
Kurzfassung (Deutsch)

Fundamentaldiagramme beschreiben den funktionalen Zusammenhang zwischen den verkehrlichen Kenngrößen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlerer momentaner Geschwindigkeit und bilden diesen in Form einer Punktwolke grafisch ab.

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist es, die Machbarkeit der Erzeugung von Fundamentaldiagrammen zur Bewertung des Verkehrszustandes auf den kommunalen Straßen der Stadt Darmstadt zu untersuchen und die Einsatzmöglichkeiten aufzuzeigen.

Es wird innerhalb dieser Arbeit zwischen klassischen-, makroskopischen-, signalbereinigten- und urbanen Fundamentaldiagrammen unterschieden. Der Begriff klassisches Fundamentaldiagramm bezieht sich auf Punktwolken, die aus Kenngrößen eines Messquerschnitts erzeugt werden. Der Begriff makroskopisches Fundamentaldiagramm bezieht sich hingegen auf Punktwolken, die aus Kenngrößen mehrerer Messquerschnitte generiert werden. Fundamentaldiagramme, deren Messintervalle sich an den Signalzuständen der zugehörigen Signalgruppen orientieren, werden als signalbereinigte Fundamentaldiagramme bezeichnet. Urbane Fundamentaldiagramme werden als Überbegriff für alle Arten von Fundamentaldiagrammen genutzt, die auf Basis von Daten aus dem städtischen Raum erzeugt werden.

Obwohl das Fundamentaldiagramm im Kern ursprünglich als Verkehrsstärke-Verkehrsdichte-Beziehung definiert ist, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht der Versuch unternommen die Rohdaten der Verkehrsdetektoren bzw. den Belegungsgrad in die Verkehrsdichte umzurechnen. Der Grund dafür ist, dass die Umrechnung des gemessenen Belegungsgrades in die Verkehrsdichte zu unerwünschten Ungenauigkeiten führt. Daher wird die Untersuchung auf die Verkehrsstärke-Belegungsgrad-Beziehung, anstelle der Verkehrsstärke-Verkehrsdichte-Beziehung, beschränkt.

Gründend auf der beschriebenen Zielsetzung der vorliegenden Arbeit, lassen sich mehrere Problemstellungen identifizieren. So beschränken sich bisherige Forschungsarbeiten im Falle des klassischen Fundamentaldiagramms auf das überregionale- bis kontinentale Straßennetz. Ansätze urbaner Fundamentaldiagramme liegen nahezu ausschließlich in Form makroskopischer Fundamentaldiagramme vor.

Die Problematik, welcher urbane Fundamentaldiagramme unterliegen, gründen in einem hohen Maß auf der Streuung innerhalb der für das Fundamentaldiagramm typischen Punktwolke. Diese ist vor allem bei der Erzeugung von Fundamentaldiagrammen auf Basis von Daten einzelner Verkehrsdetektoren zu beobachten, sofern diese nicht sehr stark zeitlich aggregiert werden.

Zur Überwindung dieses Problems und zur Herstellung des aus der Literatur bekannten parabelförmigen Erscheinungsbildes des Fundamentaldiagramms hat sich im urbanen Raum das Prinzip des makroskopischen Fundamentaldiagramms etabliert. Bei dieser speziellen Form des Fundamentaldiagramms kommt es zu einer räumlichen und zeitlichen Aggregation der Rohdaten mehrerer Verkehrsdetektoren. Der Nachteil dieser Methode ist die mit zunehmender zeitlicher- und räumlicher Aggregation sinkende Aussagekraft für einzelne Bereiche des Areals, in welchem die Detektoren liegen und deren Daten aggregiert werden. Zumeist erstrecken sich die Untersuchungsräume in den vorliegenden Studien über

mehrere Quadratkilometer, sodass abgeleitete Aussagen zu Verkehrszuständen nicht ohne weiteres auf alle Teile des Untersuchungsraumes übertragbar sind.

In diese Lücke stößt die vorliegende Arbeit. Aufbauend auf der Hypothese, dass ein signifikanter Teil der Streuungen in den klassischen Fundamentaldiagrammen durch „künstliche Staus“ hervorgerufen werden, wird der Versuch unternommen, die Streuung zu reduzieren und sich an das zur Ableitung von Verkehrszuständen nutzbare parabelförmige Erscheinungsbild des Fundamentaldiagramms anzunähern. Die urbanen „künstlichen Staus“ resultieren aus den Rotzeiten der Lichtsignalanlagen.

Die Forschungslücke besteht dabei darin, die Rohdaten der Verkehrsdetektoren mit den Rohdaten der zugehörigen Lichtsignalanlagen zu kombinieren. Die Kombination beider Datenquellen bleibt in bisherigen Forschungsarbeiten weitestgehend ungenutzt, was auf einen Mangel an brauchbaren Datensätzen zurückzuführen ist. So wird analog zum klassischen Fundamentaldiagramm das Prinzip der signalbereinigten Fundamentaldiagramme bzw. signalbereinigten Messintervalle eingeführt.

Aufbauend auf die erörterte Forschungslücke wird ein Vergleich der Belegungsgrade während der Rot- und Grünzeiten einer Signalgruppe zur grundsätzlichen Plausibilisierung der Hypothese, dass Streuungen im urbanen Fundamentaldiagramm auf Rotzeiten der Lichtsignalanlagen zurückgeführt werden können, durchgeführt. Darüber hinaus werden die Belegungsgrade hinsichtlich der Charakteristika der Fahrstreifen und der Lage der Verkehrsdetektoren untersucht.

Anschließend werden die Erscheinungsformen der signalbereinigten Fundamentaldiagramme untersucht, um Regelmäßigkeiten im Erscheinungsbild dieser neuen Form der Fundamentaldiagramme zu identifizieren und diese wenn möglich zu typisieren bzw. in verschiedene Gruppen einzuteilen. Die Typisierung dient der Schaffung einer Grundlage, um die Fundamentaldiagramme miteinander vergleichen zu können.

Zudem werden Fundamentaldiagramme, die aus den Kenngrößen der umlaufbezogenen- und signalbereinigten Messintervallen erzeugt werden, miteinander verglichen. Das Ziel des Vergleiches der verschiedenen Formen von Fundamentaldiagrammen in Abhängigkeit von ihren Messintervallen dient der Offenlegung der Auswirkungen der Rotzeiten auf die Form und die Streuung der Punktwolken des Fundamentaldiagramms.

Darauf folgt die Untersuchung der Auswirkungen von zeitlicher Aggregation der verkehrlichen Kenngrößen der Verkehrsstärke und des Belegungsgrades mehrerer Umläufe bzw. mehrerer signalbereinigte Messintervalle auf die Form und die Streuung signalbereinigter Fundamentaldiagramme. Das Ziel ist die Erforschung der Verhaltensweisen der Erscheinungsform des signalbereinigten Fundamentaldiagramms hinsichtlich verschiedener Maßstäbe zeitlicher Aggregation von Rohdaten aus einzelnen Verkehrsdetektoren.

Abschließend erfolgt die Untersuchung statistischer Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen eines makroskopischen Fundamentaldiagramms und den Messwerten von Stickstoffdioxidemissionen und die Erarbeitung möglicher Einsatzmöglichkeiten urbaner Fundamentaldiagramme.

So konnte die grundlegende Erkenntnis gewonnen werden, dass die von den Detektoren gemessenen Belegungsgrade während den Rotzeiten der zugehörigen Signalgruppen im Durchschnitt höher sind als

während den Grünzeiten. Zudem wurde nachgewiesen, dass Verkehrsdetektoren auf Abbiegestreifen tendenziell höhere Belegungsgrade liefern als auf Geradeausfahrstreifen und dass Verkehrsdetektoren, die näher an den Haltelinien der zugehörigen Lichtsignalanlage liegen, tendenziell höhere Belegungsgrade aufweisen als Verkehrsdetektoren, die weiter entfernt liegen.

Bezug auf die signalbereinigten Fundamentaldiagramme nehmend, wurden vier verschiedene Typen an Erscheinungsformen der Punktwolken der signalbereinigten Fundamentaldiagramme identifiziert. Zudem konnten den einzelnen Typen von Erscheinungsformen bestimmte Charakteristika der Randbedingungen zugewiesen werden. Als maßgebliche Randbedingungen für die Formgebung der Punktwolken der signalbereinigten Fundamentaldiagramme wurden die Abstände zwischen Verkehrsdetektoren und Haltelinien und die Längen der Rot- und Grünzeiten der zugehörigen Signalgruppen identifiziert.

Darüber hinaus wurde der Nachweis erbracht, dass durch die Verwendung des im Zuge des signalbereinigten Fundamentaldiagramms eingeführten signalbereinigten Messintervalls bzw. der modifizierten Grünzeit eine Reduzierung der Streuung, die als großes Hemmnis bei der Erzeugung urbaner Fundamentaldiagramme identifiziert wurde, innerhalb der Punktwolken der signalbereinigten Fundamentaldiagramme erreicht wird. Im Zuge dessen konnte ebenso dargelegt werden, dass trotz der Reduzierung der Streuung in vielen Fällen kein parabelförmiges Erscheinungsbild der Punktwolke herbeiführbar ist.

Des Weiteren wurde die Methode der zeitlichen Aggregation über die Umläufe bzw. modifizierten Grünzeiten im Zuge der Arbeit eingeführt und untersucht. Es wurde gezeigt, dass eine zeitliche Aggregation tendenziell zum Absinken der Belegungsgrade führt und diese in Kombination mit steigenden Verkehrsstärken eine Verdichtung bzw. einen steileren Anstieg der Punktwolke vom Nullpunkt ausgehend bedingt, die sich mit der Zunahme der zeitlichen Aggregation verstärkt. Eine durch die zeitliche Aggregation herbeigeführte pauschale Annäherung der Punktwolke an die bekannte Parabelform konnte nicht nachgewiesen werden.

Darüber hinaus wurden in einem separaten Untersuchungsraum starke Korrelationen zwischen den Kenngrößen der Verkehrsstärke und des Belegungsgrades als auch der Verkehrsstärke und der Stickstoffdioxidemissionen nachgewiesen. Nicht nachweisbar war eine derart starke Korrelation zwischen den Werten des Belegungsgrades und den Emissionsmesswerten, sodass eine Kopplung von Umweltdaten an das Fundamentaldiagramm unter den bestehenden Randbedingungen nicht empfohlen werden kann.

Abschließend wurde eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten erarbeitet.

Abstract (English)

Fundamental diagrams describe the functional relationship between the traffic parameters traffic strength, traffic density and average instantaneous speed and graphically depict them in the form of a point cloud.

The aim of the present master thesis is to investigate the feasibility of generating fundamental diagrams to evaluate the traffic situation on the municipal roads of the city of Darmstadt and to show the possible applications.

Within this work, a distinction is made between classical, macroscopic, signal-adjusted and urban fundamental diagrams. The term classical fundamental diagram refers to point clouds generated from parameters of a measuring cross-section. The term macroscopic fundamental diagram, on the other hand, refers to point clouds generated from parameters of several measurement cross-sections. Fundamental diagrams whose measurement intervals are based on the signal states of the associated signal groups are referred to as signal-adjusted fundamental diagrams. Urban fundamental diagrams are used as an umbrella term for all types of fundamental diagrams that are generated on the basis of data from urban areas.

Although the fundamental diagram is originally defined as a traffic strength/traffic density relationship, this paper does not attempt to convert the raw data of the traffic detectors or the occupancy rate into traffic density. The reason for this is that the conversion of the measured occupancy rate into the traffic density leads to undesired inaccuracies. Therefore, the study will be limited to the traffic strength/occupancy rate relationship instead of the traffic strength/traffic density relationship.

Based on the described objective of the present study, several problems can be identified. In the case of the classical fundamental diagram, previous research work has been limited to the supra-regional to continental road network. Approaches to urban fundamental diagrams are available almost exclusively in the form of macroscopic fundamental diagrams.

The problems to which urban fundamental diagrams are subject are based to a large extent on the scatter within the point cloud typical for the fundamental diagram. This can be observed above all when generating fundamental diagrams on the basis of data from individual traffic detectors, as long as these are not very strongly aggregated over time.

To overcome this problem and to produce the parabolic appearance of the fundamental diagram known from literature, the principle of the macroscopic fundamental diagram has established itself in urban space. This special form of the fundamental diagram results in a spatial and temporal aggregation of the raw data of several traffic detectors. The disadvantage of this method is the decreasing power of information for individual areas of the area in which the detectors are located and whose data are aggregated with increasing temporal and spatial aggregation. In most cases the investigation areas in the present studies extend over several square kilometers, so that derived statements on traffic conditions are not easily transferable to all parts of the investigation area.

The present study fills this gap. Based on the hypothesis that a significant part of the scatter in the classical fundamental diagrams is caused by "artificial congestion", an attempt is made to reduce the

scatter and to approximate the parabolic appearance of the fundamental diagram that can be used to derive traffic conditions. The primal "artificial jams" result from the red times of the traffic lights.

The research gap lies in combining the raw data of the traffic detectors with the raw data of the associated traffic signal systems. The combination of both data sources remains largely unused in previous research work, which can be attributed to a lack of useful data sets. Analogous to the classical fundamental diagram, the principle of signal-equipped fundamental diagrams or signal-equipped measurement intervals is introduced.

Based on the discussed research gap, a comparison of the occupancy rates during the red and green times of a signal group is carried out for the basic plausibility check of the hypothesis that scatters in the urban fundamental diagram can be attributed to red times of the light signal systems. In addition, the occupancy rates are investigated with regard to the characteristics of the traffic lanes and the location of the traffic detectors.

The appearance of the signal adjusted fundamental diagrams will then be investigated in order to identify regularities in the appearance of this new form of fundamental diagrams and, if possible, to classify them or divide them into different groups. The typing serves to create a basis for comparing the fundamental diagrams with each other.

In addition, fundamental diagrams, which are generated from the parameters of the circulation-related and signal-cleaned measurement intervals, are compared with each other. The aim of comparing the different forms of fundamental diagrams as a function of their measurement intervals is to reveal the effects of red times on the form and dispersion of the point clouds of the fundamental diagram.

This is followed by the investigation of the effects of temporal aggregation of the traffic parameters of the traffic intensity and the occupancy rate of several rotations or several signal adjusted measurement intervals on the shape and the scatter of signal adjusted fundamental diagrams. The aim is to investigate the behavior of the appearance of the signal-adjusted fundamental diagram with regard to different scales of temporal aggregation of raw data from individual traffic detectors.

Finally, the statistical relationships between the parameters of a macroscopic fundamental diagram and the measured values of nitrogen dioxide emissions are investigated and possible applications of urban fundamental diagrams developed.

Thus, it was possible to gain the basic insight that the occupancy rates measured by the detectors during the red times of the associated signal groups are on average higher than during the green times. In addition, it was proven that traffic detectors on turning lanes tend to provide higher occupancy rates than on straight lanes and that traffic detectors closer to the stop lines of the associated traffic signal system tend to have higher occupancy rates than traffic detectors further away.

Referring to the signal adjusted fundamental diagrams, four different types of point cloud manifestations of the signal adjusted fundamental diagrams were identified. In addition, certain characteristics of the boundary conditions could be assigned to the individual types of manifestations. The distances between traffic detectors and stop lines and the lengths of the red and green times of the correspond-

ing signal groups were identified as decisive boundary conditions for the shaping of the point clouds of the signal-adjusted fundamental diagrams.

In addition, it was proven that by using the signal adjusted measurement interval introduced in the course of the signal adjusted fundamental diagram or the modified green time, a reduction of the scatter, which was identified as a major obstacle in the generation of urban foundation diagrams, was achieved within the point clouds of the signal adjusted fundamental diagrams. In the course of this it could also be shown that despite the reduction of the scatter in many cases no parabolic appearance of the point cloud can be achieved.

Furthermore, the method of temporal aggregation was introduced and investigated in the course of the work. It was shown that a temporal aggregation tends to lead to a decrease of the occupancy rates and that this in combination with increasing traffic volumes causes a compaction or a steeper rise of the point cloud from zero, which increases with the increase of the temporal aggregation. A general approximation of the point cloud to the known parabolic shape caused by the temporal aggregation could not be proven.

In addition, strong correlations between the parameters of traffic strength and occupancy as well as traffic strength and nitrogen dioxide emissions were demonstrated in a separate study room. A correlation between the values of the occupancy rate and the measured emission values was not demonstrable, so that a coupling of environmental data to the fundamental diagram could be excluded under the existing boundary conditions.

Finally, a large number of possible applications were developed.