

DISS. ETH NO. 29435

Explorations on space, energy, and structure for a holistic design of buildings

A geometry-based graphical approach

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

FEDERICO BERTAGNA

Dottore Magistrale in Ingegneria Edile e delle Costruzioni Civili, Università di Pisa

born on 14.03.1992

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Joseph Schwartz

Prof. Dr. Thomas Auer

Prof. Dr. Pierluigi D'Acunto

Prof. Dr. Elli Mosayebi

2023

Abstract

The design of a building is a complex process that involves diverse disciplines and professionals. Architects and engineers must address a number of requirements to create functional, safe, and comfortable buildings without neglecting the implications their design choices have on costs and environmental footprint. Particularly in the conceptual design stage, a reconciliation of design aspects related to space, energy, and structure results in an enhanced understanding and control of this multidimensional design space. However, an actual integration of diverse disciplines as part of a holistic design framework requires the use of adequate approaches.

The objective of this thesis is to introduce a holistic design framework that reconciles spatial, energy-related, and structural design aspects to support designers in performing informed design explorations. The proposed framework is grounded in the use of geometry-based graphical methods, which combine the inherent advantages of geometry-based modelling with those related to graphical methods. In particular, geometry-based models guarantee the existence of a common ground for diverse disciplines to meet; graphical methods unfold form-performance relationships in a diagrammatic way, thus fostering an intuitive understanding of the design space.

The proposed framework incorporates aspects related to building energy performance through geometry-based graphical methods for solar control. The underlying assumption is that in the conceptual design stage, form-based passive design strategies – like solar control – have a crucial impact on building energy demand and user comfort. Similarly, considerations related to static equilibrium represent a key design aspect in the field of structural design, which can be conveniently controlled through graphic statics. The proposed design framework leverages on these geometry-based graphical methods, enhancing further their potential through digital implementations within a parametric environment. The framework was tested on several design examples and on a case study. In particular, the case study deals with the transformation of building envelopes of existing multi-storey buildings with the ambition to enhance their qualities and performance by addressing spatial, solar, and structural design aspects jointly in a holistic manner.

Zusammenfassung

Die Planung eines Gebäudes ist ein komplexer Prozess, an dem verschiedene Disziplinen und Fachleute beteiligt sind. Architekten/-innen und Ingenieure/-innen müssen eine Reihe von Anforderungen erfüllen, um funktionale, sichere und komfortable Gebäude zu schaffen, ohne dabei die Auswirkungen ihrer Entwurfsentscheidungen auf die Kosten und den ökologischen Fussabdruck zu vernachlässigen. Insbesondere in der Konzeptionsphase führt eine Abstimmung der verschiedenen Entwurfsaspekte in Bezug auf Raum, Energie und Struktur zu einem besseren Verständnis und zu einer besseren Kontrolle dieses mehrdimensionalen Entwurfsraums. Jedoch erfordert eine effektive Integration verschiedener Disziplinen als Teil eines ganzheitlichen Design Frameworks eine entsprechende Herangehensweise.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein ganzheitliches Design Framework vorzustellen, das räumliche, energetische und strukturelle Entwurfsaspekte in Einklang bringt und so Entwerfende bei der Erarbeitung der detaillierter Entwurfsstudien unterstützt. Das vorgeschlagene Framework basiert auf der Verwendung von geometriebasierten grafischen Methoden, die die inhärenten Vorteile der geometriebasierten Modellierung mit denen grafischer Methoden kombinieren. Insbesondere erlauben geometriebasierte Modelle die Schaffung einer gemeinsamen Basis für das Zusammentreffen verschiedener Disziplinen; grafische Methoden bilden Form-Leistungs-Beziehungen in einer diagrammatischen Weise ab und fördern so ein intuitives Verständnis der Entwurfsmöglichkeiten.

Das vorgeschlagene Design Framework umfasst Aspekte der Energieeffizienz von Gebäuden durch geometrisch basierte grafische Methoden für den Sonnenschutz. Die zugrundeliegende Annahme ist, dass in der Entwurfsphase formbezogene passive Entwurfsstrategien – wie der Sonnenschutz – einen entscheidenden Einfluss auf den Energiebedarf des Gebäudes und den Nutzungskomfort haben. In ähnlicher Weise stellen Überlegungen zum statischen Gleichgewicht einen wichtigen Entwurfsaspekt im Bereich des Tragwerksentwurfs dar, der durch grafische Statik einfach kontrolliert werden kann. Das vorgeschlagene Design Framework nutzt diese geometriebasierten, grafischen Methoden und erweitert ihr Potenzial durch digitale Implementierungen in einer parametrischen

Umgebung. Das Framework wurde anhand mehrerer Entwurfsbeispiele und einer Fallstudie getestet. Die Fallstudie befasst sich insbesondere mit der Transformation von Gebäudehüllen mehrgeschossiger Bestandsgebäude mit dem Ziel, deren Qualitäten und Leistungsfähigkeit durch eine ganzheitliche Betrachtung von räumlichen, solaren und strukturellen Entwurfsaspekten zu verbessern.

Die erarbeiteten Resultate zeigen, wie geometriebasierte grafische Methoden zu einer prägnanten und intuitiven Entwicklung des Entwurfs führen, ohne die Präzision der Ergebnisse zu beeinträchtigen. Im Gegenteil, die Verwendung solcher Methoden stellt einen entscheidenden Vorteil für die Entwerfenden dar, da sie ein tiefgreifendes Verständnis grundlegender Entwurfsprinzipien fördert und somit den Entwerfenden mehr Möglichkeiten gibt, den Entwurfsprozess ganzheitlich zu steuern.

Abstract

La progettazione di un edificio è un processo complesso che coinvolge varie discipline diverse fra loro. Architetti e ingegneri devono soddisfare una serie di requisiti per creare edifici funzionali, sicuri e confortevoli, senza tuttavia trascurare le implicazioni che le loro scelte progettuali hanno sui costi e sull'impatto ambientale. Soprattutto nella fase di progettazione concettuale, la riconciliazione degli aspetti progettuali legati allo spazio, all'energia e alla struttura consente una migliore comprensione e un miglior controllo di questo spazio progettuale multidimensionale. Tuttavia, un'effettiva integrazione di diverse discipline come parte di un quadro di progettazione olistico richiede l'uso di approcci adeguati.

L'obiettivo di questa tesi è quello di introdurre un framework per la progettazione olistica che riconcili gli aspetti spaziali, energetici e strutturali guidando così i progettisti verso esplorazioni progettuali informate. Il framework proposto si basa sull'uso di metodi grafici basati sulla geometria che combinano i vantaggi intrinseci della modellazione geometrica con quelli relativi ai metodi grafici. In particolare, i modelli geometrici garantiscono l'esistenza di un terreno comune per l'incontro di discipline diverse; i metodi grafici dispiegano le relazioni forma-prestazione in modo diagrammatico, favorendo così una comprensione intuitiva dello spazio progettuale.

Il quadro proposto incorpora gli aspetti legati alle prestazioni energetiche degli edifici attraverso metodi grafici basati sulla geometria per il controllo solare. L'ipotesi di fondo è che, nella fase di progettazione concettuale, le strategie di progettazione passiva basate sulla forma, come il controllo solare, abbiano un impatto cruciale sul fabbisogno energetico dell'edificio e sul comfort degli utenti. Allo stesso modo, le considerazioni relative all'equilibrio statico rappresentano un aspetto progettuale fondamentale nel campo della progettazione strutturale che può essere agevolmente controllato attraverso la statica grafica. Il framework di progettazione proposto sfrutta questi metodi grafici basati sulla geometria, migliorando ulteriormente il loro potenziale per mezzo di implementazioni digitali in ambiente parametrico. Il framework è stato testato su diversi esempi progettuali e su un caso studio. In particolare, il caso di studio riguarda la trasformazione degli involucri edilizi di edifici multipiano esistenti, con l'ambizione di migliorarne le

qualità e le prestazioni affrontando congiuntamente gli aspetti di progettazione spaziale, solare e strutturale.

I risultati ottenuti mostrano come i metodi grafici basati sulla geometria portino a una formulazione concisa e intuitiva dello spazio di progettazione, senza tuttavia compromettere la precisione dei risultati. Al contrario, l'uso di tali metodi rappresenta un vantaggio cruciale, in quanto favorisce una comprensione approfondita dei principi progettuali di base e dunque un controllo migliore sul processo di progettazione.