann, sofern der notwendige Abstand zum Vordermann vorhanden ist.

- **Maximale Verlangsamung**

Kürzel:	$b$
Untere Grenze:	0.1
Obere Grenze:	5.0
Schrittweise:	0.1

Die maximale Verlangsamung gibt an, um wie viel ein Fahrzeug seine Geschwindigkeit innerhalb eines Zeitschritts maximal reduzieren kann, sofern der Vordermann abgebremst hat und das Fahrzeug auf die neue Situation reagieren muss, um einen Auffahrunfall zu vermeiden.

- **Rauschparameter**

Kürzel:	$\epsilon$
Untere Grenze:	0.0
Obere Grenze:	1.0
Schrittweise:	0.01

Das Produkt aus dem eingestellten Rauschparameter und der maximalen Beschleunigung ergibt das Intervall  $[0, a\epsilon]$ , aus dem jedes Fahrzeug in jedem Zeitschritt um einen zufälligen Wert abgebremst wird.

- **Maximale Zeitschritte**

Kürzel:	$m$
Untere Grenze:	100
Obere Grenze:	1000
Schrittweise:	100

Repräsentiert die Anzahl der Zeilen des Simulationsergebnisses.

Zusätzlich neben den einstellbaren Parametern für den Simulationsdurchlauf, können mithilfe von Kontrollkästchen und Schaltflächen zusätzliche Einstellungen getätigt werden:

- **„Zufällige Abstandsverteilung der Fahrzeuge“**

Die Standardeinstellung der gleichmäßigen Abstandsverteilung in der Ausgangssituation ist durch diese Option deaktiviert. Mit einem zusätzlichen Schieberegler, der bei Aktivierung eingeblendet wird, ist das Einstellen eines Mindest- und eines Höchstabstands zum Vordermann möglich. Jedes Fahrzeug erhält zufällig einen Wert als Abstand aus dem angegebenen Intervall zugewiesen. Dadurch berechnet sich die Fahrbahnlänge. Ist eine feste Länge der Fahrbahn vorgegeben, platzieren sich die Fahrzeuge zufällig auf der Strecke.

- **„Zufällige Anfangsgeschwindigkeiten“**

Jedes Fahrzeug erhält für die Ausgangssituation eine zufällige Startgeschwindigkeit zugewiesen, die maximal jedoch nur so groß sein kann, wie es der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zulässt. Nur Fahrzeuge, die nicht fahren können, weil vor ihnen ein anderes Fahrzeug steht, erhalten eine Anfangsgeschwindigkeit von null. Alle anderen besitzen eine Mindestgeschwindigkeit von eins.

- **„Pixelansicht aktivieren“**

Standardmäßig sind auf dem Simulationsergebnis die abgerundeten Werte der Fahrzeuggeschwindigkeiten mit horizontalen Strichen als Zwischenräume zu finden wie in Abbildung 2.2 dargestellt. Durch das Aktivieren dieser Option wechselt die Ansicht in die Pixeldarstellung für eine bessere Gesamtübersicht wie auf Abbildung 2.1.

- **„Fahrzeugzwischenräume ausblenden“**

Die horizontalen Striche als Abstandshalter sind beim Auswählen dieser Option ausgeblendet, was eine schnellere Ladezeit mit sich bringt. In der Pixeldarstellung sind standardmäßig keine Markierungen in den Zwischenräumen vorhanden.

- **„Simulation starten“**

Startet die Simulation mit den angegebenen Parameterwerten und den zusätzlich gesetzten Optionen.

- **„Ergebnis erneut ausgeben“**

Gibt das derzeit angezeigte Ergebnis erneut aus. Zuvor kann die Darstellung der Fahrzeuge durch ihre Größe oder durch die Aktivierung der Pixeldarstellung geändert werden.

- **„Weitere Zeitschritte“**

Diese Option fungiert als Endlosschleife. Sie führt die Simulation mit den nächsten  $m$  Zeitschritten fort, indem die letzte Zeile des bisherigen Ergebnisses als Ausgangssituation des neuen Simulationsdurchlaufs fungiert.

- **„Ergebnis speichern“**

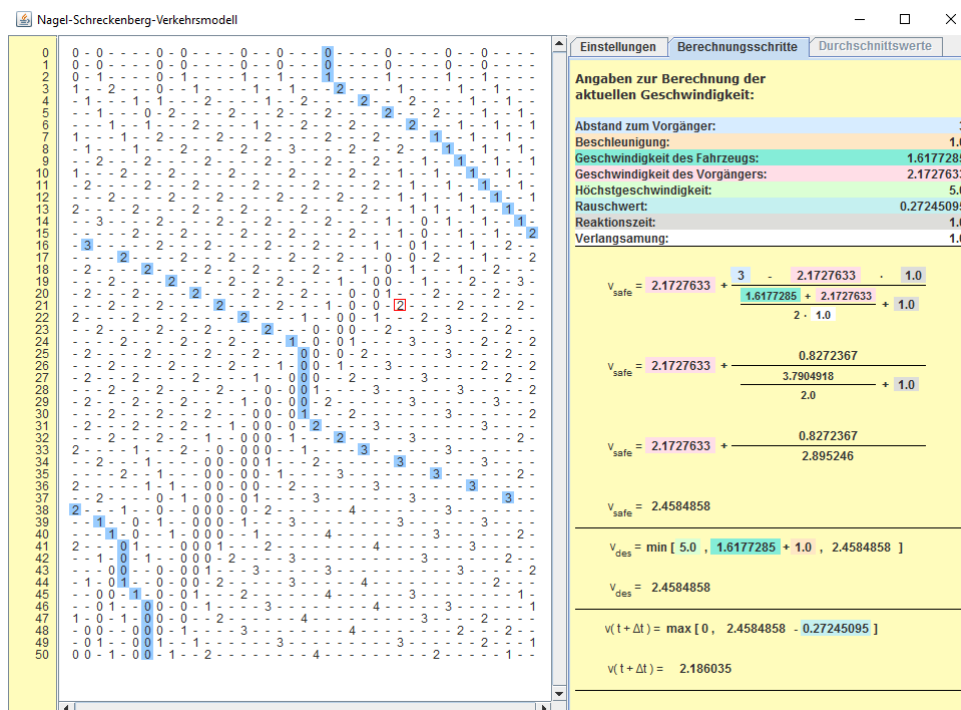
Speichert das erzeugte Simulationsergebnis als Vektorgrafik ab.

- **„Beenden“**

Schließt das Simulationsprogramm.

## 3.2 Zusätzliche Funktionsmöglichkeiten

Neben den individuell einstellbaren Parametern für die Verkehrssimulation bietet das Programm für eine bessere Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses zusätzliche Funktionen. Da es oft schwierig sein kann, ein einzelnes Fahrzeug über mehrere Zeilen hinweg zu verfolgen, um die Geschwindigkeitsentwicklung zu beobachten, kann das entsprechende Fahrzeug durch einen rechten Mausklick in einer beliebigen Zeile markiert werden. Die berechneten Positionen des Fahrzeugs färben sich anschließend in allen Zeilen (Abbildung 3.2). Bis zu fünf Fahrzeuge mit unterschiedlichen Farben sind möglich. Mit einem erneuten rechten Mausklick auf ein bereits markiertes Fahrzeug verschwindet die farbliche Hervorhebung wieder.

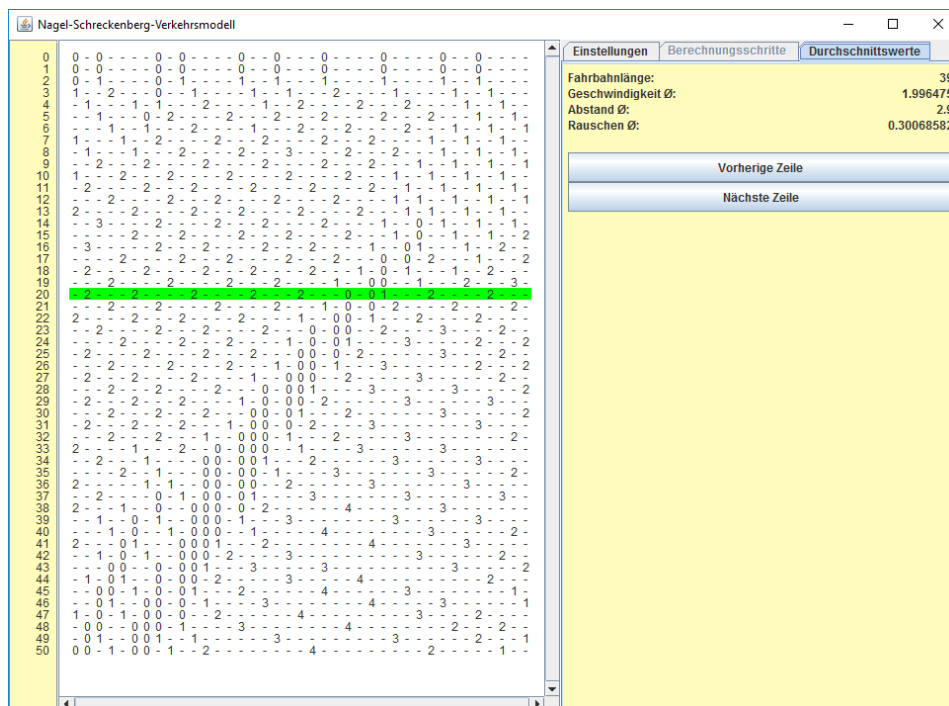


**Abbildung 3.2:** Berechnungsschritte der Geschwindigkeit und Verfolgung eines Fahrzeugs über mehrere Zeilen hinweg. ( $n = 10, l = 39$ ,  $v_{\text{max}} = 5, a = 1.0, b = 1.0, \epsilon = 0.5, m = 50$ )

Eine weitere Option bringt mehr Klarheit in die einzelnen Berechnungsschritte zur Ermittlung der Fahrzeuggeschwindigkeit im ausgewählten Zeitschritt. Es erscheint intuitiv nachvollziehbar, dass sich die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs erhöht beziehungsweise verringert, je nachdem wie groß der Abstand zum Vordermann ist, aber wie der Wert konkret ermittelt wird, bleibt normalerweise im Verborgenen. Durch einen linken Mausklick auf ein Fahrzeug erhält es in der ausgewählten Zeile eine farbliche Umrandung und der Tab „Berechnungsschritte“ auf der rechten Seite ist aktiv (Abbildung 3.2).

Dort erscheinen die einzelnen Rechengänge, Formeln und konkrete Werte für die Ermittlung der Geschwindigkeit des ausgewählten Fahrzeugs. Die oberen in Tabellenform dargestellten Werte in dem Tab beziehen sich teilweise auf den vorhergegangenen Zeitschritt, da aus ihm die neue Fahrzeuggeschwindigkeit zu ermitteln ist. Darunter fallen der Abstand zum Vorgänger, die eigene Fahrzeuggeschwindigkeit sowie die des Vorgängers. Das berechnete Endergebnis ist unter  $v(t + \Delta t)$  zu finden. Durch einen erneuten linken Mausklick auf das Fahrzeug ist die farbliche Hervorhebung wieder aufgehoben.

Für die Auswertung eines Ergebnisses kann es sehr nützlich sein, Durchschnittswerte eines bestimmten Zeitschritts zu erhalten. Eine Erhöhung oder Verringerung der Durchschnittsgeschwindigkeit kann beispielsweise darauf schließen, dass sich viele Fahrzeuge auf engerem Raum befinden, ihre Geschwindigkeit dadurch reduzieren müssen und ein erstes Anzeichen für die Entstehung eines Staus vorhanden ist. Durch einen Mausklick auf eine Zeilennummer erhält die ausgewählte Zeile eine farbliche Hervorhebung und der Tab „Durchschnittswerte“ auf der rechten Seite ist automatisch aktiv (Abbildung 3.3). In ihm finden sich die ausgerechnete Fahrbahnlänge sowie Durchschnittswerte zur Geschwindigkeit, zum Abstand und zum Rauschverhalten der Fahrzeuge. Mit zusätzlichen Schaltflächen ändert sich die Auswahl auf die vorherige oder nächste Zeile. Bei einer erneuten Auswahl der bereits aktiven Zeile mit der Maus verschwindet die Hervorhebung.



**Abbildung 3.3:** Durchschnittswerte eines Zeitschritts. ( $n = 10, l = 39,$   
 $v_{max} = 5, a = 1.0, b = 1.0, \epsilon = 0.5, m = 50$ )

## 3.3 Speicherung der Ergebnisse

Für das dauerhafte Festhalten eines Ergebnisses und zum Einfügen in Textverarbeitungsprogramme wie unter anderem  $\text{\LaTeX}$ [6], ist eine Funktion zum Abspeichern vorgesehen. Durch die Schaltfläche „Ergebnis speichern“ findet eine Konvertierung des Resultats in eine Vektorgrafik des Datentyps SVG statt [7]. Die Zeilennummern und farbliche Markierungen von Fahrzeugen werden nicht beachtet. Die eingestellte Fahrzeuggröße spielt ebenfalls keine Rolle, da automatisch immer die kleinst mögliche Darstellung zum Speichern ausgewählt ist. Ob das Simulationsergebnis als Pixelgrafik vorliegt oder die mit Querstrichen versehenen Zwischenräume eingeschaltet sind, ist hingegen von Bedeutung und wird berücksichtigt.

### Problembhebung beim Einbinden

Die abgespeicherte Vektorgrafik ist für das sofortige Einbinden in ein  $\text{\LaTeX}$ -Dokument zu groß und weist zu viele Zeilen auf. Bei der Kompilierung können daher Fehler bezüglich des reservierten Speichers für den  $\text{\LaTeX}$ -Compiler auftreten und der Vorgang dauert entsprechend lange. Insbesondere bei sehr vielen einzubindenden Grafiken ist es daher sinnvoll, auf ein weiteres Programm zurückzugreifen, das die Vektorgrafik in ein PDF oder ein PNG mit hoher Auflösung abspeichert, welches anstelle der großen Vektorgrafikdatei eingebunden wird. Hierfür ist das Programm „Inkscape“ [8] zu empfehlen, das für die Erstellung und Bearbeitung von Vektorgrafiken ausgelegt ist. Es ist kostenlos im Internet zu finden.

### Speichervorgang

Nach der Installation ist das Einfügen der Vektorgrafik in „Inkscape“ per einfaches Ziehen und Loslassen der Datei auf das Programm möglich. Die Dauer des Ladevorgangs kann entsprechend der Anzahl der Fahrzeuge und der Menge der Zeitschritte variieren. Ist der Ladevorgang abgeschlossen, ist das Resultat unter „Datei“ → „Speichern unter...“ in ein PDF-Dokument abzuspeichern. Durch die Auswahl dieses Dateiformats bleibt die hoch aufgelöste Qualität der Grafik beim Vergrößern oder Verkleinern immer erhalten und es entsteht keine Unschärfe wie es beispielsweise bei einem Bild im PNG-Format der Fall ist. In dem nun erscheinenden Fenster ist die Option „Texte in Pfade umwandeln“ auszuwählen und nicht „Text in PDF weglassen und LaTeX Datei erstellen“, da ansonsten die Geschwindigkeitsangaben der Fahrzeuge nicht mehr zu sehen sind, sofern das Ergebnis nicht als Pixelgrafik dargestellt ist. Anschließend genügt ein Klick auf „OK“ um den Speichervorgang abzuschließen.

Das generierte PDF enthält nun das Ergebnis der Simulation. Liegt es im gleichen Pfad wie das zu verwendende  $\LaTeX$ -Dokument, kann es mit dem Quellcode 3.1 eingebunden werden. Die lange Vektorgrafik-Datei ist nicht weiter notwendig und das Laden innerhalb des  $\LaTeX$ -Compilers geht wesentlich schneller.

**Quellcode 3.1:**  $\LaTeX$ -Befehle zum zentrierten Einfügen des Simulationsergebnisses über die gesamte Textbreite

---

```
1 \begin{figure}[ht]
2   \centering
3   \includegraphics[width=\textwidth]{Dateiname}
4   \caption{Bildbeschreibung}
5   \label{Name des Bildes zur Referenzierung}
6 \end{figure}
```

---

# 4 Implementierung

Durch dieses Kapitel erhält der Benutzer zu dem im vorherigen Abschnitt vorgestellten Simulationsprogramm einen Einblick in dessen Programmierung. Eine Einführung in die Klassenstruktur bietet einen allgemeinen Überblick über den internen Aufbau. Anschließend folgt der konkrete Programmablauf und die Berechnung der Positionen aller Fahrzeuge in jedem Zeitschritt.

## 4.1 Klassenstruktur

Das Simulationsprogramm teilt sich auf drei verschiedene Klassen auf. Die Beziehungen untereinander sind in dem vereinfachten Klassendiagramm in Abbildung 4.1 dargestellt. Welche Aufgaben die jeweiligen Klassen übernehmen und welche Funktionsweise die einzelnen Methoden aufweisen, erläutern die nachfolgenden Unterkapitel. Auf genaue Beschreibungen von Zugriffsmethoden (Getter und Setter) sowie Hilfsmethoden wird verzichtet.

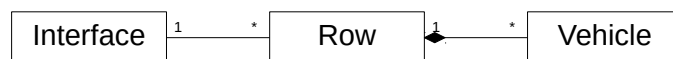


Abbildung 4.1: Klassenstruktur

### 4.1.1 Klasse „Interface“

Die Klasse „Interface“ dient zum strukturellen Aufbau der gesamten grafischen Benutzeroberfläche (Abbildung 4.2). Die Schieberegler zum Einstellen der Simulationsparameter erhalten ihre spezifischen Anfangswerte und die Funktionen der einzelnen Schaltflächen zum Starten einer Simulation oder zum Abspeichern der Ergebnisse sind hier hinterlegt.

Interface
<pre> - LEFTPANELCOLOR : Color - LEFTPANELWIDTH : int - RIGHTPANELCOLOR : Color - RIGHTPANELWIDTH : int - colors : String[] - i : Interface - rows : Row[] - colorPicker : boolean[] - borderedCar : Vehicle - selectedRow : int - timeSteps : int - rightPanel : JTabbedPane - calculationPanel : JPanel - averagePanel : JPanel - vehicles : int - carSize : int - speed : int - acc : float - dec : float - minSpace : int - maxSpace : int - noise : float - output : int - pixelView : bool - hideSpaces : bool  + main(String[]) : void + Interface() + createPanel() : void + saveAsFile() : void + showCalculatedValues(float, float, float, float, bool) : void + showAverageValues(int) : void + coloringCar(int, bool) : void + addLabel(JLabel, int, int, int, int, int, int, JPanel) : void + addLine(int, int, int, int, Jpanel) : void + setBorder(Vehicle) : bool + getVehicles() : int + getRows() : Row[] </pre>

Abbildung 4.2: Klasse „Interface“

Methode	Beschreibung
<b>Konstruktor</b>	Erzeugt die grafische Benutzeroberfläche und setzt die Anfangswerte der Schieberegler auf die Einstellungen, die das interessanteste Simulationsergebnis versprechen.
<b>saveAsFile()</b>	Speichert das Ergebnis der zuletzt durchgeführten Simulation als Vektorgrafik ab.
<b>showCalculatedValues()</b>	Diese Methode wird aufgerufen, sobald der Nutzer ein einzelnes Fahrzeug mit der linken Maustaste ausgewählt hat. Im Tab „Berechnungsschritte“ ist anschließend die Vorgehensweise beschrieben, wie die neue Geschwindigkeit des Fahrzeugs zustande kommt.

<b>showAverageValues()</b>	Zeigt die berechnete Fahrbahnlänge und Durchschnittswerte zu Geschwindigkeit, Abstand und Rauschen der Fahrzeuge in einer Zeile, sobald diese ausgewählt ist.
<b>coloringCar()</b>	Hebt das mit der rechten Maustaste ausgewählte Fahrzeug in allen Zeilen farblich hervor, sodass dessen Positionsverlauf besser nachvollzogen werden kann.
<b>setBorder()</b>	Setzt eine farbliche Umrandung auf das mit der linken Maustaste ausgewählte Fahrzeug.

### 4.1.2 Klasse „Row“

Ist eine Simulation gestartet, erzeugt die Klasse „Row“ die einzelnen Zeitschritte im mittleren weißen Hauptfenster (Abbildung 4.3). Die erste Zeile stellt die Ausgangssituation der Fahrzeuge mit den eingestellten Parametern dar. Alle darauffolgenden Zeilen bauen auf der jeweils zuvor errechneten Zeile auf, wodurch die Fahrzeuge in jeder Zeile eine neue Position und Geschwindigkeit nach den Regeln des NaSch-Modells erhalten.

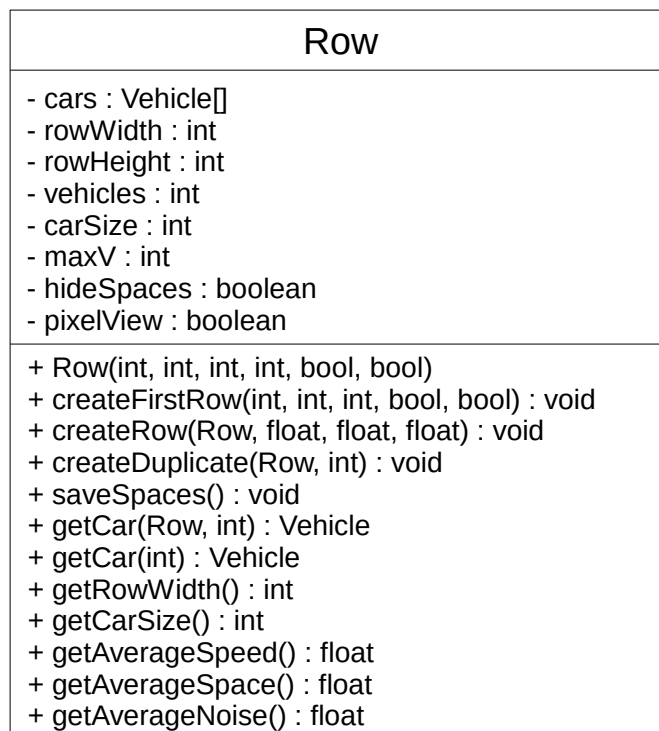


Abbildung 4.3: Klasse „Row“

Methode	Beschreibung
<b>Konstruktor</b>	Erzeugt eine neue Zeile und bekommt dabei Parameter übergeben, die für die Darstellungsweise aller Zeitschritte notwendig sind. Darunter fallen eine eindeutige Identifikationsnummer der Zeile, die Anzahl der Fahrzeuge, die Fahrzeuggröße, die maximal erlaubte Höchstgeschwindigkeit sowie Angaben darüber, ob die Zwischenräume mit Querstrichen zu füllen sind oder die Pixeldarstellung aktiviert ist.
<b>createFirstRow()</b>	Bekommt Parameter übergeben, die lediglich für das Erstellen des ersten Zeitschritts von Bedeutung sind. Darunter fallen die Fahrbahnlänge, der minimale und maximale Abstand sowie die Zustände der Kontrollkästchen über die zufällige Abstandsverteilung und der zufälligen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge. Mit diesen Angaben und den zuvor über den Konstruktor mitgegebenen Werten wird die erste Zeile der Simulation berechnet.
<b>createRow()</b>	Ist für das Erzeugen jedes weiteren Zeitschritts notwendig. Für die Berechnung der Fahrzeugpositionen und den neuen Geschwindigkeiten sind die Werte des zuvor erzeugten Zeitschritts ausschlaggebend. Daher wird die entsprechende Zeile als Übergabeparameter mitgegeben. Weitere Parameter sind die maximale Beschleunigung und Verlangsamung sowie der Wert des Rauschparameters.
<b>createDuplicate()</b>	Soll ein Ergebnis erneut mit einer veränderten Darstellung ausgegeben werden, erzeugt diese Methode ein Duplikat einer bereits erstellten Zeile und verändert Fahrzeuggröße und Darstellungsart entsprechend den angegebenen Werten.
<b>saveSpaces()</b>	Speichert die Abstände der einzelnen Fahrzeuge zum jeweiligen Vordermann, sobald die komplette Zeile berechnet ist.

### 4.1.3 Klasse „Vehicle“

Die letzte Klasse „Vehicle“ speichert die Attribute eines einzelnen Fahrzeugs (Abbildung 4.4). Darunter fallen eine eindeutige Nummer zum Identifizieren in jeder Zeile zum späteren Einfärben durch eine Markierung, die entsprechende Farbe, die Position, die derzeitige sowie die im letzten Zeitschritt errechnete Geschwindigkeit, der Abstand und die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs sowie der zufällig ermittelte Rauschwert, der das Ablenken des Fahrers simuliert. Ein zusätzlicher Wert gibt an, ob das Auto als Pixel dargestellt werden soll oder nicht.

Vehicle
- id : int - color : int - x : int - v : float - prevV : float - space : float - prevSpace : float - speedAntecessor : float - noise : float - isPixel : bool
+ Vehicle(int) + showAsPixel() : void + getId() : int + setColor(int) : void + getColor() : int + setPosition(int, int) : void + getPosition() : int + setVelocity(float) : void + showVelocity() : void + getVelocity() : float + setVelocityPrev(float) : int + getVelocityPrev() : float + setSpace(float value) : void + getSpace() : float + setPrevSpace(float) : void + setSpeedAntecessor(float) : void + setNoiseValue(float) : void + getNoiseValue() : float

Abbildung 4.4: Klasse „Vehicle“

Methode	Beschreibung
<b>Konstruktor</b>	Erzeugt ein neues Fahrzeug mit einer eindeutigen Identifikationsnummer und fügt einen Mouse-Listener hinzu, um das Fahrzeug später auswählen zu können.

## 4.2 Programmablauf

Durch das Drücken auf die Schaltfläche „Simulation starten“ beginnt ein neuer Simulationsvorgang in einem eigenen Thread. Dadurch wirkt das Programm während der Berechnungen nicht eingefroren und der Nutzer hat die Möglichkeit bei zu langer Wartezeit den Vorgang vorzeitig abubrechen. Der Thread läuft so lange im Hintergrund, bis die um eins erhöhte eingestellte Anzahl an Zeitschritten erreicht wurde. Der zusätzliche Durchlauf ist für das Erstellen und Anzeigen der Ausgangssituation notwendig. Sie basiert auf denen vom Nutzer eingestellten Werten und einer zufälligen Verteilung der Fahrzeuge bezüglich Position und Anfangsgeschwindigkeit, falls diese Optionen in den entsprechenden Kontrollkästchen aktiviert sind. Jedes Fahrzeug erhält beim Erzeugen eine Nummer zugewiesen, die in der aktuellen Zeile eindeutig ist. Das erste Fahrzeug ist immer am linken äußeren Rand platziert. Daraufhin folgt der Abstand zum Vordermann. Er entspricht bei einer gleichmäßigen Abstandsverteilung dem eingestellten Parameter oder bei aktivierter Zufälligkeit einem Wert zwischen dem Mindest- und Höchstabstand. Dieser Vorgang wiederholt sich für alle darauffolgenden Fahrzeuge, sodass sich daraus am Ende die Gesamtlänge der Fahrbahn berechnen lässt.

Ist die Ausgangslage fertiggestellt und ausgegeben, folgen die restlichen Zeilen. Die Fahrzeuge im neuen Zeitschritt benötigen für die Berechnungen ihrer Geschwindigkeiten und Positionen die Werte in der zuvor erstellten Zeile, weshalb sie als Übergabeparameter erforderlich ist. Aus der vorherigen Zeile lassen sich die einzelnen Fahrzeuge durch die zugewiesene eindeutige Nummer identifizieren und ihre Werte für die neuen Berechnungen auf Grundlage der im NaSch-Modell verwendeten Formeln auslesen. Das Fahrzeug an der neuen Position erhält die gleiche Identifikationsnummer zugewiesen wie das Fahrzeug im vorherigen Zeitschritt an der alten Position. Dadurch wandert dieses Fahrzeug von Zeitschritt zu Zeitschritt immer etwas weiter nach rechts. Ist das Fahrzeug positioniert, folgt das nächste, bis die Reihe vollständig ist. Nach Fertigstellung dient die fertige Zeile wiederum als Grundlage des darauf folgenden Zeitschritts, bis schließlich die gewünschte Anzahl an Zeilen ausgegeben ist.

## 4.3 Berechnung der Fahrzeugpositionen

Bei der genauen Bestimmung, an welcher Position die Fahrzeuge zu stehen haben, legt die Erstellung der Ausgangssituation den Grundstein für die weiteren Positionsbestimmungen in den nachfolgenden Zeitschritten. Bei der Positionierung der Fahrzeuge für die Ausgangssituation sind nachfolgende Fälle zu unterscheiden:

**1. Fahrzeuganzahl und Abstand sind vorgegeben, eine zufällige Abstandsverteilung ist ausgeschaltet.**

Bei dieser Einstellung liegt eine Gleichverteilung vor. Die Fahrzeuge erhalten jeweils den eingestellten Abstandswert zueinander.

**2. Fahrzeuganzahl und Abstand sind vorgegeben, eine zufällige Abstandsverteilung ist eingeschaltet.**

Ein zusätzlicher Schieberegler erscheint. Der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug kann nun jeden ganzzahligen Wert vom Mindest- bis zum Höchstabstand annehmen und wird zufällig ermittelt.

**3. Fahrzeuganzahl und Fahrbahnlänge sind vorgegeben, eine zufällige Abstandsverteilung ist ausgeschaltet.**

Da mit einer zusätzlichen Angabe eines Abstandes der Fahrzeuge zueinander die Ermittlung der Fahrzeugpositionen überbestimmt ist, sind die entsprechenden Schieberegler deaktiviert. Dennoch ist es nicht immer möglich, eine bestimmte Anzahl an Fahrzeugen gleichmäßig auf einer festgelegten Streckenlänge zu verteilen. Ein zusätzlicher Algorithmus sorgt deshalb dafür, dass die Fahrzeuge eine so gut wie mögliche gleichmäßige Verteilung annehmen.

Kommt beim Teilen der um die Fahrzeuganzahl verringerte Fahrbahnlänge durch die Anzahl der Fahrzeuge eine Zahl mit Nachkommastellen heraus, dienen deren ganzzahliger Wert  $j$  und ihr Nachfolger  $j + 1 = k$  als Grundlage des Algorithmus. Die errechnete Bruchzahl lässt sich nämlich durch den nachfolgenden Bruch darstellen:

$$\frac{nj + mk}{n + m} \tag{4.1}$$

Der Algorithmus ermittelt, wie oft die Fahrzeugabstände  $j$  und  $k$  hintereinander verwendet werden müssen, damit der Durchschnitt der errechneten Bruchzahl entspricht.

Das nachfolgende Beispiel dient zur besseren Verständlichkeit der Vorgehensweise:

Fahrbahnlänge	=	500
Anzahl der Fahrzeuge	=	110
Durchschnitt	=	3,54545
$j$	=	3
$k$	=	4

Der Abstand 3 ist fünfmal und der Abstand 4 sechsmal hintereinander anzuwenden, damit im Schnitt die Fahrzeuge 3,54545 voneinander entfernt liegen.

#### 4. Fahrzeuganzahl und Fahrbahnlänge sind vorgegeben, eine zufällige Abstandsverteilung ist eingeschaltet.

Ein Datenfeld des Datentyps Boolean mit einer Größe der angegebenen Streckenlänge dient als Hilfe. Ein Zufallsgenerator erzeugt nun nacheinander  $n$  Zufallszahlen, wobei  $n$  die Anzahl der Fahrzeuge darstellt. Der Bereich aus dem eine Zufallszahl gezogen werden kann, liegt zwischen Null und der Länge der Strecke. Ist eine Zahl ermittelt, erhält der entsprechende Eintrag im Datenfeld ein „true“ zugewiesen. Ist der Eintrag bereits markiert, folgt eine neue Ziehung. Zum Schluss sind  $n$  Elemente im Datenfeld als „true“ gekennzeichnet. Die Position im Datenfeld repräsentiert die Position des Fahrzeugs an der es jetzt platziert wird.

Die Fahrzeugpositionen in allen weiteren Zeitschritten ergeben sich aus der Summe der vorherigen Position und der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Geschwindigkeit. Da sich ein Fahrzeug nur eine ganzzahlige Anzahl an Zellen nach vorne bewegen kann, die Geschwindigkeit jedoch mit Nachkommastellen rechnet, ist ein Abrunden des Wertes zuvor erforderlich. Gut zu erkennen ist dieses Vorgehen in Abbildung 2.2 auf Seite 11.

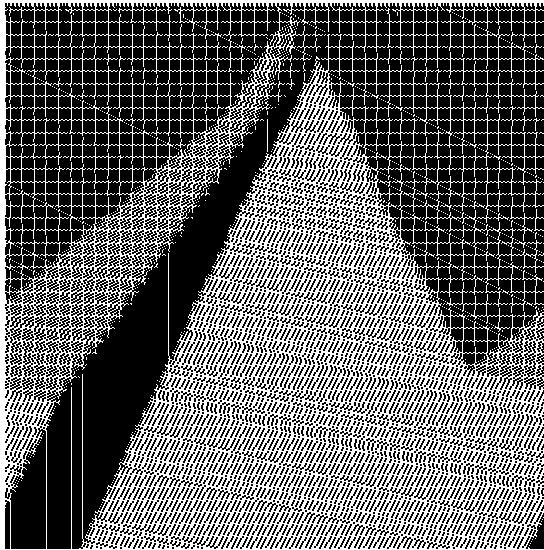
Hat ein Fahrzeug seine neue Position eingenommen, ergibt sich dessen neue Geschwindigkeit nach den Regeln und Formeln des NaSch-Modells, in der unter anderem auch die Ursprungsgeschwindigkeit und der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug mit einfließen. Die genauen Berechnungen erfolgen nach den Formeln 2.1, 2.2 und 2.3.

# 5 Auswertung

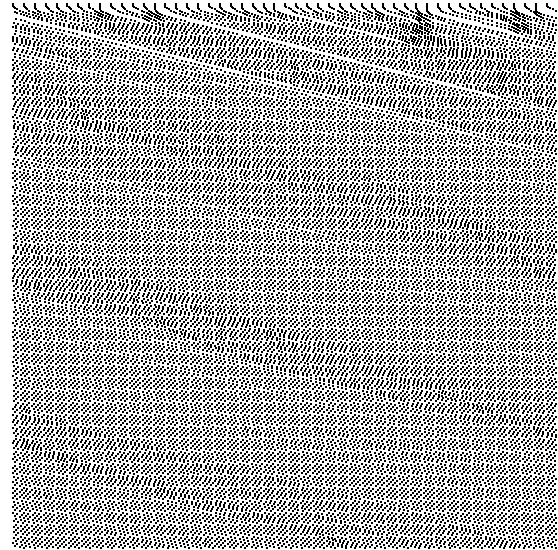
Nur durch eine umfangreiche Auswertung verschiedener Szenarien für den Verkehrsfluss können Aussagen darüber getroffen werden, welche Faktoren zur Entstehung eines Staus führen. Hierfür werden in diesem Kapitel die Parameter, die zur Entstehung eines Staus führen denen gegenübergestellt, die nur geringfügig darauf Einfluss haben. Daraus können schließlich die ausschlaggebendsten Faktoren ermittelt werden. Besondere Wichtigkeit erhält dabei die Fragestellung, wie aussagekräftig die Simulationsergebnisse auf Grundlage des NaSch-Modells sind und inwiefern sie einer realen Verkehrssituation entsprechen.

## 5.1 Versuchsanordnung

Eine grundlegende Bedingung, die zwischen der Bildung eines Staus und fließendem Verkehr unterscheidet, ist die Anzahl der Fahrzeuge auf einer festgelegten Strecke. Liegt eine kurze Fahrbahnlänge vor, auf der sich viele Fahrzeuge befinden, kommt es bereits bei einem niedrigen Rauschwert unweigerlich zu einem Stau. Die dunkle Schraffur bereits im ersten Zeitschritt in Abbildung 5.1a lässt auf eine schnelle Entstehung eines Staus schließen. Bei langer Fahrbahnlänge und wenigen Fahrzeugen kann selbst ein sehr hoher Rauschwert keinen Stau verursachen (Abbildung 5.1b). Für ein möglichst realitätsnahes Resultat, das sich auf viel befahrene Straßen übertragen lässt, ist daher der Mittelwert der beiden Extremfälle von Bedeutung. Infolgedessen ist der Einfluss des Beschleunigungs-, Verlangsamungs- und Rauschparameters auf das Ergebnis in den nachfolgenden Simulationen getestet worden. Für die gleichen Ausgangsbedingungen beträgt sowohl der Fahrzeugabstand zu Beginn als auch die zugelassene Höchstgeschwindigkeit stets den Wert 5 bei einer Fahrzeuganzahl von  $n = 100$ . Die Fahrbahnlänge beträgt somit 600 Einheiten. Der Wert für die Höchstgeschwindigkeit entstammt der Arbeit von Krauss und wird dort als Standardwert beschrieben [2, S. 26]. Der Fahrzeugabstand ist so gewählt, dass er mindestens dem Wert der Höchstgeschwindigkeit entspricht, damit es für die Fahrzeuge nach einigen Zeitschritten auch möglich ist, sie zu erreichen.



(a) Mit  $n = 130$  Fahrzeugen auf einer Strecke von  $l = 500$  Einheiten ist nur wenig Zwischenraum vorhanden. Die dunkle Schraffur bereits bei Simulationsstart macht dies deutlich. Mit einem niedrigen Rauschwert von  $\epsilon = 0.15$  entsteht daher nach nur wenigen Zeitschritten ein Stau.



(b) Durch eine Reduzierung der Fahrzeuge auf  $n = 50$  verteilt auf einer Streckenlänge von  $l = 500$  Einheiten, kann selbst ein Rauschwert von  $\epsilon = 1.0$  nicht zu einem Stau führen, da der Abstand zu den einzelnen Fahrzeugen zu groß ist.

**Abbildung 5.1:** Extreme Verkehrssituationen im Vergleich. ( $l = 500, v_{max} = 5, a = 1.0, b = 1.0, m = 500$ )

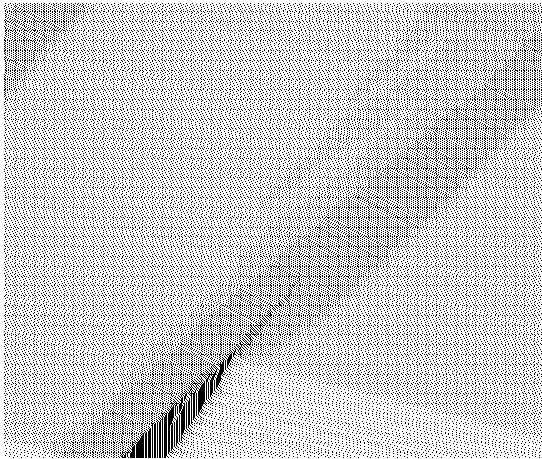
## 5.2 Versuchsdurchführung

Im nachfolgenden wird untersucht, in welchem Verhältnis  $a, b$  und  $\epsilon$  stehen müssen, damit ein fließender Verkehr aufrecht erhalten bleibt oder sich ein Stau bildet. Hierfür sind die Fälle  $a < b, a > b$  und  $a = b$  mit jeweils variablem Rauschparameter  $\epsilon$  zu unterscheiden.

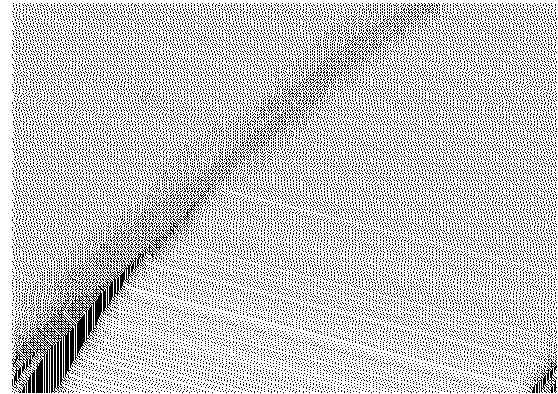
### 1. Versuchsdurchlauf mit $a < b$

Bei einem anfänglichen Fahrzeugabstand von 5 Einheiten und kleinen Werten für die Beschleunigung und Verlangsamung in dem Bereich  $0 < a < b < 1$ , ist mit zunehmendem Rauschwert ein immer schneller aufkommender stockender Verkehr zu beobachten. Bei  $a = 0.6$  und  $b = 0.7$  sind für  $\epsilon \leq 0.45$  selbst nach 10.000 Zeitschritten keine Staus aufgetreten. Hingegen ist für  $\epsilon \geq 0.65$  ein Stau häufig in den ersten 1.500 Zeitschritten zu beobachten. Eine interessante Verkehrsentwicklung zeigt Abbildung 5.2a mit einem Rauschwert von  $\epsilon = 0.5$ . Die unterschiedlich verstreuten Verkehrsverdichtungen scheinen sich nach einiger Zeit an einer Stelle zu vereinen.

Erst nach fast 5.500 Zeitschritten verlangsamen vereinzelte Fahrzeuge durch den Rauschwert ihre Geschwindigkeit zu stark und die Entstehung eines Staus ist unausweichlich. Bei einer geringfügigen Erhöhung der Fahrzeugabstände zu Beginn auf 6 Einheiten, bedarf es einer starken Erhöhung des Rauschparameters auf  $\epsilon = 0.75$ , um nach gleicher Zeit ein vergleichbares Resultat zu erhalten (Abbildung 5.2b). Dargestellt sind jeweils die Zeitschritte 5.000 - 5.500.



(a) Mit einem anfänglichen Fahrzeugabstand von 5 Einheiten, einer Fahrbahnlänge von 600 Einheiten und  $\epsilon = 0.5$  reicht eine kurze Geschwindigkeitsreduzierung einzelner Fahrzeuge aus, um nach 5.500 Zeitschritten einen Stau zu verursachen.

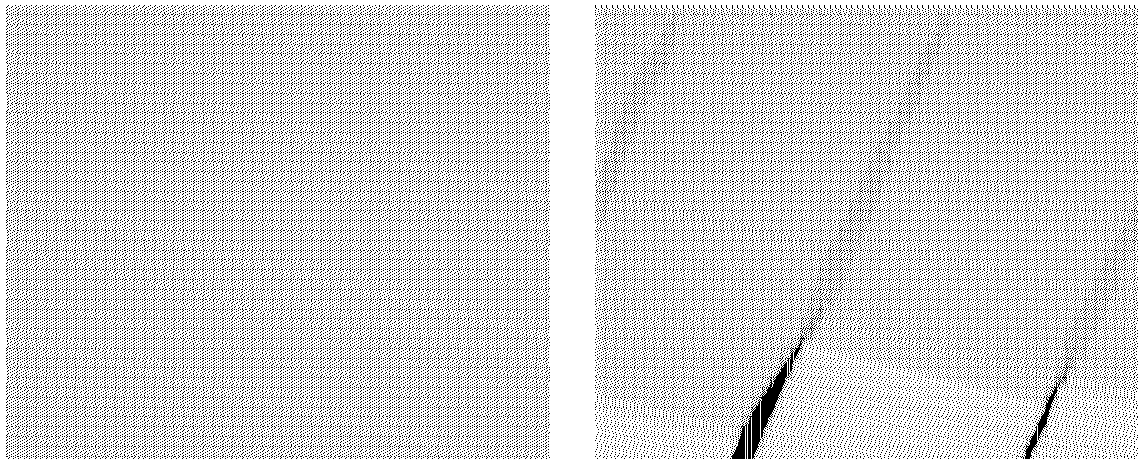


(b) Ist der Fahrzeugabstand auf 6 Einheiten erhöht, ergibt sich eine Fahrbahnlänge von 700 Einheiten. Durch den größeren Abstand zueinander, ist der Rauschparameter auf  $\epsilon = 0.75$  zu setzen, um nach der gleichen Dauer ein ähnliches Resultat zu erhalten.

**Abbildung 5.2:** Ergebnisse mit  $a < b$  und niedrigen Parameterwerten.

$$(n = 100, v_{max} = 5, a = 0.6, b = 0.7, m = 500)$$

Besitzen Beschleunigung und Verlangsamung Werte im Bereich  $1 \leq a < b \leq 2$  reagiert  $\epsilon$  deutlich empfindlicher auf die Veränderungen, da das zufällige Verlangsamen der Fahrzeuge auch von dem derzeitigen Wert der Beschleunigung abhängt. Für  $a = 1.0, b = 1.3$  und  $\epsilon \leq 0.2$  scheint ein fließender Verkehr vorzuliegen (Abbildung 5.3a), wohingegen eine Wertänderung auf  $\epsilon > 0.2$  überwiegend in den ersten 500 Zeitschritten einen Verkehrsstau erzeugt (Abbildung 5.3b).



(a) Mit einem anfänglichen Fahrzeugabstand von 5 Einheiten scheint ein Rauschwert von  $\epsilon = 0.2$  keinen Einfluss auf die Verkehrssituation zu haben. Zeitschritte 9.500 - 10.000.

(b) Mit einer geringfügigen Erhöhung des Rauschparameters auf  $\epsilon = 0.23$  kommt es bereits in den ersten 500 Zeitschritten zu einem Stau.

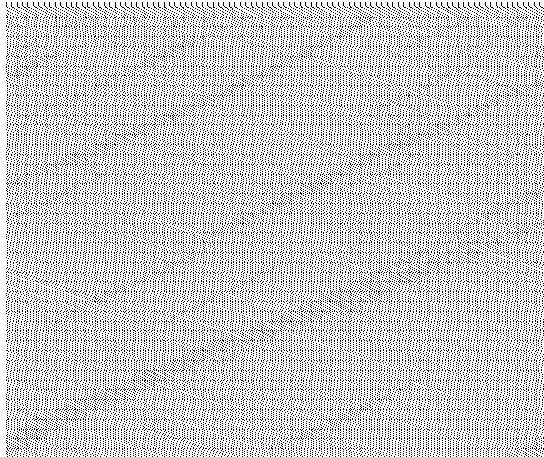
**Abbildung 5.3:** Ergebnisse mit  $a < b$  und durchschnittlichen Parameterwerten. ( $n = 100, l = 600, v_{max} = 5, a = 1.0, b = 1.3, m = 500$ )

## 2. Versuchsdurchlauf mit $a > b$

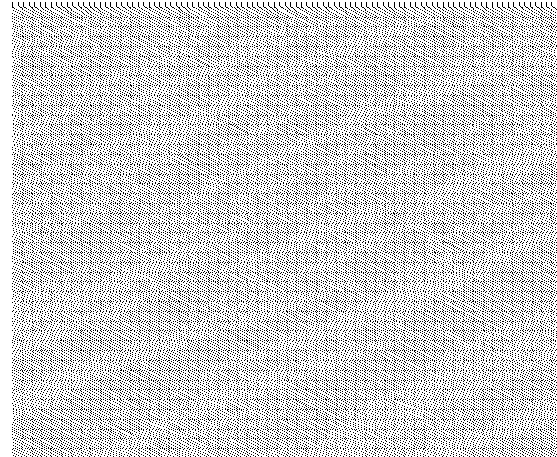
Ist die Ausgangssituation umgekehrt und  $a > b$ , entstehen völlig andere Verkehrssituationen. Ist  $0 < b < a < 1$  gegeben, sind Verkehrsverdichtungen zu beobachten, die mit zunehmendem Rauschen schneller zustande kommen. Allerdings verhalten sich die Fahrzeuge entsprechend defensiv. Sie fahren deutlich langsamer als die Verkehrssituation es zulässt. Der Abstand zum Vordermann ist ausreichend vorhanden, doch mit zunehmenden  $\epsilon$  verlangsamen sie ihre Geschwindigkeiten zu stark. Daher kommt es in diesen getesteten Situationen zu keinem Stau. Abbildung 5.4 stellt die Verkehrsentwicklungen grafisch dar. 5.4a und 5.4b sowie 5.4c und 5.4d haben jeweils die gleichen Ausgangswerte bezüglich Beschleunigung und Verlangsamung. Der variable Parameter ist das Rauschverhalten. Dargestellt sind jeweils die ersten 500 Zeitschritte.

Sind  $a = 1.3$  und  $b = 1.0$  gewählt, kommen sehr ähnliche Ergebnisse wie in Abbildung 5.3 zustande. Der Rauschparameter ist entsprechend auf 0.15 zu reduzieren, damit das Intervall, in dem die einzelnen Fahrzeuge zufällig reduziert werden, gleich bleibt. Bei größeren Werten von  $a, b$  und  $\epsilon$  liegt entweder eine dauerhafte gleichmäßige Verteilung der Fahrzeuge vor oder ein Stau entsteht bereits nach wenigen Zeitschritten durch zu ruckartige Geschwindigkeitsveränderungen.

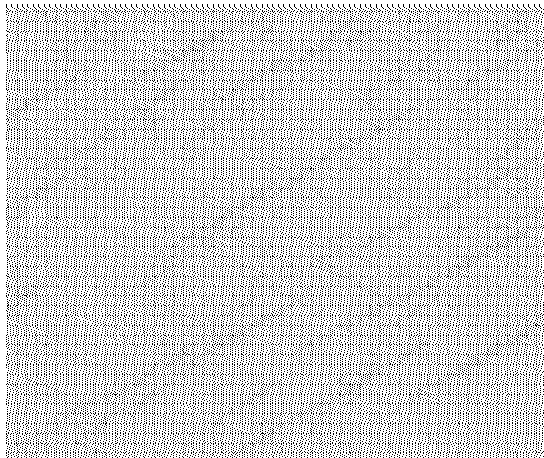
Beide Fälle zeigen daher für eine genaue Auswertung uninteressante Ergebnisse, da sich entweder nach tausenden Zeitschritten keine Veränderung der Anfangssituation erkennen lässt oder die Verkehrsteilnehmer zu schlagartig reagieren, wie es nicht zu erwarten wäre.



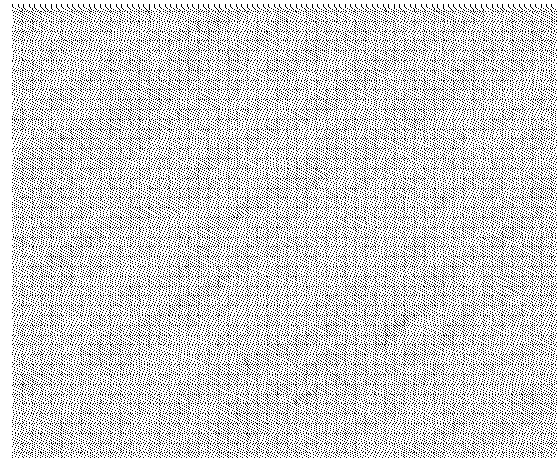
(a) Vereinzelte Verkehrsverdichtungen sind erkennbar. ( $a = 0.5, b = 0.3, \epsilon = 0.55$ )



(b) Mit zunehmendem Rauschen verdichtet sich der Verkehr schneller. ( $a = 0.5, b = 0.3, \epsilon = 0.75$ )



(c) Andere Beschleunigungs- und Verlangsamungswerte erzeugen ein ähnliches Resultat. ( $a = 0.9, b = 0.6, \epsilon = 0.55$ )



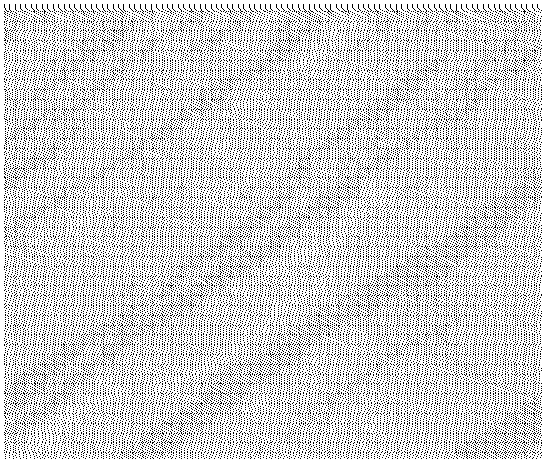
(d) Erhöht sich der Rauschwert, fahren die Fahrzeuge langsamer als sie könnten. Der Verkehr verdichtet sich schneller, ein Stau entsteht jedoch nicht. ( $a = 0.9, b = 0.6, \epsilon = 0.75$ )

**Abbildung 5.4:** Ergebnisse mit  $a > b$  und niedrigen Parameterwerten.

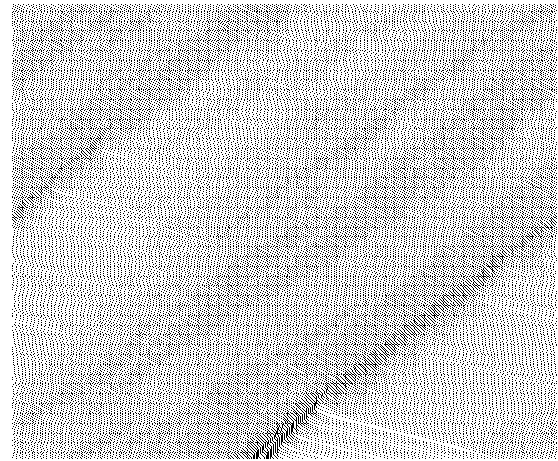
$$(n = 100, l = 600, v_{max} = 5, m = 500)$$

### 3. Versuchsdurchlauf mit $a = b$

Besitzen  $a$  und  $b$  den gleichen Wert, kommen durchaus nachvollziehbare und auf die Realität übertragbare Resultate zustande. Abbildung 5.5 zeigt eine Verkehrssituation, in der man das Fahrverhalten mit dem der Fahrer auf den Straßen vergleichen kann. Alle Fahrzeuge sind zu Beginn gleich weit voneinander entfernt, doch vereinzelt Fahrzeuge bremsen den Verkehr durch unachtsames Fahren an bestimmten Stellen und zu unterschiedlichen Zeitpunkten aus, wodurch kurzzeitig eine Verdichtung des Verkehrs entsteht. Diese Verkehrsverdichtungen lösen sich schnell auf, jedoch entstehen nach kurzer Zeit neue (Abbildung 5.5a). Dieses Fahrverhalten führt lange Zeit zu keinen sichtbaren Konsequenzen des Straßenverkehrs, bis sich schließlich an einer markanten Stelle mit langsamen Schritten doch ein Verkehrsstau bildet (Abbildung 5.5b).



(a) In den ersten 500 Zeitschritten ist bereits ein starkes Rauschen an verschiedenen Stellen und zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu beobachten, die sich vereinzelt wieder auflösen.



(b) Erst in den Zeitschritten 5.500 bis 6.000 führt das unachtsame Fahren einiger Verkehrsteilnehmer zu immer engeren Verkehrsansammlungen und schließlich zu einem Stau.

**Abbildung 5.5:** Ergebnisse mit  $a = b$  und niedrigen Parameterwerten.

( $n = 100, l = 600, v_{max} = 5, a = b = 0.6, \epsilon = 0.8, m = 500$ )

## 5.3 Simulationsergebnisse

Durch die unterschiedlichen getesteten Situationen können nun Aussagen darüber getroffen werden, wie die einzelnen Parameter gewählt werden müssen, damit entweder ein fließender Verkehr vorliegt oder ein Stau entsteht. Dabei spielen auch die Relationen zueinander eine essentielle Rolle.

### Ausschlaggebende Parameter

Ob es in einer Simulation zu einem Verkehrsstau kommt, hängt maßgeblich von den Parametern  $a, b, \epsilon$  und deren Verhältnissen zueinander ab. Erhöht oder verringert sich der zu Beginn vorhandene Fahrzeugabstand, wodurch sich ebenfalls die Fahrbahnlänge verändert, kann durch eine entsprechende Anpassung der drei genannten Parameter dem entgegen gewirkt werden. Dieser Vorgang gilt auch bei gleichbleibender Fahrbahnlänge und variabler Fahrzeuganzahl. Abbildung 5.2 verdeutlicht diese Parameteranpassung. Der anfängliche Abstand trägt daher nicht ausschlaggebend für die Entstehung eines Staus bei.

### Bedingungen für einen fließenden Verkehr

Für eine Aufrechterhaltung des fließenden Verkehrs und eine schnelle Auflösung von Fahrzeugansammlungen nach wenigen Zeitschritten, ist besonders die Wahl des Rauschparameters von Bedeutung. Ist er entsprechend klein gewählt, behalten die Fahrer mit geringfügigen Abweichungen ihre Geschwindigkeit bei und eine permanente gleichmäßige Verteilung der Fahrzeuge ist zu beobachten. Für  $1 < a < b < 2$  entstehen bei einem sehr kleinen Rauschwert keine Anzeichen für einen Stau (Abbildung 5.3a). Eine leichte Erhöhung des Wertes führt nach nur sehr wenigen Zeitschritten zu einem sich nicht mehr auflösenden Stau (Abbildung 5.3b). Für  $a, b \in (0, 1)$  und  $a > b$  kann es hingegen vorkommen, dass zwar ein Rauschverhalten zu beobachten ist, es aber dennoch nicht zu einem Stau kommt (Abbildungen 5.4). Diese Situationen sind für Autofahrer auf den Straßen wünschenswert. Obwohl Geschwindigkeitsveränderungen erkennbar sind, da nie alle Verkehrsteilnehmer exakt die vorgegebene Geschwindigkeit einhalten, erreichen sie dennoch alle ohne Verkehrsbehinderungen ihr Ziel.

### Bedingungen für die Bildung von Staus

Besonders interessante Ergebnisse für die Entstehung eines Staus haben sich bei niedrigen Parameterwerten ergeben. Für  $a, b \in (0, 1)$  und  $\epsilon \geq 0.5$  verhalten sich die Fahrzeuge, wie man sie im normalen Straßenverkehr beobachten würde. Einige Fahrer schenken dem Verkehr keine hohe Beachtung, reduzieren durch Ablenkungen zu sehr ihre Geschwindigkeit und verursachen für wenige Augenblicke eine Ansammlung von Fahrzeugen. Sie löst sich zwar kurz darauf wieder auf, allerdings entsteht an anderer Stelle durch eine Unachtsamkeit eines anderen Verkehrsteilnehmers eine neue Verkehrsverdichtung. Erst nach einiger Zeit führt dieses Fahrverhalten letzten Endes zu einem Stau. Besonders wenn die Bedingung  $0 < a \leq b < 1$  erfüllt ist, sind solche Verkehrssituationen zu beobachten (Abbildungen 5.2 und 5.5). Sie bieten daher die beste Ausgangssituation, um zu untersuchen, bei welchem Verkehrsteilnehmer in einer bestimmten Situation die Unachtsamkeit am größten war und er dadurch den Stau herbeigeführt hat.

## 5.4 Aussagekraft und Realitätsnähe

Die Verkehrssimulation des Programms verwendet bei den verschiedenen Berechnungen die Formeln, die dem Krauss-Modell zugrunde liegen, das wiederum auf dem NaSch-Modell aufbaut. Das Modell wird bereits seit einigen Jahren eingesetzt, um die Ursachen von Verkehrsstaus zu ermitteln, die Simulation in die Realität zu übertragen und entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten, um künftige Staus dieser Art einzudämmen. Daher liegt es nahe, dass das Programm plausible und nachvollziehbare Resultate liefert. Immerhin beinhalten die angewendeten Formeln alle wesentlichen Faktoren, die im Straßenverkehr eine essentielle Bedeutung bei der Geschwindigkeitsentwicklung eines Fahrzeugs spielen. Neben den Parametern, die das eigene Fahrverhalten betreffen (Geschwindigkeit, Abstand zum Vordermann, Beschleunigung, Verlangsamung, Reaktionszeit, Rauschen) sind die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs sowie die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit ebenfalls wichtige Werte der Formeln.

### **Erzeugung unrealistischer Resultate**

Dennoch besteht die Möglichkeit, physikalisch unmögliche und somit realitätsferne Resultate zu generieren. Als Beispiel sei das Beschleunigen aus dem Stand auf eine sehr hohe Geschwindigkeit innerhalb eines Zeitschritts von einer Sekunde erwähnt. Das Gleiche gilt umgekehrt für das Abbremsen von einer hohen Geschwindigkeit zum absoluten Stillstand der Räder. Im Modell und im Programm sind diese Szenarien denkbar, doch führen sie zu unglaublichen und nicht nachvollziehbaren Ergebnissen bezogen auf die Realität. Laut dem Modell ist es sogar möglich, dass Fahrzeuge direkt hintereinander zum Stehen kommen, ohne dass auch nur der geringste Abstand eingehalten wird. Es findet somit eine direkte Berührung der beiden Fahrzeuge statt. Im tatsächlichen Verkehrsfluss sind solche Situationen nicht anzutreffen, denn selbst bei stehenden Autos, beispielsweise in einem Stau, ist immer ein deutlich sichtbarer Mindestabstand zum Vordermann vorhanden.

### **Unterschiedliche Fahrzeugtypen**

Das Simulationsprogramm unterscheidet zudem nicht zwischen verschiedenen Fahrzeugtypen. Alle Fahrzeuge besitzen die gleichen Eigenschaften. Lastkraftwagen, die tendenziell eine geringere Geschwindigkeit aufweisen und nicht so schnell fahren dürfen wie Personenkraftwagen, sind bei der Simulation ausgeschlossen. Das gilt auch für Fahrrad-, Moped- und Traktorfahrer oder Fahrzeuge mit einem Anhänger. Insbesondere weil die genannten Fahrzeugtypen keine hohe Geschwindigkeit fahren dürfen oder können, führt es im Alltagsverkehr dazu, dass viele normale Autofahrer ausgebremst werden. Um realitätsnähere Ergebnisse über den Verkehrsfluss zu erhalten, ist das Einbeziehen verschiedener Fahrzeugtypen mit unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeiten daher ein Aspekt, der berücksichtigt werden sollte.

### **Anzahl der Fahrspuren**

Ein weiterer Kritikpunkt bezieht sich auf die Anzahl der parallel laufenden Fahrbahnen. Das NaSch-Modell ist für das Simulieren auf einer einspurigen Fahrbahn ausgelegt. Daher ist es mit dem Fahren auf einer Landstraße vergleichbar. Jedoch besteht in der Realität für die Fahrer die Möglichkeit, das Trödeln von langsamen Fahrzeugen durch ein Überholmanöver mithilfe der entgegengesetzten Fahrbahn zu umgehen. Außerdem befinden sich in vielen Verkehrssituationen mehr als nur eine Fahrbahn pro Fahrtrichtung, wie beispielsweise auf Autobahnen oder Schnellstraßen.

Spuren, auf denen die Fahrzeuge unterschiedliche Geschwindigkeiten aufweisen und Überholvorgänge keine Seltenheit darstellen, sind im Alltag öfters anzutreffen als eine einspurige Fahrbahn mit keiner Möglichkeit ein langsames vorausfahrendes Fahrzeug zu überholen. Zudem sind Autobahnen als die Verkehrsadern des Straßennetzes anzusehen, da auf ihnen der meiste Verkehr zu beobachten ist. Ein wichtiger zu untersuchender Faktor bei der Entstehung eines Staus auf mehrspurigen Fahrbahnen ist daher, welchen Einfluss die ständigen Überholvorgänge haben und inwiefern sich das Ergebnis dadurch verändert.

### **Sperrung einer Fahrbahn**

Weitere Fahrsituationen, die in das Modell einfließen können, betreffen Fahrbahnverengungen. Es kommt recht häufig vor, dass auf mehrspurigen Fahrbahnen eine Fahrbahn auf einer bestimmten Streckenlänge gesperrt ist, beispielsweise durch eine Baustelle, ein Hindernis, eine Engstelle oder einen bereits geschehenen Unfall. Die Autofahrer sind daher gezwungen, ihre Fahrzeuggeschwindigkeiten zu reduzieren und sich nach Möglichkeit mithilfe des Reißverschlussverfahrens auf eine Fahrspur einzufädeln. Es ist naheliegend, dass es durch eine solche Ausgangslage, insbesondere bei einer hoher Verkehrsdichte, früher oder später zu einem Verkehrsstau kommt. Jedoch können Simulationen dieser Art helfen, eine Methode zu entwickeln, einen solch entstandenen Stau möglichst schnell wieder auflösen zu lassen, damit die Länge des Staus weniger schnell zunimmt. Streckenabschnitte mit Steigungen, in denen Fahrzeuge, insbesondere Lastkraftwagen, eine stark reduzierte Geschwindigkeit fahren, sind ebenfalls ein Indikator, der zur Entstehung eines Staus beitragen kann.

### **Fazit**

Trotz der vielen aufgeführten Unterschiede zwischen dem Verkehrsfluss in der Realität und dem ursprünglichen NaSch-Modell, sind die Resultate dennoch gewinnbringend. Sie helfen Aussagen darüber zu treffen, welche Parameter bei der Entstehung eines Staus ausschlaggebend sind. Außerdem liefert das Modell eine Antwort darauf, wie der berühmte „Stau aus dem Nichts“ zustande kommt, den sich viele Autofahrer nicht erklären können. Das in den Formeln berechnete Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer über mehrere Zeitschritte hinweg und das damit verbundene Reagieren auf neu entstandene Situationen, entspricht dem Verhalten, das bei vielen Autofahrern tatsächlich zu beobachten ist.

Kommt es dadurch zu einem Verkehrsstau, können Gegenmaßnahmen wie beispielsweise eine Erweiterung der Fahrspuranzahl oder eine Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit in Echtzeit dazu beitragen, ihn wieder aufzulösen. Das entworfene Simulationsprogramm bietet auf jeden Fall eine gute Grundlage, die durch zusätzliche Funktionen erweitert werden kann, um realitätsnähere Situationen darstellen zu können.

## 5.5 Grenzen des Simulationsprogramms

Trotz der zahlreichen Einstellungsmöglichkeiten und Funktionen des Programms, sind Ungenauigkeiten in der Darstellungsweise des Ergebnisses vorhanden. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Geschwindigkeitsangaben oder Querstriche sichtbar sind oder es sich um eine Pixeldarstellung handelt.

### Gerundete Geschwindigkeitswerte

Die Abstände der einzelnen Zellen zueinander, in denen sich Fahrzeuge oder Zwischenräume befinden, beträgt stets eine Einheit. Diese Unterteilung führt zu einer recht groben Darstellung. Nur weil zwei benachbarte Zellen mit Fahrzeugen optisch eine Einheit weit auseinander liegen, heißt das nicht automatisch, dass die Fahrzeuge tatsächlich diesen Abstand zueinander aufweisen. Sie können beispielsweise 0.8 oder 1.3 Zellen weit auseinander liegen. Das liegt daran, dass die dargestellten Geschwindigkeitswerte immer als abgerundete Werte angezeigt werden. Ein Fahrzeug, das eine tatsächliche Geschwindigkeit von 1.9 fährt, ist als 1 gekennzeichnet und fährt daher im darauffolgenden Zeitschritt nur eine Zelle weiter, obwohl es tatsächlich fast zwei Zellen fahren könnte. Die Idee liegt nahe, den Wert nicht kontinuierlich abzurunden sondern mathematisch korrekt zu runden und ein Fahrzeug, das 1.5 als Geschwindigkeit aufweist, im nächsten Zeitschritt zwei Zellen weiter vorrücken zu lassen. Doch durch das oftmals sehr großzügige Aufrunden der Werte, kommt es nicht selten vor, dass Fahrzeuge schneller in einer Zeile voranschreiten, als sie es dürften. Sie sind im Vergleich zum permanenten Abrunden des Wertes eine Zelle weiter rechts platziert worden, wodurch es sein kann, dass sie ein anderes Fahrzeug überholen. Rechnerisch überholen sie es nicht, da mit den korrekten Werten mit Nachkommastellen gerechnet wird. Sie haben es jedoch in der Darstellung überholt.

Durch diesen Vorgang beträgt für das Fahrzeug, das ein anderes überholt hat, der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug nun fast die gesamte Fahrbahnlänge, da das Fahrzeug, das vor ihm fahren soll, sich tatsächlich direkt hinter ihm befindet. Diese falschen Abstandswerte kommen in den darauffolgenden Rechenschritten zum Tragen, wodurch der Berechnungsalgorithmus unplausible Werte liefert und die komplette Ausgabe ab einem bestimmten Zeitpunkt wertlos ist.

### **Grobe Unterteilung**

Eine Möglichkeit, keinen so großen Unterschied zwischen tatsächlichem und gerundetem Wert zu haben, besteht darin, die Einheit zu variieren und festzulegen, dass der Schritt von einer Zelle zur nächsten nicht 1 sondern beispielsweise nur 0.1 beträgt. Ein Fahrzeug müsste dann einerseits zehn Einheiten voranschreiten, um einen tatsächlichen Weg von eins zurückzulegen, andererseits ist das Fahrzeug dann auf eine Nachkommastelle genau platziert. Es lässt sich daraufhin deutlich besser beobachten, wie die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge langsam reduziert werden, wenn sie auf einen Stau zufahren und abbremsen müssen.

### **Fazit**

Insgesamt betrachtet kommen mit einer feineren Unterteilung detailliertere Ergebnisse zustande, allerdings verfälscht sie die Darstellung dahingehend, dass beim Betrachten eines Ergebnisses nicht auf Antrieb gesagt werden kann, wie weit zwei Fahrzeuge voneinander entfernt sind. Mit einer Unterteilung von eins erkennt der Betrachter die Abstände deutlich schneller.

# 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das letzte Kapitel dieser Arbeit rundet das Thema mit einer Zusammenfassung ab. Besonders die Simulationsergebnisse und deren Aussagekraft bezogen auf einen realen Verkehrsfluss stehen dabei im Fokus. Denn nur durch eine realitätsnahe Simulation können ausschlaggebende Erkenntnisse gewonnen und Verbesserungen im Straßenverkehr verwirklicht werden. Ein kurzer Ausblick greift die neuesten Entwicklungen im NaSch-Modell auf, um auf fortschrittlichere Methoden aufmerksam zu machen, damit in Zukunft detaillierte Ergebnisse generiert werden können.

## 6.1 Zusammenfassung

In den ersten beiden Kapiteln der vorliegenden Arbeit wurden die Grundlagen des Nagel-Schreckenberg-Modells erläutert. Insbesondere wurde auf die Funktionsweise des Modells eingegangen, welche Parameter des alltäglichen Straßenverkehrs darin einfließen und wie die verschiedenen Berechnungsschritte aufeinander aufbauen. Für Resultate, die noch näher der Realität entsprechen, wurde auf die Modell-Erweiterung von Krauss zurückgegriffen. Auf der Basis dieses Wissens wurde ein umfangreiches Simulationsprogramm entworfen, das nach diesen Regeln arbeitet und diverse Einstellungsmöglichkeiten der einzelnen Parameter ermöglicht. Der Aufbau der grafischen Benutzeroberfläche sowie eine Beschreibung der zusätzlichen optionalen Funktionen waren Bestandteil des Designs im dritten Kapitel. Hierzu zählen die zufällige Abstands- und Geschwindigkeitsverteilung der Fahrzeuge in der Ausgangssituation und der Wechsel der Darstellungsweise des Ergebnisses zwischen einer Pixelgrafik und dem Einblenden der aktuellen Geschwindigkeitsangaben der Fahrzeuge. Ein Überblick über den Aufbau und die Implementierung der verwendeten Klassen folgte im vierten Kapitel. Durch zahlreiche Simulationsdurchläufe konnte schließlich eine umfangreiche Auswertung der Ergebnisse beschrieben werden. Nach den dort gewonnenen Erkenntnissen treten besonders interessante Verkehrssituationen für die Bedingungen  $a, b \in (0, 1)$  und  $a \leq b$  auf.

Der Rauschparameter muss mit  $\epsilon \geq 0.5$  entsprechend groß gewählt werden, damit ein realitätsnahes Fahrverhalten zu beobachten ist und das Rauschen die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge beeinflussen kann. Bei anderen zugewiesenen Werten entstand ein Verkehrsstau entweder in den ersten 500 bis 1.000 Zeitschritten vergleichsweise schnell oder überhaupt nicht. Außerdem konnte bei zu hohen Werten ein unrealistisches Fahrverhalten beobachtet werden. Die Verkehrsteilnehmer erhöhten oder verringerten ihre Geschwindigkeiten innerhalb eines Zeitschritts von einer Sekunde zu stark, wie man es im normalen Straßenverkehr nicht beobachten würde.

## 6.2 Ausblick

Krauss konnte mit seiner Erweiterung des ursprünglichen NaSch-Modells weitere Parameter des alltäglichen Straßenverkehrs mit in die Berechnungen der Fahrzeugpositionen und Geschwindigkeiten einfließen lassen und dadurch genauere Resultate bezogen auf die Realität erzeugen. Wie im Kapitel „Aussagekraft und Realitätsnähe“ beschrieben, fehlen dennoch einige Faktoren, die bislang nicht berücksichtigt wurden, obwohl sie möglicherweise einen großen Einfluss auf die Entstehung eines Staus haben könnten.

### Erweiterung auf zwei Spuren

Da die genannten Kritikpunkte bereits lange Zeit bekannt waren, folgte in [4] eine umfangreiche Erweiterung des Modells. Durch sie ist es möglich, Fahrzeuge auf einer zweispurigen Fahrbahn fahren zu lassen. Überholvorgänge sind erlaubt und treten durch bestimmte Regeln in Kraft. Zusätzlich sind neben den Personenkraftwagen auch Lastkraftwagen zugelassen, die jedoch keine Überholvorgänge tätigen sondern auf einer Fahrspur verbleiben. In [5] folgte einige Jahre später eine Konkretisierung, in der spezifisch auf die Fahrkonstellationen auf deutschen Autobahnen eingegangen wird. Konkrete Regeln, wann ein Fahrzeug den Wechsel auf eine andere Fahrspur vollziehen darf, sind ebenfalls festgehalten. Diese Modellerweiterungen nähern sich stark den tatsächlichen Verkehrssituationen auf den Straßen an, sodass immer detailliertere Aussagen darüber getroffen werden können, wie ein Stau zustande gekommen ist und welche Parameter in einer spezifischen Konstellation dafür ausschlaggebend waren.

**Autonomes Fahren**

Zusätzlich zu den bisherigen Erweiterungen, könnte die Anwendung des NaSch-Modells auf das autonome Fahren von großer Bedeutung sein. Es wird zwar noch einige Jahre dauern, bis die voll vernetzten Fahrzeuge auf den Straßen zu finden sein werden und die wichtigen Fragen über Sicherheit, Recht und Haftung geklärt sind, dennoch bieten sich dadurch neue Möglichkeiten in den Bereichen Mobilität und Verkehr an [9]. Die neuen Technologien und ständigen Standortabfragen jedes einzelnen Fahrzeugs könnten dazu beitragen, Staus gar nicht erst entstehen zu lassen, da jedes Fahrzeug Zugriff auf die Daten jedes anderen Verkehrsteilnehmers hat und darauf entsprechend reagieren kann. Muss man heutzutage beispielsweise an einer Ampel, die gerade von rot auf grün geschaltet hat, recht lange warten, bis die vor einem stehenden Fahrer reagieren und Gas geben, kann dieser Vorgang durch die Vernetzung der Fahrzeuge untereinander deutlich schneller vonstatten gehen. Das Fahrzeug würde erkennen, dass alle anderen Fahrzeuge in der Reihe beschleunigen und entsprechend selbst seine Geschwindigkeit erhöhen. Dadurch wäre es möglich, deutlich mehr Verkehrsteilnehmer über eine grüne Ampel zu befördern als vorher und der Verkehr würde sich nicht an der roten Ampel stauen. Allerdings ist das bislang nur ein Gedankenexperiment. Dennoch könnte es möglicherweise in einigen Jahren zur Realität werden. Das NaSch-Modell würde sich dann durch die vielen Neuerungen im Straßenverkehr deutlich verändern und es wäre von großem Interesse herauszufinden, ob Staus dann der Vergangenheit angehören.

# Literaturverzeichnis

- [1] K. Nagel and M. Schreckenberg. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2(12):2221–2229, 1992.
- [2] S. Krauß. *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*. Dissertation, Universität zu Köln, 06.04.1998.
- [3] T. Gabel and M. Riedmiller. The cooperative driver: Multi-agent learning for preventing traffic jams. *International Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 1(4):67–76, 2012.
- [4] W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg. A realistic two-lane traffic model for highway traffic. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 35(15):3369–3388, 2002.
- [5] K. Nagel, D. E. Wolf, P. Wagner, and P. Simon. Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach. *Physical Review E*, 58(2):1425–1437, 1998.
- [6] J. Schlosser. *Wissenschaftliche Arbeiten schreiben mit LaTeX: Leitfaden für Einsteiger*. mitp Professional. MITP, Frechen, 6th ed. edition, 2016.
- [7] I. Fibinger. *SVG - Scalable vector graphics: Praxiswegweiser und Referenz für den neuen Vektorgrafikstandard*. New technology. Markt+Technik-Verl., München, 2002.
- [8] U. Schöler. *Inkscape: Der Weg zur professionellen Vektorgrafik*. Hanser, München, 1. Aufl. edition, 2014.
- [9] M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, and H. Winner. *Autonomes Fahren*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.

# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst zu haben. Sowohl inhaltlich als auch wörtlich entnommene Inhalte wurden als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher von mir nicht in gleicher oder ähnlicher Form an anderer Stelle schon einmal vorgelegt.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift