

# Sustainability Assessment and Development of Guidelines for Digital Fabrication in Construction

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Agustí-Juan, Isolda

**Publication date:**

2018-10

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000297793>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 25247

***SUSTAINABILITY ASSESSMENT AND DEVELOPMENT OF  
GUIDELINES FOR DIGITAL FABRICATION IN  
CONSTRUCTION***

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

presented by

*Isolda AGUSTÍ JUAN*

*Architect, Universidad Politécnica de Valencia  
M.Sc, Universitat Jaume I*

born on *27.02.1987*  
citizen of Spain

accepted on the recommendation of  
*Prof. Dr. Guillaume HABERT, examiner*  
*Prof. Dr. Jacqueline GLASS, co-examiner*  
*Prof. Dr. Mélanie DESPEISSE, co-examiner*

2018

# Abstract

In the era of technological innovation and digital revolution, inadequate working conditions and high resource consumption are still common practice in the construction sector, a sector that requires a deep transformation to keep up with other industries in terms of environmental impacts and productivity. As a potential solution, the adoption of Industry 4.0 technologies such as Additive Manufacturing (AM) in construction, promise to enhance the sustainability of the sector, resulting from improved productivity, efficiency, safety, collaboration, etc. In particular, the combination of computer-aided design and automated fabrication techniques for additive construction demonstrates the ability to produce complex architecture with optimized geometries and integrated multi-functionality. However, the contribution of digital fabrication processes to the improvement of sustainability in construction is not well covered by current research.

The aim of this doctoral thesis is to identify the sustainability risks and opportunities associated with the implementation of digital fabrication in construction. Given this objective, the research focuses on the assessment of building elements constructed with additive digital fabrication techniques to identify under which conditions digital fabrication provides a sustainability advantage or disadvantage over conventional construction. The main assessment method applied is the Life Cycle Assessment (LCA) framework to characterize environmental impacts. Furthermore, the CYCLONE (CYCLic Operations NETwork) simulation model is employed to evaluate the productivity (i.e. costs and time). The analyses indicate that the relative sustainability of the evaluated projects depends primarily on the manufacturing of building materials and the impact of digital fabrication processes is negligible. Moreover, the results demonstrate that digital fabrication becomes a feasible construction technique for non-standard building elements. Specifically, the study highlights the opportunities of structural optimization and multi-functionality in complex structural elements to reduce environmental and economic impacts.

The goal of the case study evaluations is to identify the design parameters that influence the sustainable performance of digitally fabricated architecture. Based on the identified parameters, sustainable criteria to guide the design of digitally fabricated building elements are formulated. These guidelines aim to provide designers the basic knowledge to implement the design strategies that are successful to improve the sustainability of digitally fabricated architecture. Finally, a LCA-based method is developed to consider sustainable criteria during the design of digitally fabricated architecture. Specifically, the simplified method is integrated in parametric design software to support decision-making from early design stages. The results provide the embodied impact of the digitally fabricated building element compared to a benchmark set by conventional construction. Based on the comparison, a color-based visualization allows non-LCA experts to efficiently optimize the design based on sustainable criteria.

Finally, future research paths regarding the socio-economic implications associated with the implementation of digital fabrication in the construction sector are discussed. As the level of digitalization in construction projects increases, the concern about the future of jobs will rise. While digital fabrication has the potential to improve productivity in the building industry, it will not necessarily reduce employment in the long run. It is expected that existing roles will evolve, mainly related to the human-robot interaction, and new roles requiring digital skills will be created. Moreover, the digitalization suggests an evolution of the conventional construction organization towards a platform-based integration of planning and construction phases.

# Zusammenfassung

Im Zeitalter von technologischer Innovation und digitaler Revolution sind unzureichende Arbeitsbedingungen und ein hoher Ressourcenverbrauch immer noch gängige Praxis im Bausektor; ein Sektor, der nach einer grundlegenden Transformation verlangt, um mit andere Industrien bezüglich Umweltverträglichkeit und Produktivität mithalten zu können. Ein möglicher Ansatz ist die Einführung von Technologien der Industrie 4.0, wie z.B. additive Fertigung, welche versprechen die Nachhaltigkeit des Sektors durch verbesserte Produktivität, Effizienz, Sicherheit und Zusammenarbeit zu steigern. Insbesondere die Kombination aus rechnerunterstütztem Design und automatisierten Fertigungstechniken für additive Konstruktion demonstriert die Möglichkeiten, komplexe architektonische Strukturen mit optimierten Geometrien und integrierte Funktionalität zu erzeugen. Allerdings ist der Beitrag von digitalen Fabrikationsprozessen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit in der Baubranche bisher nur unzureichend wissenschaftlich untersucht worden.

Das Ziel dieser Dissertation ist es, die Risiken und Möglichkeiten für die Nachhaltigkeit von digitaler Fabrikation im Bau zu identifizieren. Daher fokussiert sich die Forschungsarbeit auf die Beurteilung von additiv, digital gefertigten Bauelemente, um herauszufinden, unter welchen Bedingungen digitale Fabrikation Vor- oder auch Nachteile im Vergleich zu konventionellen Prozessen bietet. Die Hauptuntersuchungsmethodik, die zur Analyse der Umwelteinflüsse angewandt wird, ist die Lebenszyklusanalyse (LZA). Des Weiteren wird das CYCLONE (CYCLic Operations NEtwork) Simulationsmodell angewandt, um die Produktivität, d.h. Kosten und Zeit, zu evaluieren. Die Untersuchungen zeigen, dass die relative Nachhaltigkeit der untersuchten Projekten hauptsächlich von der Herstellung des Baumaterials abhängt, während der Einfluss der digitalen Fabrikationsprozessen zu vernachlässigen ist. Des Weiteren zeigen die Resultate, dass digitale Fabrikation zu einem möglichen Bauverfahren für Nichtstandardbauelemente wird. Insbesondere zeigt die Studie die Möglichkeiten von struktureller Optimierung und funktionaler Hybridisierung von komplexen Strukturelementen zur Reduzierung von Umwelt- und Wirtschaftseinflüssen auf.

Das Ziel der Fallstudienuntersuchungen ist es, die Auslegungsparameter zu identifizieren, welche die Nachhaltigkeit von digital gefertigter Architektur beeinflussen. Basierend auf den identifizierten Parametern werden Nachhaltigkeitskriterien formuliert, welche die Auslegung von digital gefertigten Bauelementen anleiten. Diese Richtlinien haben das Ziel, Designern Grundlagenwissen zur Verfügung zu stellen, um Auslegungsmethoden zu entwickeln, welche die Nachhaltigkeit von digital gefertigter Architektur zu verbessern. Schlussendlich wird eine LZA-basierte Methode entwickelt, welche es erlaubt, die Nachhaltigkeitskriterien während des Designprozesses von digital gefertigter Architektur zu berücksichtigen. Im Besonderen, ist die vereinfachte Methode in parametrischer Designsoftware integriert, um die Entscheidungsprozesse von frühen Auslegungsphasen an zu unterstützen. Die Ergebnisse zeigen den verkörperlichten Einfluss von digital gefertigten Bauelementen im Vergleich zu einer Referenzlösung mit konventioneller Bauweise. Basierend auf diesem Vergleich erlaubt eine farb-basierte Visualisierung Nicht-LZA-Experten das Design bezüglich Nachhaltigkeitskriterien zu optimieren.

Zuletzt werden zukünftige Forschungspfade zu den sozioökonomischen Implikationen, welche sich aus der Implementierung von digitaler Fabrikation im Bausektor ableiten, diskutiert. Mit steigender Digitalisierung von Bauprojekten nimmt die Besorgnis über die Zukunft von Arbeitsplätzen zu. Während digitale Fabrikation das Potential hat, die Produktivität der Bauindustrie zu steigern, führt dies langfristig nicht zwangsweise zu

einer niedrigeren Beschäftigung. Es ist zu erwarten, dass sich existierende Rollen entwickeln, vor allem in Bezug auf Roboter-Mensch-Interaktion, und neue Rollen mit digitale Anforderungen entstehen. Des Weiteren deutet die Digitalisierung darauf hin, dass sich die konventionelle Bauorganisation zu einer plattformbasierten Integration von Plan- und Bauphasen wandeln wird.