

DISS. ETH NO. 22165

***SHAPE GRAMMARS FOR URBAN NETWORK DESIGN***

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

BASIL JANIS VITINS

Dipl. Umweltnaturwissenschaftler, ETH Zurich

born on 09.06.1980

citizen of  
Wettingen, AG

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Kay W. Axhausen, examiner  
Prof. Dr. David Levinson, co-examiner  
Prof. Dr. Martin Fellendorf, co-examiner

2014

# Abstract

A variety of network patterns strongly influences the designs of today's cities and agglomerations. The network patterns show considerable topological design variations, which become evident when comparing network patterns of different cities or even within the same city. Numerous urban transport network patterns have been developed in past eras and have been used for transportation purposes. However, changing travel demands, technologies, as well as strong regional and worldwide migration and urbanization make it ever so necessary to adapt and extend urban infrastructure in the future. Therefore, fundamental knowledge about urban and transport network design is necessary to increase general understanding of the effects of today's networks and to improve and adapt general design recommendations for the future development of cities and agglomerations.

Today, recommendations on urban design are available in guidebooks and norms. However, these design recommendations often rely on scarce fundamental research. There is little quantitative research on which to draw upon. Moreover, real world urban plans and patterns vary considerably in topology and size which hampers the definition of general recommendations based on these plans and patterns. Design algorithms are being applied increasingly in urban and transport planning. However, most obtained results are very application specific and can hardly be transformed into general design recommendations. Urban network design thus remains contentious, despite recent theoretical and applied research on this topic.

Shape grammars are increasingly applied in the complex field of transport and urban design and architecture, especially in an increasing number of urban simulations. Grammars are applied to procedurally design infrastructure, e.g. buildings or neighborhoods. Grammar rules govern the fundamental planning elements, e.g. interior walls or street segments. The elements are added to each other according to distinct grammar rules.

Shape grammars are promising tools for designing urban areas. They can be applied directly in urban design methods without cumbersome calculations, are applicable to different planning sites, and are suitable for solving interdisciplinary planning tasks. With shape grammars it might even be possible to overcome complexity in urban designs. And they can be transformed to urban design guidelines for future applications. This thesis explores the usage of

shape grammars in transport and urban design, and in planning applications. Shape grammars, and especially their effects in planning applications are yet poorly understood despite recent advances in network design and urban modeling. Therefore, a theoretical justification is made and three evaluation methods are suggested and applied within this thesis.

Available literature and existing theory on grammars are reviewed to consolidate and enhance theoretical knowledge, and to analyze the corresponding complexity of grammar based approaches in network design. Grammars are defined both as rules describing the design mechanisms, and as application specification describing the underlying assumptions and effects of the rules. In an example, the proposed theoretical concept is successfully applied on the design of a city boulevard.

Three methodologies are proposed in this thesis to define and evaluate grammars and their effects in network design. For shape grammar definitions and evaluations, it is assumed that road network models on featureless planes are specifically suitable compared to empirical real world network evaluations. In this way it is possible to ignore politically and historically driven network design and past construction decisions. And consequently, networks can be designed, modeled and understood in their fundamental principles. A network design algorithm is developed for the design of network topologies which also implements and extracts shape grammars. Modeling results demonstrate the influence of topology and intersection type choice in road networks. High network meshedness correlates with low user costs, also within the proposed reliability analysis. Experiments confirm the importance of turn delay consideration and intersection type choice. Generally, signals have low user costs and high reliability at increasing traffic flows. Moreover, by increasing the capacities at intersections and on roads the reduction of total user costs is higher compared to the alternative of increasing the overall road network length. Specifically, gridirons with medium block size ( $\sim 200\text{m}$ ) have high meshedness values and are reliable with signals, thus making them efficient in dense urban areas.

There is strong evidence that different transport modes require different network topologies due to their specific characteristics, especially speed, required capacity and average turn delay. It is also known that pedestrians, with very low speeds and turn delays, prefer denser networks with less capacity on their paths. This result is in contrast to the findings above for road networks; however, it is in line with empirical data from literature. In addition, qualitative comparisons with historical network developments support these findings. In conclusion, it is possible to evaluate shape grammars. Apart from rules, application specifications are required for improved and meaningful grammar applications.

## **Keywords**

Shape, grammar, rule, syntax, design, pattern, topology, IACGA, intersection, road, type, optimization, urban, transport, network, design, assessment, boulevard, meshedness.

## **Preferred citation style**

Vitins, B.J. (2014) Shape Grammars for Urban Network Design, *Dissertation*, IVT, ETH Zurich, Zurich.

# Zusammenfassung

Eine grosse Vielfalt existierender Verkehrsnetze zeichnen ihre markanten Muster in die heutigen Stadtpläne. Spezifische Eigenschaften wie Formen und absolute Grössen variieren stark zwischen den urbanen Netzen, sichtbar im Vergleich verschiedener Städte oder sogar in derselben Stadt. Die heute bestehenden Netze und Muster wurden in unterschiedlichen Epochen entworfen und umgesetzt, werden jedoch bis heute und auch in Zukunft als Verkehrsnetze genutzt. Sich ändernde Anforderungen an die Infrastruktur sowie regionale und weltweite Urbanisierungs- und Migrationsprozesse erfordern jedoch Anpassungen und Erweiterungen der bestehenden Infrastrukturen. Ein fundiertes Grundlagenwissen über Entwurfsgestaltung und Stadtentwicklungen ist deshalb essentiell für universelle Entwurfsempfehlungen und für zukünftige Entwicklungen von Verkehrsnetzen.

Es bestehen schon heute Empfehlungen für den Entwurf urbaner Räume in Form von Richtlinien und Handbüchern. Diese Richtlinien und Handbücher beinhalten Entwurfsvorschläge für Verkehrsnetze, basieren jedoch auf einer sehr geringen Anzahl quantitativer Forschung. Als Grundlage für Entwurfsvorschläge können auch bestehende Stadtpläne dienen. Die existierenden Stadtpläne und ihre Muster unterscheiden sich jedoch deutlich bezüglich ihrer Topologie und erschweren deshalb generelle Entwurfsempfehlungen für zukünftige Netzerweiterungen wie auch Verbesserungen oder der Ersatz existierender Netze. Zusätzlich sind historische Entscheidungen für Infrastrukturbauten oft politisch befangen, oder nur unvollständig evaluiert und sind deshalb bedingt geeignet für die Definition zukünftiger Empfehlungen. Zunehmend werden im Entwurf auch Optimierungsalgorithmen angewendet. Deren Resultate sind jedoch sehr ortsspezifisch; die meisten Algorithmen generieren deshalb kaum allgemeingültige Entwurfsempfehlungen. Die effiziente Gestaltung urbaner Verkehrsnetze bleibt kontrovers trotz der existierenden theoretischen und angewandten Forschung.

Entwurfsgrammatiken werden zunehmend als Werkzeuge in der Verkehrs- und Städteplanung angewendet, speziell in Simulationen urbaner Räume. Grammatiken werden in prozeduralen Methoden für den Entwurf von Infrastrukturen eingesetzt, zum Beispiel im Gebäude- oder Wohnquartierentwurf. Grundelemente wie zum Beispiel Innenwände oder Strassensegmente werden inkrementell aufgrund definierten Regeln aneinandergefügt.

Grammatiken können ohne grossen Aufwand im Entwurf und bei interdisziplinären Planungsaufgaben eingesetzt werden. Grammatiken könnten die Komplexität in der Planung urbaner Räume reduzieren. Zusätzlich können sie als Grundlage für zukünftige Empfehlungen in Planungshandbüchern und Normen dienen. Diese Doktorarbeit erforscht die grundlegende Theorie und den optimierten Einsatz von Entwurfsgrammatiken für die Planung von Verkehrsnetzen. Die Grammatiken und speziell die Auswirkungen in den Anwendungen sind kaum bekannt trotz den immensen Fortschritten im Bereich der Modellierung von urbanen Gebieten. Deshalb werden in dieser Doktorarbeit sowohl eine theoretische Grundlage wie auch drei Methoden für die Evaluation von Entwurfsgrammatiken vorgeschlagen.

Der theoretische Teil inklusive Literaturrecherche untersucht das vorhandene theoretische Wissen über Grammatiken und deren Funktionsweise. Schon vorhandene implizit oder explizit formulierte Grammatiken in der Verkehrs- und Raumplanung werden systematisch aufgelistet. Diese Arbeit definiert eine Grammatik als Kombination einer Syntax und einer dazugehörige Semantik. Die Syntax beinhaltet genau definierte Regeln für den inkrementellen Entwurf von Infrastrukturen. Die Semantik definiert die dazugehörigen Anwendungsspezifikationen, welche die Annahmen, Einschränkungen und Auswirkungen der Regeln beschreiben. Weiter wird die Komplexität im Bereich Verkehrsnetze untersucht und in Zusammenhang mit den Grammatiken gesetzt. Die Definition von Grammatiken sowie die Anwendungsspezifikationen werden beispielhaft und erfolgreich am Entwurf eines Boulevards aufgezeigt und überprüft.

Verkehrsmodelle ermöglichen Netzentwürfe und Auswertungen, welche besonders geeignet sind für die Definition und Evaluation von Grammatiken. Eine Grammatikdefinition aufgrund optimierten und evaluierten Modellentwürfen kann politische und historisch bedingte Planungsentscheidungen ignorieren, im Vergleich zu einer empirischen Ableitung von Grammatiken basierend auf existierenden Verkehrsnetzen. Deshalb werden systematisch verschiedene Verkehrsnetze entworfen, modelliert und anhand verschiedener Kriterien ausgewertet, mit einem Fokus auf Strassenverkehrsnetze. Für eine effiziente Bearbeitung wird ein Algorithmus vorgeschlagen, welcher sowohl den Entwurf und die Optimierung von Verkehrsnetzen wie auch die quantitative Evaluation und Extraktion von Grammatiken ermöglicht. Die Resultate zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen Netztopologie und Knotentypwahl auf. Eine hohe Maschendichte eines Verkehrsnetzes korreliert mit tiefen generalisierten Reisekosten insbesondere in den Auswertungen betreffend der Zuverlässigkeit. Weitere Resultate heben speziell die Bedeutung der Knotentypwahl im motorisierten Individualverkehr hervor. Lichtsignalanlagen haben bei hohem Verkehrsaufkommen relativ tiefe Abbiegewiderstände und sind zuverlässiger. Zusätzliche Kapazitäten an Knoten und Strecken verringern die Reisekosten stärker als eine Erhöhung der absoluten Streckenlänge des Verkehrsnetzes. Speziell Gitternetze haben eine hohe Maschendichte und sind deshalb zuverlässig in Kombination mit Lichtsignalanlagen und bei zunehmenden Verkehrsaufkommen. Gitternetze sind deshalb besonders geeignet in dicht überbauten urbanen Räumen, besonders wenn die Netze mit hohen Knoten- und Streckenkapä-

zitäten versehen sind, und mit mittlerer Maschengrösse (ca. 200m).

Verschiedene Verkehrsmittel erfordern verschiedene Netztopologien und Eigenschaften aufgrund der Ausprägungen der Verkehrsmittel, besonders Geschwindigkeit, Kapazität und Abbiegeverhalten. Fussgänger haben offensichtlich geringere Geschwindigkeiten und Abbiegeverzögerungen und bevorzugen deshalb dichte Verkehrsnetze mit eher geringen Streckenkapazitäten. Diese Planungsstrategie ist gegenläufig zur erwähnten optimierten Netztopologie des motorisierten Individualverkehrs. Die Resultate sind jedoch kongruent mit den empirischen Daten aus der Literatur sowie mit historischen Netzen. Zusammengefasst zeigt die Arbeit Möglichkeiten auf, Entwurfsgrammatiken zu definieren und zu evaluieren. Ebenfalls zentral ist die Definition von Anwendungsspezifikationen, welche gekoppelt sind mit den Grammatiken und welche eine effektive zukünftige Anwendung von Grammatiken in der Planung ermöglichen.

### **Bevorzugter Zitierstil**

Vitins, B.J. (2014) Shape Grammars for Urban Network Design, *Dissertation*, IVT, ETH Zürich, Zürich.