

1 Simulationsmodell

1.1 Allgemeines

Der Fußgängerverkehr wird auf der Basis eines mikroskopischen Modellansatzes simuliert. Dabei wird der betrachtete Fußgängerverkehr im Gegensatz zu makroskopischen Modellansätzen (HENDERSON), bei denen alle betrachteten Fußgänger und deren Verhalten als eine Gesamtheit beschrieben werden, durch einzelne identifizierbare Fußgänger und deren Verhalten mathematisch abgebildet. Der mathematische Modellansatz ist numerisch umzusetzen. Hierzu sind Approximationen in Raum und Zeit durchzuführen, die eine möglichst gute Realisierung des Modellansatzes gewährleisten. Schließlich ist die numerische Umsetzung programmtechnisch zu realisieren, um die Simulation von Fußgängerverkehr auf einem Rechner durchführen zu können.

Im Folgenden wird zunächst der mathematische Ansatz der Fußgängersimulation erläutert. Es folgt die Darstellung der numerischen Realisierung des Modellansatzes sowie die programmtechnische Realisierung der numerischen Modellierung. Abschließend wird auf die Anwendung der Fußgängersimulation eingegangen.

1.2 Mathematischer Ansatz

Das Simulationsmodell basiert auf einem mikroskopischen Modellansatz nach (HELBING, Kapitel 4). Hierbei wird ein Fußgänger i vereinfacht als ein Punkt in einem zweidimensionalen euklidischen Raum i^2 aufgefasst. Für diesen Raum i^2 wird ein kartesisches Koordinatensystem festgelegt. Es ermöglicht die vektorielle Beschreibung von Positionen und Richtungen im Raum i^2 . Die Position eines Fußgängers i zu einem Zeitpunkt t entspricht einem zeitabhängigen Ortsvektor $\mathbf{x}_i(t)$ mit den Komponenten $x_i(t)$ und $y_i(t)$.

$$\text{Gleichung .1: } \mathbf{x}_i(t) = \begin{bmatrix} x_i(t) \\ y_i(t) \end{bmatrix}$$

Die Kinematik eines Fußgängers i ergibt sich durch die Änderung seiner Position $\mathbf{x}_i(t)$ und seiner Geschwindigkeit $\mathbf{v}_i(t)$ innerhalb eines Zeitintervalls dt . Die Änderung seiner Position $d\mathbf{x}_i(t)/dt$ entspricht seiner Geschwindigkeit $\mathbf{v}_i(t)$:

$$\text{Gleichung .2: } \frac{d\mathbf{x}_i(t)}{dt} = \mathbf{v}_i(t) = \begin{bmatrix} v_{x,i}(t) \\ v_{y,i}(t) \end{bmatrix}$$

Die Änderung seiner Geschwindigkeit $d\mathbf{v}_i(t)/dt$ entspricht seiner Beschleunigung $\mathbf{a}_i(t)$:

$$\text{Gleichung .3: } \frac{d\mathbf{v}_i(t)}{dt} = \mathbf{a}_i(t) = \begin{bmatrix} a_{x,i}(t) \\ a_{y,i}(t) \end{bmatrix}$$

Bewegung eines Fußgängers

Die Bewegung eines Fußgängers ergibt sich aus seiner Reaktion auf den eigenen Zustand und seiner Reaktion auf die Wahrnehmung seines Umgebungszustands. Befindet er sich beispielsweise nicht an seinem Ziel, so reagiert er durch Bewegung auf dem kürzesten Weg zum Ziel. Kreuzt er auf diesem Weg beispielsweise ein Hindernis oder einen anderen Fußgänger, so reagiert er durch Ausweichen, Beschleunigen oder Bremsen.

Die Reaktion eines Fußgängers i spiegelt sich ausschließlich in seiner Beschleunigung $\mathbf{a}_i(t)$ wieder. Die Geschwindigkeit $\mathbf{v}_i(t)$ und die Position $\mathbf{x}_i(t)$ ergeben sich mit Hilfe der Gleichungen (2) und (3) aus der Beschleunigung $\mathbf{a}_i(t)$. Die Beschleunigung $\mathbf{a}_i(t)$ entspricht im mikroskopischen Modellansatz einer Kraft $\mathbf{f}_i(t)$, die die individuelle Reaktion eines Fußgängers i auf den eigenen Zustand und auf die Wahrnehmung seines Umgebungszustands widerspiegelt. Diese Kraft unterliegt individuellen Schwankungen, die in einem zusätzlichen Fluktuationsterm $\xi_i(t)$ berücksichtigt werden:

$$\text{Gleichung .4: } \mathbf{a}_i(t) = \mathbf{f}_i(t) + \xi_i(t)$$

Der Fluktuationsterm $\xi_i(t)$ wird im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Die Kraft $\mathbf{f}_i(t)$ eines Fußgängers i setzt sich aus unterschiedlichen Anteilen zusammen. Sie lässt sich als Summe aus einem Eigenanteil $\mathbf{f}_i^0(t)$, einem Anteil aufgrund von Einwirkungen durch Hindernisse $\mathbf{f}_i^B(t)$ und aller Anteile aufgrund von Einwirkungen durch weitere Fußgänger $\mathbf{f}_{ij}(t)$ darstellen:

$$\text{Gleichung .5: } \mathbf{f}_i(t) = \mathbf{f}_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i) + \mathbf{f}_i^B(\mathbf{x}_i) + \sum_j \mathbf{f}_{ij}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{x}_j, \mathbf{v}_j)$$

Einfluss des Fußgängereigenanteils auf die Beschleunigung

Der Eigenanteil $f_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i)$ der Beschleunigung eines Fußgängers i beschreibt sein Verhalten ohne Einwirkungen von außen. Er ermöglicht die Bewegung des Fußgängers i auf dem direkten Weg zu seinem nächsten Ziel \mathbf{z}_i . Dabei passt sich die Fußgängergeschwindigkeit $\mathbf{v}_i(t)$ dem Wert seiner Wunschgeschwindigkeit \mathbf{v}_i^0 und der direkten Richtung zum Ziel $\mathbf{e}_i(t)$ mit einer Anpassungszeit τ_i an:

Gleichung .6:
$$\mathbf{f}_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i) = \frac{\mathbf{v}_i^0 \mathbf{e}_i(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i}$$

Die Zielrichtung $\mathbf{e}_i(t)$ hat die Länge 1 und wird wie folgt bestimmt:

Gleichung .7:
$$\mathbf{e}_i(t) = \frac{\mathbf{z}_i - \mathbf{x}_i(t)}{\|\mathbf{z}_i - \mathbf{x}_i(t)\|} \text{ mit } \|\mathbf{u}\| = \sqrt{\sum_k u_k^2}$$

Die Kraft $\mathbf{f}_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i)$ des Eigenanteils an der Beschleunigung des Fußgängers i lässt sich auch als negativer Gradient $-\nabla_{\mathbf{x}_i}$ eines Potentials $V_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i)$ beschreiben:

Gleichung .8:
$$\mathbf{f}_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i) = -\nabla_{\mathbf{x}_i} V_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i)$$

$$V_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i) =$$

Gleichung .9:
$$\frac{\mathbf{v}_i^0 \|\mathbf{z}_i - \mathbf{x}_i(t)\| + \mathbf{v}_i(t) \cdot \mathbf{x}_i(t)}{\tau_i}$$

Das Potential ist grafisch gut darstellbar. In Abbildung 6.2 ist beispielsweise das Potential $V_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{0})$ des Eigenanteils an der Beschleunigung eines stehenden Fußgängers i in einem $20 \times 10 \text{ m}^2$ großen Gebiet dargestellt. Deutlich ist das Potentials in Form eines Kegelmantels mit einem Minimum bei $x = 15 \text{ m}$ und $y = 5 \text{ m}$ zu erkennen. Hier befindet sich das Ziel \mathbf{z}_i des Fußgängers. Befindet sich der Fußgänger i zum Zeitpunkt t am einem Punkt $\mathbf{x}_i(t)$ im Gebiet, so entspricht der negative Gradient $-\nabla_{\mathbf{x}_i}$ (die Neigung in Richtung des größten Gefälles) von $V_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{0})$ der Kraft $\mathbf{f}_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{0})$ und somit dem Eigenanteil seiner Beschleunigung $\mathbf{a}_i^0(t)$.

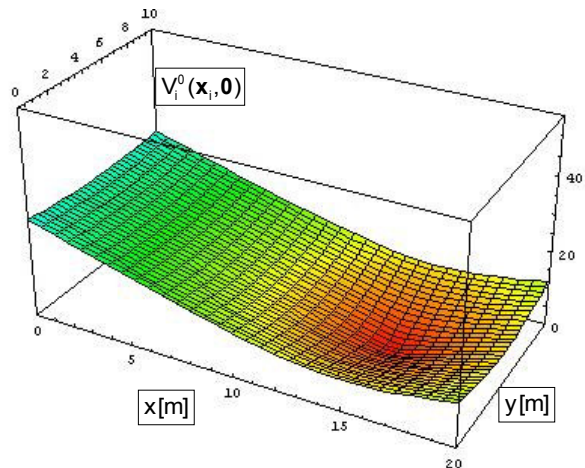


Abbildung .2: Grafischer Verlauf des Potential für den Eigenanteil der Beschleunigung eines stehenden Fußgängers mit dem Ziel $\mathbf{z} = [15, 5]^T$.

Bewegt sich der Fußgänger i zu seinem Ziel \mathbf{z}_i , so neigt sich der Kegelmantel des Potentials $V_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i)$ in Richtung der Fußgängerposition $\mathbf{x}_i(t)$. Diese Neigung wird größer, je schneller sich der Fußgänger bewegt. Bewegt er sich mit seiner Wunschgeschwindigkeit \mathbf{v}_i^0 , so ist die Neigung des Kegelmantels so groß, dass sich das Potential auf einem horizontalen Strahl von \mathbf{z}_i durch $\mathbf{x}_i(t)$ befindet. Der Eigenanteil an der Beschleunigung des Fußgängers i ist in diesem Fall $\mathbf{a}_i^0(t) = \mathbf{0}$.

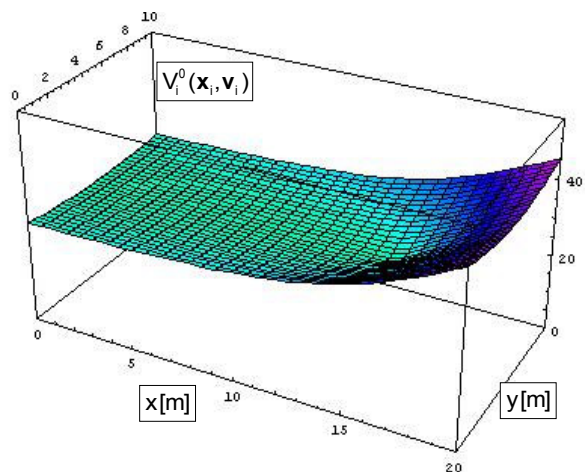


Abbildung 1.1: Grafischer Verlauf des Potential für den Eigenanteil der Beschleunigung eines Fußgängers mit der Position $\mathbf{x}_i = [0, 5]^T$, der Geschwindigkeit $\mathbf{v}_i = [1.34, 0]^T$ und dem Ziel $\mathbf{z} = [15, 5]^T$.

Einfluss von Hindernissen auf die Beschleunigung

Der Anteil an der Beschleunigung eines Fußgängers i , der aufgrund von Einwirkungen durch Hindernisse entsteht, wird durch eine abstoßende Kraft $\mathbf{f}_i^B(\mathbf{x}_i)$ formuliert. Sie ermöglicht das Bremsen des Fußgängers i vor einem festen

Hindernis. Sie lässt sich durch den negativen Gradient $-\nabla_{\mathbf{x}_i}$ eines repulsiven Potentials $V^B(\mathbf{x}_i)$ beschreiben:

Gleichung .10: $\mathbf{f}_i^B(\mathbf{x}_i) = -\nabla_{\mathbf{x}_i} V^B(\mathbf{x}_i)$

Entspricht das Hindernis einer punktuellen Behinderung am Punkt (x_B, y_B) , so lässt sich das Potential $V^B(\mathbf{x}_i)$ als eine exponentiell ansteigende Spitze beschreiben:

Gleichung .11: $V^B(\mathbf{x}_i) = S \cdot e^{-\sqrt{(x_i - x_B)^2 / R_x^2 + (y_i - y_B)^2 / R_y^2}}$

Hierbei entspricht S der Stärke des Potentials (Höhe der Spitze). R_x und R_y sind die Reichweiten des Potentials in x- und y-Richtung.

Ein Potential $V^B(\mathbf{x}_i)$ für nicht punktuelle Hindernisse ergibt sich durch Beschreibung der Hindernisse als eine Punktmenge. So sind beispielsweise die Wände, die zum Potential $V^B(\mathbf{x}_i)$ in Abbildung 1.4 führen, als Menge von Punkten, die auf vier Strecken liegen, formuliert. Deutlich sind die exponentiellen Anstiege im Bereich der Wände zu erkennen.

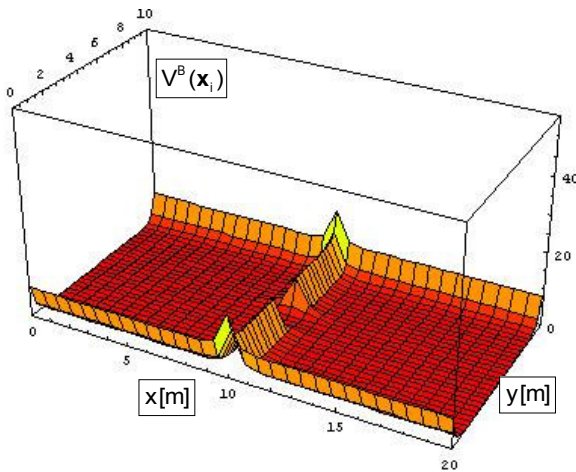


Abbildung 1.4: Grafischer Verlauf des Potential für den Anteil der Beschleunigung eines Fußgängers i infolge von Hindernissen.

Einfluss anderer Fußgänger auf die Beschleunigung

Der Anteil an der Beschleunigung eines Fußgängers i, der aufgrund von Einwirkungen durch andere Fußgänger j entsteht, wird durch eine abstoßende Kraft $\mathbf{f}_{ij}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{x}_j, \mathbf{v}_j)$ formuliert. Sie ermöglicht das Bremsen, Beschleunigen oder Ausweichen des Fußgängers i beim Begegnungsfall mit einem anderen Fußgänger j. Sie lässt sich wie die Kraft $\mathbf{f}_i^B(\mathbf{x}_i)$ durch den

negativen Gradient $-\nabla_{\mathbf{x}_i}$ eines repulsiven Potentials $V_{ij}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{x}_j, \mathbf{v}_j)$ beschreiben:

Gleichung .12: $\mathbf{f}_{ij}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{x}_j, \mathbf{v}_j) = -\nabla_{\mathbf{x}_i} V_{ij}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{x}_j, \mathbf{v}_j)$

Das Potential lässt sich als eine exponentiell aufsteigende Spitze an der Position $\mathbf{x}_j(t)$ des jeweils anderen Fußgängers j darstellen:

Gleichung .13: $V_{ij}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{x}_j, \mathbf{v}_j) = S \cdot e^{-\sqrt{((x_i - x_j)\mathbf{e}_1)^2 / R^2 + ((x_i - x_j)\mathbf{e}_2)^2 / (\gamma_i R)^2}}$

Das Potential ist bezüglich der Richtung $\mathbf{e}_2(t)$ achsensymmetrisch. Sie ist die Wirkungsrichtung von j auf i und wird durch die mit den Wunschgeschwindigkeiten v_i^0 und v_j^0 gewichteten normierten Zielrichtungen $\mathbf{e}_i(t)$ und $\mathbf{e}_j(t)$ bestimmt:

Gleichung .14: $\mathbf{e}_2(t) = \frac{v_i^0 \mathbf{e}_i(t) - v_j^0 \mathbf{e}_j(t)}{\|v_i^0 \mathbf{e}_i(t) - v_j^0 \mathbf{e}_j(t)\|}$

$\mathbf{e}_1(t)$ steht senkrecht zu $\mathbf{e}_2(t)$ und beschreibt die seitliche Richtung des Potentials. S ist die Stärke und R ist Reichweite des abstoßenden Potentials. Die Reichweite R ist auf den beiden Potentialseiten in Richtung $\mathbf{e}_1(t)$ gleich. In der Wirkungsrichtung $\mathbf{e}_2(t)$ unterscheidet sich die Reichweite je nachdem, ob der Fußgänger i sich hinter oder vor dem Fußgänger j befindet. Befindet sich i hinter j ($(\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t))\mathbf{e}_2(t) \geq 0$), so wird die Reichweite R mit $\gamma_i(t) = \vartheta$ gewichtet, wobei $0 < \vartheta < 1$ gilt. Befindet sich i vor j ($(\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t))\mathbf{e}_2(t) < 0$), so wird die Reichweite R mit dem geschwindigkeitsabhängigen Term $\gamma_i(t) = 1 + \Delta t v_i(t)$ gewichtet.

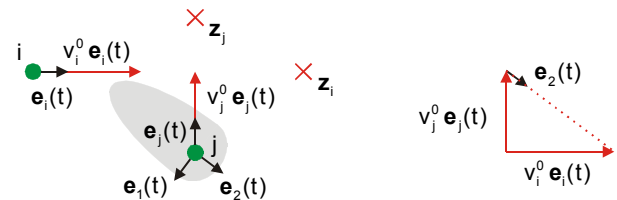


Abbildung .5: Abstoßendes Potential (graue Fläche) für den Anteil der Beschleunigung eines Fußgängers i infolge der Bewegung eines anderen Fußgängers j.

Gesamtpotential für die Beschleunigung

Die Kraft $\mathbf{f}_i(t)$, die sich nach Gleichung 1.5 aus den Anteilen für den eigenen Antrieb $\mathbf{f}_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i)$, für Hindernisse $\mathbf{f}_i^B(\mathbf{x}_i)$ und für andere Fußgänger $\mathbf{f}_{ij}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{x}_j, \mathbf{v}_j)$ zusammensetzt, ist auch als negativer Gradient $-\nabla_{\mathbf{x}_i}$ eines Gesamtpotentials $V_i(t)$ interpretierbar. Das Potential setzt sich aus den Potentialen für den Eigenanteil $V_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i)$, den Anteil infolge von Hindernissen $V^B(\mathbf{x}_i)$ und den Anteil infolge von anderen Fußgängern $V_{ij}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{x}_j, \mathbf{v}_j)$ zusammen:

$$\text{Gleichung .15: } V_i(t) = V_i^0(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i) + V^B(\mathbf{x}_i) + \sum_j V_{ij}(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{x}_j, \mathbf{v}_j)$$

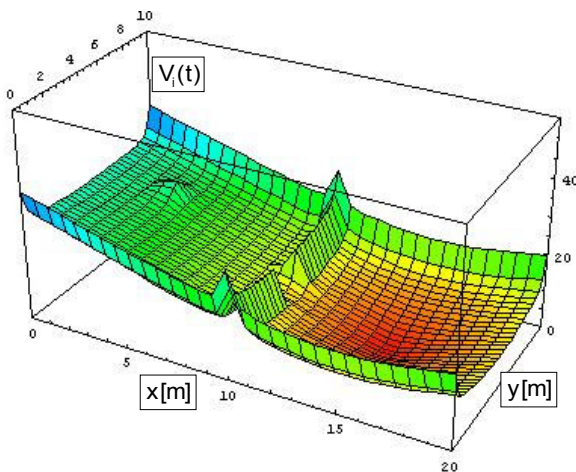


Abbildung .6: Grafischer Verlauf des Gesamtpotential der Beschleunigung eines stehenden Fußgängers mit der Position $\mathbf{x}_i = [0, 5]^T$ und dem Ziel $\mathbf{z} = [15, 5]^T$ unter Berücksichtigung von Hindernissen und einem anderen Fußgänger j bei $\mathbf{x}_j = [3, 7]^T$.

1.3 Numerische Realisation

Das mikroskopische Simulationsmodell berechnet das Verhalten einer Vielzahl von Fußgängern. Für jeden dieser Fußgänger i gibt es ein gewöhnliches Differentialgleichungssystem mit den beiden Gleichungen 6.2 und 6.3 unter Berücksichtigung der Gleichung 6.4:

$$\text{Gleichung .16: } \begin{aligned} \frac{d\mathbf{x}_i(t)}{dt} &= \mathbf{v}_i(t) \\ \frac{d\mathbf{v}_i(t)}{dt} &= \mathbf{f}_i(t) \end{aligned}$$

Die Berechnung der Position $\mathbf{x}_i(t)$ und der Geschwindigkeit $\mathbf{v}_i(t)$ jedes Fußgängers i für einen Zeitpunkt t erfolgt durch eine numerische Lösung des Differentialgleichungssystems. Hierzu wird der zeitliche Lösungsraum diskretisiert.

Zeitdiskretisierung

Die Diskretisierung der Zeit erfolgt durch Aufteilung des offenen Zeitraums ab einem Anfangszeitpunkt t^0 in $k = 1, 2, \dots$ Zeitintervalle der Länge Δt^k . Dabei entstehen Zeitpunkte t^k vom Zeitpunkt t^0 bis zum Ende des betrachteten Zeitraums.

Für den zeitlich diskretisierten Lösungsraum werden die Zustandsvariablen der Position und der Geschwindigkeit als Unbekannte \mathbf{x}^k und \mathbf{v}^k eingeführt. Der Index k kennzeichnet den Zeitpunkt für die Zustandsvariable.

Auf der Grundlage der zeitlichen Diskretisierung werden die Bestimmungsgleichungen für die unbekannt Zustandsvariablen aufgestellt. Dabei wird ein Zeitschrittverfahren verwendet. Es berechnet die unbekannt Zustandsvariablen sukzessive Zeitschritt für Zeitschritt. Für die Fußgängersimulation wird ein Runge-Kutta-Verfahren vierter Ordnung verwendet (ENGELN-MÜLLGES S. 319-338).

Ortsdiskretisierung

Eine örtliche Diskretisierung des Lösungsraums ist nicht notwendig. Die örtlichen Zustandsgrößen der Position und der Geschwindigkeit können entsprechend Gleichung 1.5 kontinuierlich angegeben werden. Allerdings ist bei einer derartig genauen Berechnung der Zustandsgrößen auf den Rechenaufwand zu achten. Der Rechenaufwand des mikroskopischen Simulationsmodells steigt mit der Anzahl der simulierten Fußgänger, denn für jeden Fußgänger muss in jedem Zeitschritt das Differentialgleichungssystem gelöst werden. Bei der Bemessung der in dieser Arbeit zu untersuchenden Fußgängeranlagen ist die Anzahl der Fußgänger auf ein Maß beschränkt, das eine kontinuierliche Berechnung der örtlichen Zustandsgrößen erlaubt.

Für größere Gebiete mit wesentlich mehr Fußgängern bietet sich eine örtliche Diskretisierung des Lösungsraums in gleichartigen Zellen (Dreiecke, Vierecke, Sechsecke) an, die nur einen Fußgänger aufnehmen können. Auf der Grundlage einer solchen Diskretisierung ist die Simulation mit Hilfe eines zellularen Automaten möglich, wie sie beispielsweise in (SCHADSCHNEIDER) beschrieben wird. Ein zellulärer Automat ermöglicht eine schnelle und nur von der Anzahl der Zellen abhängige Simulation von sehr vielen Fußgängern. Durch die örtliche Diskretisierung verliert die Simulation jedoch an Genauigkeit.

Anfangs- und Randbedingungen

Der Lösungsraum für die Berechnung von Fußgängerverhalten ist in der Regel zeitlich und örtlich begrenzt. Zeitlich beginnt die Berechnung

ab einem Anfangszeitpunkt t^0 . Zu diesem Zeitpunkt t^0 müssen die Position $\mathbf{x}_i(t^0)$ und die Geschwindigkeit $\mathbf{v}_i(t^0)$ für jeden Fußgänger i im Simulationsgebiet bekannt sein. Diese gegebenen Zustandsgrößen $\mathbf{x}_i^0 = \mathbf{x}_i(t^0)$ und $\mathbf{v}_i^0 = \mathbf{v}_i(t^0)$ sind die Anfangsbedingungen für die Berechnung.

Örtlich ist das Simulationsgebiet durch einen Rand begrenzt. Dieser Rand kann von Fußgängern während der Berechnung überschritten werden. In diesem Fall ist zu klären, was mit den Fußgängern passieren soll. Verlassen sie das Gebiet, weil ihr Ziel außerhalb liegt oder weil sie abgedrängt wurden, so sind sie aus der Berechnung zu entfernen. Sollen sie in das Gebiet eintreten, so sind sie mit bekannten Größen für die Position \mathbf{x}_i^R und die Geschwindigkeit \mathbf{v}_i^R sowie weiteren Parametern, wie ihr Ziel \mathbf{z}_i oder ihre Wunschgeschwindigkeit v_i^0 zu erzeugen. Das Zerstören und besonders das Erzeugen von simulierten Fußgängern auf dem Gebietsrand zu einem Zeitpunkt entspricht den Randbedingungen der Berechnung.

Die Randbedingungen werden nicht wie beispielsweise Randbedingungen von Differentialgleichungen eines Strömungsfeldes oder wie bei zellularen Automaten formuliert. Sie bereiten aber die gleichen Schwierigkeiten bei der Fußgängersimulation. So ist beispielsweise die Simulation eines Staus innerhalb oder außerhalb des Gebiets für Fußgänger außerhalb oder innerhalb des Gebiets schwer oder gar nicht mit Randbedingungen abbildbar.

Programmtechnische Realisierung

Die programmtechnische Realisierung des mikroskopischen Modellansatzes und seiner numerischen Umsetzung erfolgt in der Programmiersprache Java. Java ermöglicht insbesondere eine von einer Rechnerplattform unabhängigen Implementierung und Anwendung, eine Unterstützung der objektorientierten Modellierung sowie einer einfachen Parallelisierung.

Für die Fußgängersimulation wird das Gebiet, auf dem sich die Fußgänger bewegen, als ein Objekt modelliert. Seine Eigenschaften umfassen insbesondere die zweidimensionale Geometrie des Gebiets mit dem dazugehörigen Koordinatensystem und einen Verweis auf alle Fußgänger im Gebiet.

Jeder simulierte Fußgänger entspricht ebenfalls einem Objekt. Die Objekte der Fußgänger sind zu einer Klasse zusammengefasst. Sie haben die gleichen Eigenschaften und Methoden. Die

Eigenschaften umfassen neben dem Verweis auf das Gebiet, indem sich der Fußgänger befindet, den Zustandsgrößen für die Position und die Geschwindigkeit des Fußgängers auch Parameter, wie seine Wunschgeschwindigkeit, seine Anpassungszeit oder sein Ziel. Die Methoden umfassen neben grundlegenden Funktionen, wie den Vergleich mit dem Fußgänger oder den Zugriffen auf seine Eigenschaften, eine Methode, die das Verhalten des simulierten Fußgängers beschreibt. Die Verhaltensbeschreibung erfolgt durch die Berechnung der Beschleunigung in einem Zeitintervall gemäß dem Gleichungssystem 1.16 mit einem Runge-Kutta-Verfahren vierter Ordnung. Durch die Berechnung der Beschleunigung eines Fußgängers im zugehörigen Objekt ist es möglich, auf einfache Weise das Verhalten jedes einzelnen Fußgängers nicht nur durch Änderung der Eigenschaften sondern auch durch Änderung der Beschleunigungsberechnung individuell anzupassen. So ist es beispielsweise möglich, durch Spezialisierung der Klasse für die Fußgänger eine abgeleitete Klasse für Rollstuhlfahrer zu entwickeln, bei der sich das Beschleunigungsverhalten wesentlich von dem eines allgemeinen Fußgängers unterscheidet.

Für die Fußgängersimulation ist ein weiteres Objekt notwendig, das die zeitliche Abfolge der Simulation regelt. Das Objekt ist ein so genannter Thread, der einen eigenständigen Prozess beschreibt. Der Prozess, der sich über entsprechende Methoden starten und stoppen lässt, wird immer wieder sequentiell durchlaufen. In jedem Durchlauf werden die Zustandsgrößen aller Fußgänger für einen neuen Zeitschritt berechnet. Es ist möglich, den Prozess auf mehrere Threads zu verteilen und so die Berechnung der Fußgängerbewegungen zu parallelisieren.

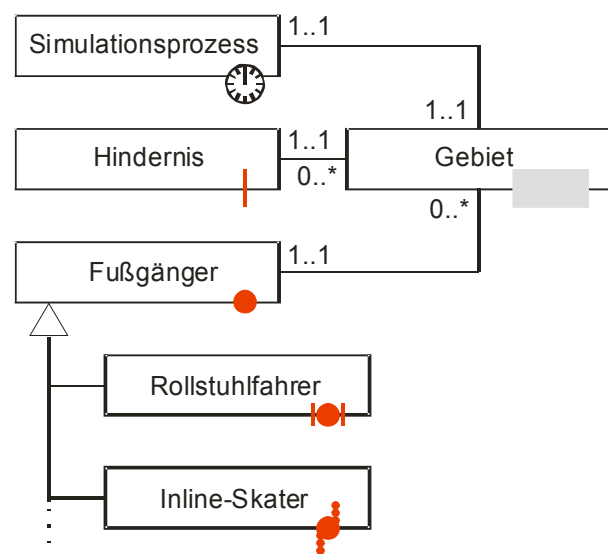


Abbildung .7: Klassendiagramm zur Fußgängersimulation

1.4 Anwendung

Das Simulationsmodell soll zur Prognose der Verhaltensweisen von Fußgängern bei mittleren und hohen Verkehrsdichten mit unterschiedlichen Gegenverkehrsanteilen angewendet werden. Eine solche Prognose führt nur dann zu zuverlässigen Aussagen, wenn das Simulationsmodell zuvor ausreichend verifiziert wurde. Die Verifikation wird anhand einer Eichung der Modellparameter bezogen auf Messungen für zwei Szenarien durchgeführt.

1.4.1 Eichung des Simulationsmodells

Das Ziel der Eichung eines Simulationsmodells ist eine möglichst korrekte Festlegung seiner Modellparameter. Das heißt, die Modellparameter sind so zu bestimmen, dass das Simulationsmodell in der Lage ist, gemessene Zustände und Verhaltensweisen eines Fußgängerverkehrs bezüglich qualitativer und quantitativer Merkmale reproduzieren zu können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Eichung wesentlich von der Güte der verwendeten Messungen abhängt. Je genauer die Messergebnisse den gemessenen Fußgängerverkehr wiedergeben, desto besser gelingt die Festlegung der Modellparameter.

Messungen

Die Eichung des Simulationsmodells erfolgt anhand von zwei Szenarien. Das erste Szenario bezieht sich auf den Eingangsbereich der Messe/Nord. Der 10 m lange und 4 m breite Bereich ist auf beiden Seiten durch einen Zaun begrenzt, sodass kein seitliches Ausweichen aus dem Bereich möglich ist. Die Fußgänger durchqueren diesen Bereich in einer Richtung ohne Gegenverkehr, nachdem sie zuvor aus einer von vielen Stadtbahnen ausgestiegen sind und dann zur Messe wollen. Für dieses Szenario stehen vier Messungen bei unterschiedlichen Dichten zu Verfügung (siehe Tabelle 1.1).

Das zweite Szenario bezieht sich auf einen Fußgängerbereich in der Großen Packhofstraße beziehungsweise in der Hohen Straße. Der 20 m lange und 4 bzw. 4.5 m breite Bereich liegt 50 cm auf beiden Seiten von den Häuserwänden entfernt. Das seitliche Ein- oder Austreten in oder aus dem Gebiet ist vernachlässigbar. Der Gegenverkehrsanteil liegt bei 36.1 bis 43.6 %. Für dieses Szenario stehen drei Messungen bei unterschiedlichen Verkehrsdichten zur Verfügung (siehe Tabelle 1.1)

Nr.	Abschnitt	GV	Dichte	Stärke	V
		[%]	[Pers/m ²]	[Pers/ms]	[m/s]
2.02	Gr. Packhofstraße	36.1	0.12	0.16	1.32
2.04	Gr. Packhofstraße	43.6	0.17	0.20	1.22
3.04	Hohe Straße	42.5	0.28	0.29	1.05

8.02	Messe / Nord	0.0	0.10	0.12	1.23
8.03	Messe / Nord	0.0	0.04	0.06	1.35
8.05	Messe / Nord	0.0	0.63	0.66	1.06
8.06	Messe / Nord	0.0	0.44	0.50	1.13

Tabelle .1: Daten zu den beiden Szenarien

Eingangs- und Vergleichsgrößen

Die Messergebnisse sind so aufzubereiten, dass sie dem Simulationsmodell als Eingangs- und Vergleichsgrößen dienen. Die Eingangs- und Vergleichsgrößen entsprechen den Bedingungen, die zu Beginn und am Schluss der Simulation im Modellgebiet sowie während der Simulation an den Gebietsrändern erfüllt sein müssen.

Die Anfangsbedingungen und die Randbedingungen, bei denen Fußgänger in das Gebiet eintreten, sind notwendige Eingangsgrößen. Die Endbedingungen und die Randbedingungen, bei denen Fußgänger das Gebiet verlassen, sind mögliche Vergleichsgrößen. Die Eingangsgrößen umfassen alle Modellparameter jedes zu berücksichtigen Fußgängers i :

- Die Position $\mathbf{x}_i(t)$ zur Zeit $t = t_0$ der Anfangsbedingung oder zu einer Zeit t während der Simulation auf dem Rand ist durch die Messung bestimmbar.
- Die Geschwindigkeit $\mathbf{v}_i(t)$ wird nicht gemessen. Sie passt sich in der Simulation jedoch schnell der Wunschgeschwindigkeit \mathbf{v}_i^0 an, sodass eine Gleichsetzung $\mathbf{v}_i(t) = \mathbf{v}_i^0 \mathbf{e}_i(t)$ gerechtfertigt ist.
- Die Wunschgeschwindigkeit wurde für die Szenarien zuvor empirisch bestimmt.
- Das Ziel \mathbf{z}_i ist aus der Messung deutlich als linker oder rechter Rand identifizierbar.
- Die Anpassungszeit τ_i lässt sich aufgrund von empirischen Untersuchungen auf $\tau_i = 0.5$ s festlegen.
- Der Parameter ϑ für die Gewichtung der Reichweite des Potentials eines anderen Fußgängers j nach hinten hat keinen entscheidenden Einfluss auf die Simulation und wird mit $\vartheta = 0.8$ s festgelegt.
- Die Stärke S_i^H und Reichweite R_i^H der Potentiale von Hindernissen H werden für die Eichung mit $S_i^H = 20.0$ und $R_i^H = 20$ cm festgelegt.

- Die Stärke S_i^j und die Reichweite R_i^j der Potentiale von anderen Fußgängern j sowie die Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten v_i^0 ist aus Messungen nicht genau genug zu ermitteln. Sie sind somit die zu eichenden Parameter.

Als Vergleichsgrößen werden die zeitlichen Verläufe der Austritte von Fußgängern während der Simulation an den Rändern in Gehrichtung und die Verteilung der beeinflussten Geschwindigkeiten verwendet.

Parameterstudie

Für die zu eichenden Parameter wird eine Parameterstudie durchgeführt. Dabei werden die Eichungsparameter solange variiert, bis die Simulationsergebnisse für die gewählten Vergleichsgrößen im Vergleich zu den Messergebnissen geringe Diskrepanzen aufweisen. Die im Folgenden angegebenen Variationsbereiche wurden zur Verdeutlichung ausgewählt und entsprechen nur einem Ausschnitt der tatsächlich untersuchten Bereiche.

In der Simulation hat sich gezeigt, dass die durch Messung ermittelte Normalverteilung für die Wunschgeschwindigkeiten der Fußgänger in der Simulation mit einer Standardabweichung von $\sigma = 0.24 \text{ m/s}$ bzw. $\sigma = 0.22 \text{ m/s}$ nicht mit dem Simulationsmodell verträglich ist. Bei diesen Standardabweichungen werden in den Simulationen 2.5 % der Fußgänger mit einer viel zu langsamen Wunschgeschwindigkeit und 2.5 % der Fußgänger mit einer viel zu schnellen Wunschgeschwindigkeit erzeugt. Diese Fußgänger beeinflussen den Gesamtverkehr derart, dass sich ein nicht nachvollziehbares Gehverhalten ergibt. In der Parameterstudie wird daher die Standardabweichung von $\sigma = 0$ ($v_i^0 = \text{const}$) bis $\sigma = 0.24 \text{ m/s}$ variiert.

Die Reichweite R_i^j des exponentiellen Potentials eines anderen Fußgängers j ist in der Modellierung nicht eindeutig definiert. Darüber hinaus ist sie, wie die zugehörige Stärke S_i^j keine messbare Größe.

Die Reichweite wird zwischen $R_i^j = 50 \text{ cm}$ und $R_i^j = 77 \text{ cm}$ (empirisch ermittelter seitlicher Abstand von Körpermitte zu Körpermitte) und die Stärke von $S_i^j = 3.5$ bis $S_i^j = 6.5$ variiert.

Die Simulation zu einem festen Parametersatz wird jeweils fünfmal durchgeführt, um für die Mittelwerte bzw. Variationen der stochastischen Größen in der Modellierung eine Aussage treffen zu können. Dem steht nur eine einzige Messung entgegen. Die qualitative und quantitative Bewertung der Parametersätze erfolgt aufgrund von Vergleichen für den zeitlichen Verlauf der

Austritte von Fußgängern aus dem Simulationsgebiet und für die Verteilung der beeinflussten Geschwindigkeiten.

Qualitative und quantitative Bewertung

Für die qualitative Bewertung der Parametersätze wird zunächst die Messung mit der höchsten Verkehrsdichte gewählt. Es ist die Messung 8.05 des ersten Szenarios mit einer Verkehrsdichte von $0.63 \text{ Personen/m}^2$. Das sind 305 austretende Fußgänger während der zweiminütigen Messung.

In der zeitlichen Verteilung der Austritte von Fußgängern aus dem Untersuchungsgebiet, die in Abbildung 1.8 dargestellt ist, wird die Ähnlichkeit der Simulationsergebnisse für alle Parametersätze deutlich. Im Gegensatz zur gemessenen zeitlichen Verteilung verlaufen die simulierten zeitlichen Verteilungen sehr viel glatter. Dies ist auf den Vergleich von gemittelten Simulationswerten zu den Werten einer einzigen Messung zurückzuführen. Da die Kurven qualitativ beieinander liegen, ist die Wahl eines Parametersatzes aus der zeitlichen Verteilung der Fußgängeraustritte nicht zu treffen.

In der Verteilung der beeinflussten Geschwindigkeit, die in Abbildung 1.9 dargestellt ist, ergeben sich größere Unterschiede. Die Geschwindigkeitsverteilungen für $R_i^j = 77 \text{ cm}$ sind besonders im Bereich des Anstiegs bis $v \approx 1.39 \text{ m/s}$ im Gegensatz zur Messung deutlich zu langsam. Der Maximalwert der relativen Häufigkeit von v ist bei einer konstanten Wunschgeschwindigkeit $v_i^0 = 1.39 \text{ m/s}$ ($\sigma = 0$) deutlich zu groß und bei einer Standardabweichung von $\sigma = 0.24 \text{ m/s}$ deutlich zu gering. Im Vergleich zur Messung liefert eine Normalverteilung für v_i^0 mit $\sigma = 0.04 \text{ m/s}$ eine gute Näherung an die Verteilung der beeinflussten Geschwindigkeit. Bei einer Stärke des Potentials von einem anderen Fußgängers von $S = 3.5$ ist der Maximalwert deutlich zu hoch. Die Verteilungen der beeinflussten Geschwindigkeit v kann mit $S = 5.0$ und $S = 6.5$ dicht beieinander.

Die Verteilung der gesamten beeinflussten Geschwindigkeit scheint der Normalverteilung der Wunschgeschwindigkeit nahezu entsprechen. Bei einer Verkehrsdichte von $0.63 \text{ Personen/m}^2$ ist die Beobachtung, dass jeder Fußgänger mit seiner Wunschgeschwindigkeit gehen kann, für eine allgemeingültige Verkehrssituation nicht plausibel. Durch den Ausstieg aus den Stadtbahnen ergibt sich offensichtlich eine Vorsortierung der Fußgänger, so dass zunächst die Fußgänger mit höchster Wunschgeschwindigkeit und zum Schluss die Fußgänger mit der niedrigsten Wunschgeschwindigkeit durch das Messgebiet gehen. Für eine solche spezielle Verkehrssituation

ist die Simulation nicht abgestimmt und zeigt daher eine Schiefe in den Verteilungen der beeinflussten Geschwindigkeit. Die Schiefe erscheint für eine allgemeingültige Verkehrssituation plausibel. Da die Simulation nicht für spezielle Verkehrsszenarien geeicht werden soll, ist eine qualitative Bewertung der Parametersätze für das erste Szenario nicht sinnvoll.

Für das zweite Szenario stehen Messungen mit Verkehrsdichten von 0,12, 0,17 und 0,29 Personen/m². Das sind 34 und 59, 91 und 36 sowie 91 und 62 austretende Fußgänger an jeder Seite während der Messungen. Für solch niedrige Fußgängeranzahlen ist bei stochastischen Prozessen, wie das hier betrachtete Szenario, das Gesetz der großen Zahlen zu berücksichtigen. „Es besagt, dass bei zunehmender Anzahl von Beobachtungen einer Massenerscheinung das

Wirken der notwendigen (gesetzmäßigen) Faktoren immer deutlicher hervortritt. Wird eine einzelne Erscheinung beobachtet, dann wird sie mit allen ihren individuellen (zufälligen) Besonderheiten wahrgenommen, so dass diejenigen Gesetzmäßigkeiten nicht erkennbar werden, die erst bei der Beobachtung einer großen Anzahl zu derselben Massenerscheinung gehöriger Ereignisse zutage treten.“ (KÖRTH). Demnach ist weder eine qualitative noch eine qualitative Bewertung der Parametersätze mit diesen Messungen sinnvoll.

Für die weiteren Simulationen wird für die Normalverteilung der Wunschgeschwindigkeit eine Standardabweichung von $\sigma = 0.04 \text{ m/s}$ gewählt. Die Reichweite beträgt $R_i^j = 50 \text{ cm}$ und die Stärke $S_i^j = 5.0$.

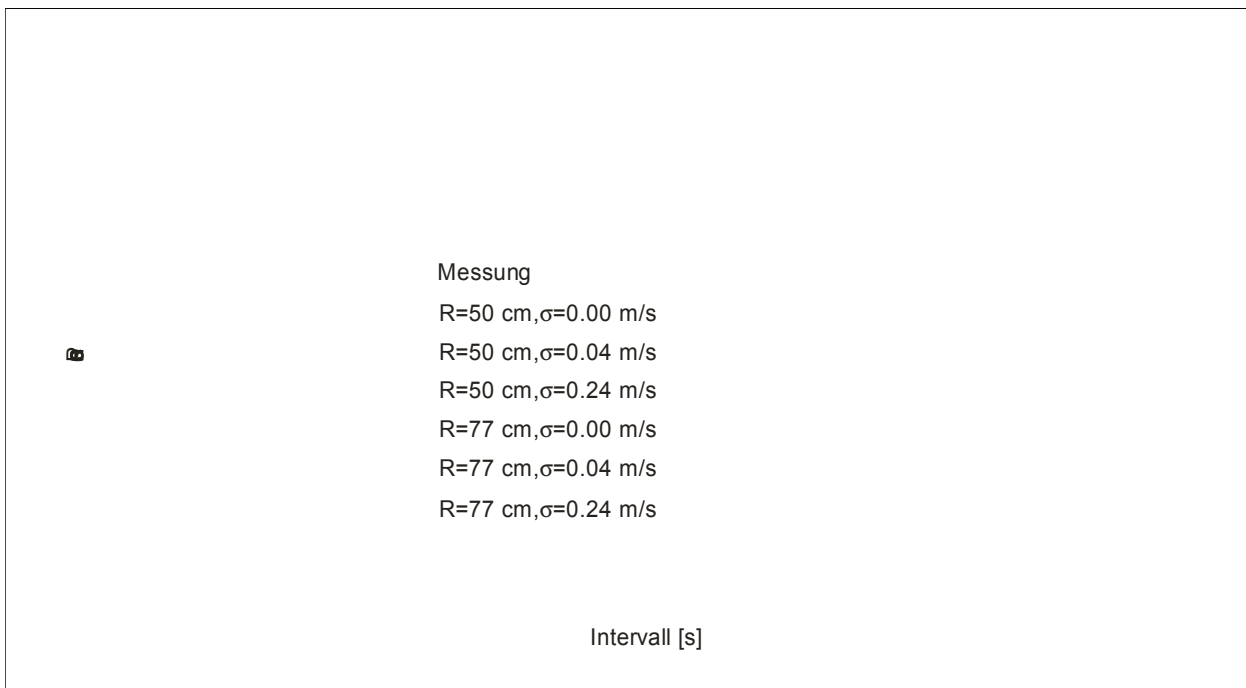


Abbildung .8: Parameterstudie für Messung 8.05: Zeitliche Verteilung der Austritte aus dem Untersuchungsgebiet bei $S_i = 5.0$



Abbildung .9: Parameterstudie für Messung 8.05: Verteilung der beeinflussten Geschwindigkeit bei $S_i = 5.0$

1.4.2 Prognose mit dem Simulationsmodell

Die Prognose der Verhaltenweisen von Fußgängern bei unterschiedlichen Verkehrsdichten mit unterschiedlichen Gegenverkehrsanteilen wird für ein 20 m langes und 4 m breites Untersuchungsgebiet durchgeführt.

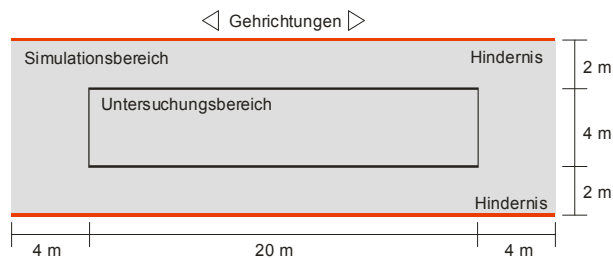


Abbildung .7: Geometrie der Prognosesimulation

Dieses Untersuchungsgebiet ist ein Teil des gesamten simulierten Gebiets. In Gehrichtung sind vor und hinter dem Untersuchungsgebiet jeweils 4 m Platz, um eventuelle Einflüsse aus den Randbedingungen zu vermeiden. Da die Modellierung an diesen Rändern zyklisch geschlossen wird, ist der Sicherheitsabstand von 4 m nicht notwendig. Quer zur Gehrichtung ist von jeder Seite 2 m Platz bis zu einem Hindernis. Die Hindernisse verhindern besonders bei hohen Dichten ein seitliches Verschwinden der Fußgänger. Die Reichweite der Hindernispotentiale beträgt $R_i^H = 20 \text{ cm}$ und ihre Stärke $S_i^H = 20$. Damit ist der Einfluss der Hindernisse in das Untersuchungsgebiet vernachlässigbar gering. Schaffen es Fußgänger bei hohen Dichten die Hindernispotentiale zu überwinden, werden sie direkt wieder ins Simulationsgebiet gesetzt.

Die Simulation beginnt mit einem einminütigen Vorlauf, in dem sich eine nahezu konstante Dichte im Untersuchungsgebiet einstellt und sich Muster, wie beispielsweise Fußgängerbänder ausprägen können. Die eigentliche Simulation, in der die Zustände jede Sekunde im Untersuchungsgebiet aufgezeichnet werden, dauert zwei Minuten.

Die Simulation wird für die Verkehrsdichten 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0 und 3.0 Pers/m² bei Gegenverkehrsanteilen von 0%, 10%, 20%, 30%, 40% und 50% durchgeführt. Um Aussagen über das stochastische Verhalten der Fußgängermodellierung treffen zu können, wird jede Simulation für eine Dichte mit einem Gegenverkehrsanteil fünfmal wiederholt.

Ergebnisse

Die Modellierung ist bezüglich mehrerer Parameter äußerst sensitiv. So lassen sich bereits durch kleine Parameteränderungen beliebige Muster im

simulierten Fußgängerverkehr erzeugen. Verkehrsgrößen, wie die Dichte oder die beeinflusste Geschwindigkeit lassen sich auf diese Weise nahezu beliebig manipulieren.

Um eine Willkürlichkeit bei der Wahl der sensitiven Parameter zu verringern, ist eine Verifikation der Modellierung durch eine möglichst gute Eichung durchzuführen. Die im Projekt durchgeführte Eichung wurde nur anhand einiger Stichproben bei relativ geringen Dichten durchgeführt. Eine Gewissheit über die Korrektheit der Modellierung aufgrund dieser Eichung gibt es nicht.

Auch für die hohen Dichten ist eine Verifikation der Modellierung dringend erforderlich. Im Projekt war jedoch kein Abgleich mit gemessenen Daten möglich, so dass dies Gegenstand weiterer Forschungen sein sollte.

Die Simulationsergebnisse sind nur mit Skepsis zu betrachten und können quantitativ nicht die Grundlage einer Bemessung sein.

2 Literatur

[KÖRTH] Körth, H.; Otto, C.; Runge, W.; Schoch, M. (1972): Lehrbuch der Mathematik für Wirtschaftswissenschaften. Seite 823-824 Westdeutscher Verlag, Opladen