



# Kapitel 1

## Einleitung

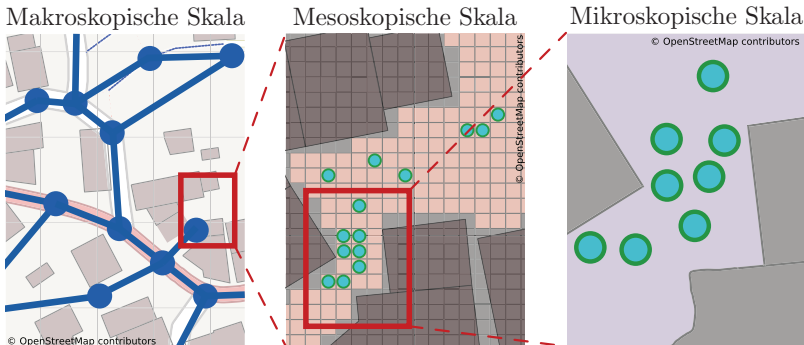
### 1.1 Motivation

Durch die zunehmende Eventisierung (Hitzler, 2011) und Kommerzialisierung (Köhler, 2001) des gesellschaftlichen Lebens, ergibt sich eine steigende Anzahl öffentlicher Großveranstaltungen (Abbott und Geddie, 2000; Betz et al., 2011). Diese Tendenz wird von öffentlicher, meist kommunaler Hand im Rahmen von Stadtmarketing (Schäfers, 2011) und Stadtentwicklung (Siebel, 2011) gefördert.

Bekannte Festivitäten erreichen sechs- bis sieben-stellige Besucherzahlen. Beispielsweise seien hier der Weltjugendtag mit fast einer Millionen Besucher (Klüpfel, 2007) oder die Pilgerströme nach Mekka während des Haddsch (Koshak und Fouda, 2008) genannt. In der Vergangenheit kam es im Verlauf solcher Großevents wiederholt zu Unglücksfällen mit tödlichem Ausgang. Tragische Beispiele sind die Katastrophe im Heysel-Stadium 1985 in Brüssel mit 39 Toten (Lewis, 1989) oder die Loveparade 2010 in Duisburg mit 21 Toten (Hitzler et al., 2011).

Es sterben jedes Jahr etwa zweitausend Personen im Zusammenhang mit großen Menschenmassen. Etwa die Hälfte dieser Toten ist auf Suffokation durch extrem hohe Personendichten zurückzuführen (Hughes, 2003). Ursachen für Vorfälle dieser Art liegen oftmals in einer unzureichenden Vorbereitung der Veranstaltung (z.B. Loveparade in Duisburg (Still, 2011)). Computergestützte Personenstromsimulationen können die Organisatoren bei der sachgerechten Planung unterstützen und damit das Risiko zukünftiger Unglücksfälle senken.

Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurden im Forschungsgebiet der Personendynamiken eine Vielzahl an Modellen zur Beschreibung des Verhaltens von Personenströmen entwickelt. Hierzu zählen makroskopische Netzwerkmodelle (siehe Abbildung 1.1), welche die Bewegung von Menschenmassen als kontinuierlichen Fluss – ähnlich Modellen der Kontinuumsmechanik (Sommerfeld et al., 1970) – auffassen (Colombo et al., 2010). Diese Modelle werden seit den 1950er Jahren für die Kalkulation von Verkehrsströmen einge-



**Abb. 1.1:** Drei räumliche Skalen in der Personenstromsimulation: makroskopische Netzwerkmodelle, mesoskopische zellulare Automaten und mikroskopische kontinuierliche Modelle.

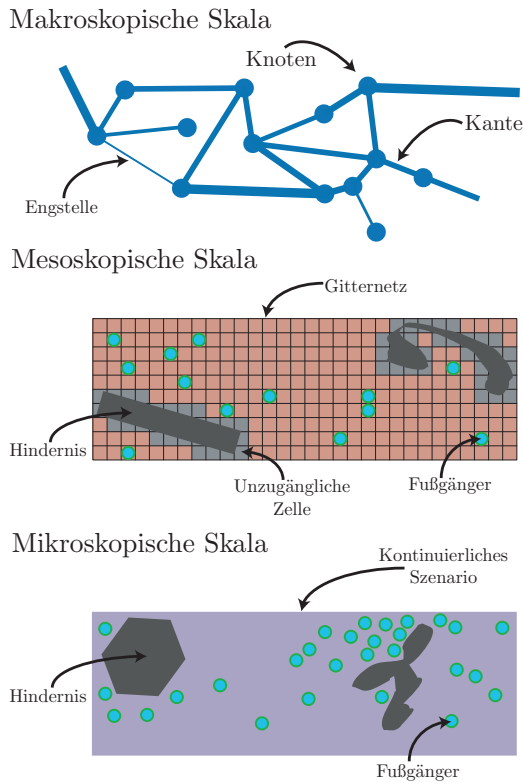
setzt (Lighthill und Whitham, 1955; Richards, 1956) und zeichnen sich durch ihre geringe Rechenzeit aus. Durch ihre makroskopische Natur weisen diese Modelle eine niedrige räumliche Auflösung auf.

Realitätsnähere Ergebnisse können durch die Nutzung mesoskopischer Modelle (siehe Abbildung 1.1) erreicht werden. Diese zellularen Automaten unterteilen das zu simulierende Szenario mittels eines Gitternetzes in einzelne Zellen. Menschenmengen werden als diskrete Agenten dargestellt, welche sich Zelle-für-Zelle fortbewegen (Blue und Adler, 2001). Die räumliche Auflösung ist durch das Gitternetzes auf die Größe einer einzelnen Zelle limitiert. Gegenüber makroskopischen Modellen weist diese Art der Modellierung jedoch eine geringere Recheneffizienz auf.

Bei mikroskopischen Modellen (siehe Abbildung 1.1) wird die Diskretisierung des Raumes aufgehoben und die Fußgänger als diskrete Agenten in einem kontinuierlichen Raum simuliert (Helbing et al., 2002). Das ermöglicht beliebig klein aufgelöste Schrittweiten der simulierten Agenten und verbessert somit die Möglichkeit einer realitätsgetreuen Abbildung. Im Gegenzug bewirkt eine Erweiterung der Detaillierungsgrade einen weiteren Anstieg des Rechenaufwandes der Simulation.

In der wissenschaftlichen Literatur im Bereich der Personenstromsimulation wird die Dreiteilung von Simulationstypen in mikroskopische, mesoskopische und makroskopische Modelle oft angewandt (Helbing, 1998; Tolujew und Alcalá, 2004). Zudem existieren Mischformen, so genannte Hybridmodelle. Diese versuchen die Stärken unterschiedlicher Einzelmodelle zu verbinden, indem diese miteinander gekoppelt werden (Nguyen et al., 2012; Bourrel und Henn, 2002).

In der vorliegenden Arbeit wird das Zusammenspiel von Personenstrommodellen auf unterschiedlichen Skalen hinsichtlich gegenseitiger Synergieeffekte untersucht. Die



**Abb. 1.2:** Aufbau eines makroskopischen, mesoskopischen und mikroskopischen Szenarios

vorgeschlagenen Lösungsmethoden sind besonders geeignet im thematischen Kontext der Planung und Durchführung öffentlicher Events. Derartige Veranstaltungen eignen sich durch ihre Größe und hohe Eigendynamik besonders für eine Simulation mittels hybrider Ansätze. Nichtsdestoweniger können die vorgestellten Lösungsansätze auch für die Simulation anderer Szenarien verwendet werden. Da die Nutzung von Personenstromsimulationen eine hohe Fachkenntnis voraussetzt, wird zudem eine heuristische Methodik zur Abschätzung von Personenströmen erörtert, die auch von fachfremden Anwendern genutzt werden kann.

## 1.2 Was ist eine Personenstromsimulation?

Der prinzipielle Aufbau von Personenstromsimulationen ist für alle räumlichen Skalen ähnlich, wird jedoch abhängig vom vorliegenden Simulationsmodell auf unterschiedliche Art und Weise umgesetzt. In Abbildung 1.2 ist für jede räumliche Skala der Aufbau eines Simulationsszenarios dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten einer Personenstromsimulation aufgeführt und im Kontext der räumlichen Skalen näher erläutert.

Ein Szenario wird auf der makroskopischen Skala mittels eines Netzwerkgraphen dargestellt. In diesem Netzwerk repräsentieren Kanten geradlinige Streckenabschnitte, auf denen sich Fußgänger bewegen können. An Knoten, welche Kreuzungspunkte repräsentieren, können von den Fußgängern Wegentscheidungen getroffen werden. Auf der mesoskopischen Skala wird ein Szenario mittels eines Gitternetzes aus regelmäßigen Polygonen dargestellt. In fast allen Fällen erfolgt die Diskretisierung des Szenarios mittels einer platonischen Parkettierung. Eine platonische oder reguläre Parkettierung bedeutet, dass das Szenario lückenlos mittel kongruenter, regelmäßiger Vielecke diskretisiert wird. In der natürlichen, euklidischen Ebene ist dies nur mit Zellen möglich, welche die geometrische Form von regelmäßigen Dreiecken, Quadraten oder Hexagonen inne haben (Wissemann-Hartmann, 2016). Das Szenario auf der mikroskopischen Skala wird mittels einer kontinuierlichen, euklidischen Ebene dargestellt.

Fußgänger auf der makroskopischen Skala werden durch akkumulierte Parameter, wie beispielsweise die lokale Personendichte, modelliert. Diese Personendichten bewegen sich auf den Kanten und Knoten des simulierten Szenarios. Auf der mesoskopischen Skala werden Fußgänger durch diskrete einzelne Agenten dargestellt, die sich auf dem Gitternetz zellenweise fortbewegen. Auch auf der mikroskopischen Skala werden Fußgänger durch diskrete Agenten repräsentiert. Jedoch findet auf dieser räumlichen Skala keine zellenweise Diskretisierung statt. Hierdurch können sich die Fußgänger kontinuierlich auf dem Szenario bewegen.

Hindernisse werden auf der makroskopischen Skala durch Engstellen bzw. geschlossene Kanten dargestellt. Dies bedeutet, dass die Kapazität einer Kante verkleinert (Engstelle) bzw. auf Null (geschlossene Kante) gesetzt wird. Auf diese Weise wird der Bewegungsraum von Fußgängern in einem Netzwerkgraphen eingeschränkt.

Unabhängig von der Art der Skala beinhaltet jedes Szenario einer Personenstromsimulation Quellen und Ziele. An einer Quelle werden Fußgänger erzeugt und bewegen sich anschließend durch das Szenario, um die ihnen vorgegebenen Zielorte zu erreichen. Handelt es sich bei einem Zielort um das finale Ziel eines Fußgängers, so wird dieser beim Erreichen dieses Zielortes aus der Simulation entfernt. Die Bewegung der Fußgänger durch das simulierte Szenario erfolgt auf allen Skalen mittels den von Hoogendoorn et al.



**Abb. 1.3:** Die einzelnen räumlichen Skalen sind zur besseren visuellen Identifizierung in unterschiedlichen Farben dargestellt. Diese Einteilung wird für die gesamte Arbeit verwendet.

(2002) postulierten Navigationsebenen (siehe Abschnitt 2).

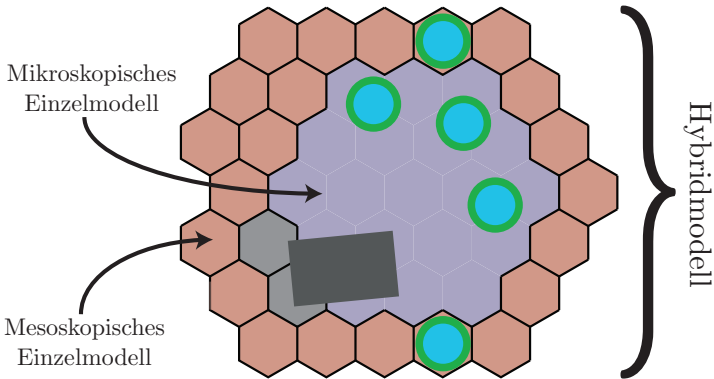
Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Betrachtung von Personenstrommodellen unterschiedlicher Skalen. Zur besseren visuellen Identifizierung der einzelnen Skalen wird daher für jede Skala ein eigener farblicher Code verwendet (siehe Abbildung 1.3). Netzwerke der makroskopischen Skala werden in einem dunklen Blau, das mesoskopische Gitternetz in einem matten Orange und die mikroskopische Ebene in einem blassen Violett abgebildet.

### 1.3 Problemstellung und Zielsetzung

Um großflächige Veranstaltungsgebiete mit mehreren Tausend Individuen realitätsnah abzubilden, ist prinzipiell eine feinskalige und detaillierte Simulation notwendig. Nur auf diese Weise können aussagekräftige Resultate erhalten und hierdurch das Gefahrenpotential korrekt abgeschätzt werden. Mikroskopische Modelle mit einer ausgeprägten kognitiven Modellierung würden diesen Anforderungen entsprechen. Derartige Personenstrommodelle sind jedoch zu rechenintensiv, um Szenarien mit Menschenmengen dieser Größenordnung simulieren zu können.

Das Gefährdungspotential und das Auftreten hoher Personendichten ist auf dem Gelände einer Veranstaltung in den seltensten Fällen gleichmäßig verteilt. Stattdessen existieren besonders sensitive und damit kritische Bereiche. Beispiele hierfür sind der Zugangsbereich zu dem Eventgelände oder Orte mit hoher Anziehungskraft auf die Besucher wie ein Freibierstand. Da die Gefährlichkeit der Gesamtsituation hauptsächlich von derartigen kritischen Bereichen sowie von Arealen mit hohen Dichten abhängt, genügt eine mögliche exakte Berechnung dieser Regionen, um wirklichkeitsnahe Ergebnisse zu erzielen (Nguyen et al., 2012; Chooramun et al., 2012).

Weniger kritische Bereiche können dagegen durch gröbere Modelle berechnet werden, ohne die Ergebnisse der gesamten Simulation merklich zu verschlechtern. Auf diese Weise kann die Berechnungsdauer der Simulation deutlich reduziert werden. Somit stellt die Nutzung von Hybridmodellen (siehe Abschnitt 2.3.1) einen wirkungsvollen Kompromiss zwischen den Zielkonflikten Rechengeschwindigkeit und Realitätsnähe der Simulation dar (Chooramun et al., 2011).



**Abb. 1.4:** Kontinuierliches (lila) und zelluläres (orange) Einzelmodell auf unterschiedlichen Teilbereichen des Szenarios. Durch die Verknüpfung der Einzelmodelle ergibt sich ein Hybridmodell.

Ein Hybridmodell besteht aus mehreren einzelnen Personenstrommodellen, die jeweils auf einem begrenzten Teilgebiet des Szenarios simulieren. In Abbildung 1.4 ist ein solches Szenario exemplarisch beschrieben. Verschiedene Fußgänger befinden sich in ihren mesoskopischen und mikroskopischen Einzelmodellen. Das Hybridmodell ergibt sich aus der Kombination der beiden Einzelmodelle zu einem gemeinsamen Simulationsszenario.

Naturgemäß ist die Fortbewegung der Fußgänger jedoch nicht auf bestimmte Gebiete des Simulationslayouts beschränkt. Einer dynamischen Fortbewegung entsprechend wird sich ein Fußgänger nicht nur innerhalb des Gebietes eines bestimmten Einzelmodells bewegen. Somit kann sich ein Agent aus dem Bereich des einen Simulationsmodell in den Bereich einer benachbarten Skala begeben.

Ist dies der Fall, so muss eine Transformation dieses Agenten von seinem derzeitigen Simulationsmodell in das neue Modell erfolgen. Dieser Übergang ist kein trivialer Vorgang, da verschiedene Einzelmodelle die Fortbewegung der Fußgänger auf unterschiedliche Weise und in unterschiedlicher räumlicher Auflösung simulieren (Xiong et al., 2010). Zudem muss bei der Verknüpfung von Modellen darauf geachtet werden, dass die Kohärenz zwischen den einzelnen Modellen erhalten bleibt (Nguyen et al., 2012). Beispielsweise darf sich die Gesamtanzahl an Personen innerhalb des Szenarios nicht verändern und das aktuelle Laufverhalten der Fußgänger darf durch den Übergang nur geringfügig angepasst werden.

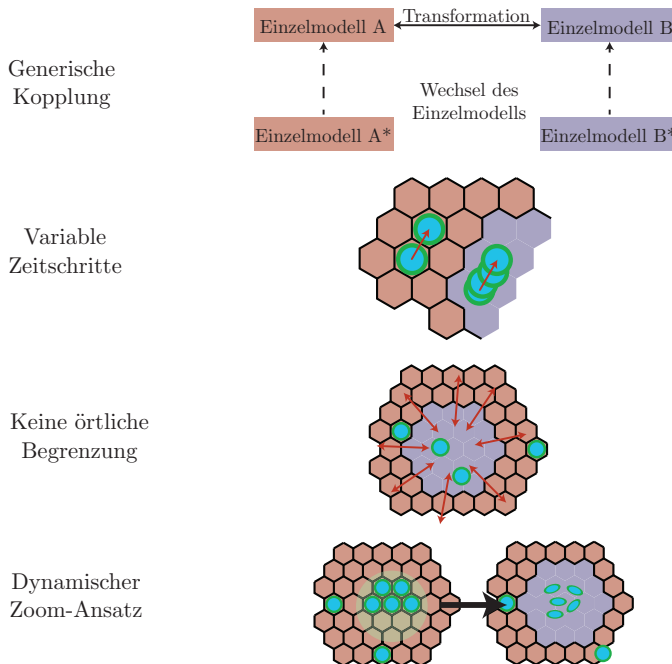
In der Literatur existieren bereits einige Ansätzen zur Lösung dieses Problems (siehe Abschnitt 2.3). Allerdings sind diese Lösungen des Übergangsproblems stark an die miteinander gekoppelten Einzelmodelle gebunden. Das bedeutet, dass die Transformation

zwischen verschiedenen Skalen in diesen Ansätzen spezifisch auf die verbunden Einzelmodelle zugeschnitten ist. Ein Austausch eines der verbundenen Einzelmodelle mit einem alternativen Simulationsmodell ist ohne umfassende Anpassung des Übergangs und der gekoppelten Modelle nicht möglich. Eine allgemein gehaltene Übergangsmodellierung würde dagegen den Austausch der gekoppelten Einzelmodelle ermöglichen, ohne dass größere Modifikationen vorgenommen werden müssen. Auf diese Weise können beliebige Einzelmodelle mit geringem Aufwand miteinander zu Hybridmodellen verbunden werden.

Eine weitere Schwachstelle aktueller Hybridmodelle ist die Verwendung gleich langer Zeitschritte für die Simulation der gekoppelten Einzelmodelle (Nguyen et al., 2012; Xiong et al., 2010). Grobskalige Personenstrommodelle können im Allgemeinen ohne relevanten Verlust an Genauigkeit mit lang andauernden Zeitschritten berechnet werden. Dagegen benötigen feinskalige Modelle, auf Grund ihrer detaillierteren Interaktionen mit der Umgebung, eine genauere Zeitauflösung. Hat die Dauer der Zeitschritte im Szenario modellübergreifend gleich zu sein, so folgt hieraus, dass das grobskaligere Modell die Zeitauflösung des feinskaligeren übernehmen muss. Dies führt zu unnötig vielen Simulationsschritten im grobskaligen Modell. Der Grund hierfür ist, dass die zeitliche Auflösung des feinskaligen Modells so hoch ist, dass im grobskaligen Modell die gleichen Resultate auch bei einer niedrigeren zeitlichen Auflösung erhalten werden. Durch Nutzung unterschiedlicher Zeitschritte bei den gekoppelten Einzelmodellen können diese überflüssigen Berechnungen vermieden werden.

Ein weiterer Schwachpunkt aktueller Hybridmodelle ist die örtliche Begrenzung der Transitbereiche zwischen den Modellen. Beispielsweise betrachten Nguyen et al. (2012) Skalenübergänge auf einem Straßennetzwerk. Der Transit zwischen unterschiedlichen Modellen findet hier an den Kreuzungen der Straßen statt. Für Szenarien mit räumlich eingeschränkten Laufwegen der Fußgänger ist eine Hybridmodellierungen mit örtlich begrenzten Übergangsbereichen (z.B. Kreuzungen von Straßen, Türen zwischen Räumen) ein möglicher Lösungsansatz. Probleme ergeben sich bei der Simulation frei flächiger Gebiete, da Fußgänger die gekoppelten Modelle aus beliebigen Richtungen verlassen bzw. in diese hineintreten können. Dieser Umstand macht die Entwicklung eines örtlich unabhängigen Übergangs notwendig.

Eine weitere Schwäche aktueller Hybridansätze ist die Ortsgebundenheit der Einzelmodelle. Das heißt, dass die Simulationsmodelle einzelnen Teilgebieten des Szenarios fest und unveränderlich zugewiesen werden. Da Gefahrensituationen für Fußgänger überwiegend in Arealen mit hohen Personendichten auftreten, sollten diese Gebiete von sehr feinskaligen Simulationsmodellen berechnet werden, um möglichst realitätsnahe Resultate zu erhalten. Treten während der Simulation hohe Dichten in den Teilgebieten der groben Skalen auf, so besteht keine Möglichkeit, das Personenstrommodell an diesen Stellen



**Abb. 1.5:** Übergangsmodellierung im *TransiTUM*-Ansatz: generische Anwendbarkeit, örtliche Unabhängigkeit der Transformation, variable Simulationszeitschritte und dynamischer Zoom-Ansatz



durch ein feinskaligeres Modell zu ersetzen. Mittels eines dynamischen Zoom-Ansatzes kann diese Problematik behoben werden.

Hierbei wählt der Nutzer zur Laufzeit der Simulation Teilbereiche aus, welche mittels eines feinskaligeren Personenstrommodells simuliert werden sollen. Der Zoom-Ansatz erkennt und identifiziert Bereiche hoher Personendichten im grobskaligen Modell. Dieses Areal wird ab diesem Zeitpunkt mittels eines detaillierteren Personenstrommodells berechnet. Durch diese Steuerung ist sichergestellt, dass Bereiche mit kritisch hohen Dichten mittels des feinskaligeren Einzelmodells des Hybridansatzes simuliert werden.

Damit ergeben sich vier wesentliche Neuerungen gegenüber aktuellen Hybridansätzen:

1. Der generische Hybridansatz ermöglicht die Kopplung beliebiger Personenstrommodelle, solange diese ein Set an allgemein gültigen Randbedingungen erfüllen.
2. Die Simulationszeitschritte der gekoppelten Modelle können eine unterschiedliche Dauer aufweisen.
3. Die Transformation zwischen einzelnen Personenstrommodellen kann ohne örtliche Begrenzungen vorgenommen werden.
4. Der automatische und dynamische Zoom-Ansatz ermöglicht das lokale Umschalten von Simulationsmodellen während des Simulationsverlaufes.

Abbildung 1.5 gibt einen grafischen Überblick dieser Anforderungen. Als Lösung dieser Fragestellungen wurde die *TransiTUM*-Methode entwickelt, um eine dynamische und generische Kopplung von Personenstrommodellen zu ermöglichen. Die beschriebenen Lösungsansätze wurden in das Simulationsframework *MomentUM* (Kielar et al., 2016a; Kielar, 2017) inkludiert, um die Durchführbarkeit der *TransiTUM*-Methode nachzuweisen.

Eine weitere Zielstellung ergibt sich aus der notwendigen Bereitstellung von Eingangsinformationen. Beispielsweise beschreiben Personenstromsimulationen das Laufverhalten von Fußgängern unter oftmals komplexen räumlichen Randbedingungen. Daher benötigt man Fachwissen über Personendynamiken sowie grundlegendes Informatik-Wissen, um derartige Simulationen korrekt auszuführen.

Dieses Hintergrundwissen ist gerade bei kleineren Veranstaltern sowie kommunalen Städteplanern nicht immer zwangsläufig vorhanden. Aus diesem Grund wurde zusätzlich zu den vorgestellten hybriden Ansätzen zur Personenstromsimulation die *Oppilatio*<sup>+</sup>-Methodik entwickelt, um auf einfache und zugängliche Weise Aussagen über die Laufwege von Fußgängern treffen zu können. In dieser Methode werden die gelaufenen Routen von Fußgängern, basierend auf einem leicht erhebbaren Set an Eingangsdaten, abgeschätzt. Wichtig ist hierbei, dass die betrachteten Fußgänger an diskreten Startorten und zu diskreten Zeitpunkten das Szenario betreten.

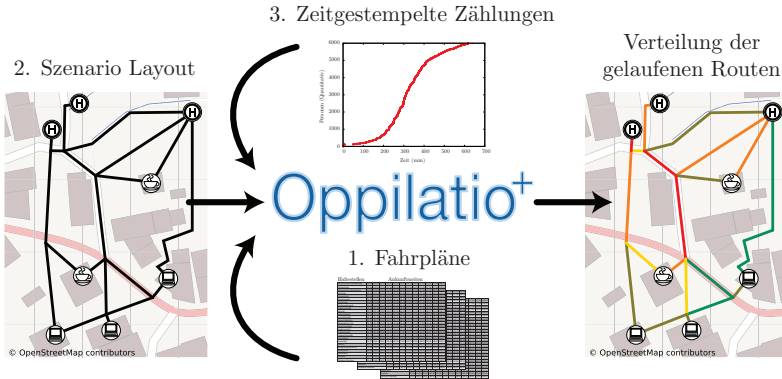


Abb. 1.6: Übersicht über die *Oppilatio+*-Methode

Diese Randbedingungen sind vornehmlich bei der Anreise mit öffentlichen Transportmitteln gegeben, bei denen die Startorte über Haltestellen und die Startzeitpunkte über die Fahrpläne festgelegt sind. Die benötigten Daten umfassen somit die Fahrpläne öffentlicher Verkehrsmittel, eine Beschreibung des Szenarios als Netzwerkgraph sowie eine zeitgestempelte Zählung an den Zielorten dieses Szenarios (siehe Abbildung 1.6). Der *Oppilatio+*-Ansatz ist ein hilfreiches Unterstützungswerkzeug, um bei begrenzter Datenlage Informationen über das Laufverhalten von Fußgängern zu gewinnen.

## 1.4 Begriffsdefinitionen

Im Kontext der Personenstromsimulation erfolgt oftmals eine unterschiedliche, stellenweise sogar widersprüchliche Verwendung bestimmter Begriffe und Nomenklaturen. Aus diesem Grund werden für diese Arbeit häufig verwendete Terminologien im Folgenden in alphabetischer Reihenfolge definiert:

- **Bi-seitig:** Der Übergang von Fußgängern zwischen zwei Einzelmodellen kann in beide Richtungen vorgenommen werden.
- **Einzelmodell:** Ein Personenstrommodell, das entweder makroskopisch, mesoskopisch oder mikroskopisch simuliert wird.
- **Fußgänger:** Sich mit einer Geschwindigkeit bewegendes Simulationsobjekt, das eine zu Fuß gehende Person repräsentiert. Die Repräsentation kann sowohl als kontinuierliche Dichte (makroskopische Simulation) sowie als diskreter Agent (mesoskopische und mikroskopische Simulation) erfolgen.