



Ing. Robert Haslmayr, BSc

# **Industriebau 4.0**

## **Nachhaltige Architektur für die vierte industrielle Revolution**

### **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Architektur

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. B.Sc.(Hons). CEng MCIBSE, Brian Cody

Institut für Gebäude und Energie

Fakultät für Architektur

Graz, Oktober 2018



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum

---

Unterschrift



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herrn Prof. Cody, der meine Masterarbeit betreut hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Arbeitgebern bedanken, die für mein nebenberufliches Studium stets Verständnis zeigten. Besonders bedanken möchte ich mich für das Vertrauen das in mich gesetzt wurde, durch das ich jene wertvollen Erfahrungen sammeln konnte, die maßgeblich zu der Erstellung der Masterarbeit beigetragen haben.

Bei meinen Eltern möchte ich mich bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für meine Anliegen hatten.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Freundin Cornelia für Ihre Geduld und Hilfsbereitschaft bedanken, sowie bei unseren beiden Kindern Sebastian und Jakob. Ihr habt mir den Rückhalt und zugleich den Ausgleich gegeben, den ich während meiner Studienzeit gebraucht habe.

Robert Haslmayr,

Kremsmünster, 20.05.2018

# Kurzfassung

Die Megatrends der Digitalisierung und der Energiewende prägen derzeit die gesellschaftliche Entwicklung und erscheinen omnipräsent. Die Möglichkeiten neuer Informations- und Kommunikationstechniken bewirken einen umfassenden Wandel aller Bereiche unserer Zeit und so kommt es zu einer immer weiter führenden Vernetzung der realen mit der virtuellen Welt.

Gleichzeit rücken politische Zielsetzungen in unseren Alltag, welche die Minimierung der unumgänglichen Folgen des Klimawandels zum Ziel haben. Wenn man bedenkt, dass Gebäude und Industrie gemeinsam für ca. 2 / 3 des gesamten Energieverbrauchs verantwortlich sind und die Arbeitswelt durch die vierte industrielle Revolution vor einem großen Wandel steht, wird einem klar das gerade bei Industriebauten Handlungsbedarf besteht, um sich für diese neuen Herausforderungen zu wappnen.

Auf Grund immer kürzer werdenden Innovationszyklen und einer stetig wachsenden Nachfrage an der Individualisierung von Produkten, muss der Industriebau 4.0 von Architekten von Grund auf in den Bereichen der Planung, der Konstruktion und der Ausführung neu konzipiert werden.

Ein im Zuge der Masterarbeit entwickelter Prozess, der es sich vor allem zum Ziel gesetzt hat, die Synergieeffekte einer integralen Planung zu nutzen, wird an einem konkreten Beispiel dargestellt. Hierfür wird ein Unternehmen am Produktionsstandort Oberösterreich gewählt, welches im Industriezweig Holzverarbeitung tätig ist und durch die Entwicklungen unserer Zeit, seinen Standort erweitern möchte.

Derzeit werden bauliche Körper der Produktion von jenen Baukörpern der Bürotätigkeiten, Administration, Forschung und Entwicklung getrennt. In Bauten, welche Know-How Vorsprünge, eine innovative Produktion und die Industrie 4.0 verkörpern sollen, müssen die getrennten Bereiche (Produktion und Büro), auch in Anbetracht dessen, dass auf den Menschen in der Industrie 4.0 neue Aufgaben zukommen, zusammengeführt werden. Der Mehrwert einer solchen Zusammenführung ist, dass hier das Gebäude selbst zu einer Form Maschine wird. Eine Maschine, welche auf die diversen Anforderungen nicht nur Rücksicht nimmt, sondern sich intelligent anpassen kann. Diese Anpassungsfähigkeit betrifft mehrere Ebenen wie zum Beispiel die Raumnutzung, Energieeffizienz, Material- und Personalströme. Ein sich selbst anpassender und wandelbarer Industriebau, wird nicht nur der immer höher werdenden Tendenz der Individualisierung der Produkte gerecht, sondern führt auch zu einer in hohem Maße energieeffizienten Produktion.

Das Gebäude der Industrie 4.0 interagiert mit der sich stetig ändernden Produktion und der sich darin bewegenden Menschen.

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	5
Kurzfassung .....	6
1.) Einleitung .....	10
1.1) Problemstellung und Relevanz des Themas .....	10
1.2) Zielsetzung der Arbeit .....	10
1.3) Aufbau der Masterthesis .....	11
2.) Industrie 4.0 im Themenfeld der Architektur .....	12
2.1) Industrielle Revolutionen und deren Auswirkungen auf das Planen & Bauen.....	12
2.2) Digitalisierung & Internet der Dinge.....	14
2.2.1) Industrie 4.0 und Lean Production .....	15
2.2.2) Architektur & Bauwirtschaft .....	17
2.3) Energieeffizienz als Notwendigkeit .....	19
2.3.1) Klimaziele .....	19
2.3.2) Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen.....	22
3.) Methodik - der Weg zum Industriebau 4.0 .....	23
3.1) Werkzeuge der Architekten in Zeiten der Digitalisierung .....	24
3.1.1) Building Information Modeling.....	25
3.1.1.1) Integrale Planung .....	27
3.1.1.2) Aufbau und Struktur des Gebäudedatenmodells .....	28
3.1.2) Algorithmic Modeling .....	31
3.1.2.1) Automatisierung.....	31
3.1.2.2) Simulationen.....	32
4.) Industriebau 4.0 .....	38
4.1) Lage – Industriestandort Oberösterreich .....	38
4.1.1) Klima .....	42
4.1.2) Wirtschaft.....	43
4.1.2.1) Forst- und Holzwirtschaft.....	44
4.1.3) Infrastruktur .....	45
4.2) Arbeitswelt 4.0.....	46
4.3) Produktion .....	47
4.3.1) Herstellungsprozess.....	48

4.3.2) Intralogistik.....	51
4.3.3) Maschinenliste .....	52
4.3.4) Materialfluss .....	53
4.4) Architektur & Raumorganisation.....	57
4.4.1) Raumprogramm .....	58
4.4.2) Entwurfparameter.....	59
4.5) Konstruktion .....	63
4.5.1) Konventionelle Bauweise.....	63
4.5.2) Graue Energie .....	67
4.5.3) Konstruktion des Industriebau 4.0.....	72
4.5.3.1) Das faltwerk.....	72
4.5.3.2) Tragwerk.....	73
4.5.3.3) Anwendungen des faltwerks in der Bautechnik.....	74
4.5.4) Materialität.....	77
4.5.4.1) Nachwachsender Baustoff - Holz .....	77
4.5.4.2) CO2-arter Beton: .....	79
4.5.4.3) Dämmung: .....	79
4.5.5) Herstellung.....	80
4.5.6) Gestaltung.....	83
4.5.7) Synergie .....	85
4.5.8) Referenzprojekte.....	85
4.6) Technische Gebäudeausrüstung.....	86
4.6.1) Mess- & Regeltechnik .....	87
4.6.2) HKLS.....	88
4.6.2.1) Heizen & Kühlen.....	89
4.6.2.2) Lüftung .....	91
4.6.3) Elektrotechnik.....	92
4.6.3.1) Sonnenenergie.....	94
4.6.3.2) Beleuchtungstechnik.....	95
4.6.3.3) Beleuchtungskonzept.....	96
5.) Gesamtdarstellung des Industriebau 4.0.....	97
5.1) Synergie Produktion – Energie – Konstruktion – Design .....	98
5.2) Wandelbare Fabrik.....	99

5.3) Energiebedarf.....	102
5.4) Vergleich zur Konventionellen Bauweise.....	103
5.5) Kosten & Bauzeit.....	106
5.6) Ausblick.....	107
5.6.1) Baustelle 4.0 .....	107
5.6.2) Echtzeitdaten .....	107
5.6.3) Augumented Reality .....	109
Abbildungsverzeichnis.....	110
Literaturverzeichnis .....	116

## 1.) Einleitung

### 1.1) Problemstellung und Relevanz des Themas

Die Architektur steht in einer Zeit des industriellen Wandels, dem Problem von einem stetig steigenden Energiebedarf und immer knapper werdenden Ressourcen gegenüber. Eine der größten Herausforderungen für produzierende Unternehmen ist es, sich mit einer ganzheitlich effizienten Wertschöpfungskette, von seiner Konkurrenz abzusetzen. Unternehmen können sich hierzulande, trotz hoher Personalkosten mit einem Vorsprung an Know-how, einer effizienten Fertigung und der Produktion nachhaltiger Produkte, einen Wettbewerbsvorteil gegenüber den Mitbewerbern aus Billiglohnländern verschaffen.

Die Architektur hat unter Anbetracht dessen, dass Gebäude in Deutschland etwa die Hälfte des gesamten Energieverbrauchs benötigen und für 40 % aller Treibhausgasemissionen verantwortlich sind,<sup>1</sup> großes Potential zur Effizienzsteigerung und Optimierung im Bau und im laufenden Betrieb der Objekte. Hier kann sich die Bauwirtschaft ein Beispiel an den produzierenden Unternehmen nehmen, welche mit ihren PLM (Product-Lifecycle-Management) Systemen, den gesamten Lebenszyklus des Produkts betrachten und vorab analysieren. Die Gebäude von produzierenden Unternehmen, können durch eine optimierte Formensprache der Architektur, welche zum Großteil von den äußeren Umwelteinflüssen abhängig ist und durch eine Vernetzung mit den inneren Energieflüssen, zu einer maßgebenden Steigerung der Energieeffizienz über den gesamten Lebenszyklus führen.

Dies bedeutet für Architekten auch Ihre eigene Arbeitsweise in Frage zu stellen und an den immer größer werdenden industriellen Kontext des Planen und Bauens anzupassen. BIM (Building Information Modeling) soll das Werkzeug der Digitalisierung dafür sein, um ein virtuelles Abbild der Realität zu erschaffen, dass Informationen aller Bauteile über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes enthält. Vom Planer erstellte Algorithmen, sollen diese Modelle von Projektbeginn an nicht nur mit Daten versorgen, sondern auch durch Simulationen und Analysen zu einer Optimierung beitragen.

### 1.2) Zielsetzung der Arbeit

In der Masterarbeit soll dargelegt werden, welche Anforderungen an einen Baukörper der vierten industriellen Revolution gestellt werden und unter welcher Methodik diese realisiert werden sollen. Megatrends wie die Digitalisierung oder die Energiewende prägen unsere Zeit und machen auch davor nicht halt unsere Gebäude neu zu denken. Eine interdisziplinäre, stark miteinander vernetzte Planung, soll die Grundlage eines jeden Industriebaus werden, der seine Synergien in allen Facetten des Gebäudes zeigt. So spiegeln sich die für den Standort spezifischen äußeren Umwelteinflüssen und die individuellen inneren Energieflüsse der Produktion in der Form und Organisation des Objekts wieder. Das Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit soll es sein, mit neu entwickelten Herangehensweise des architektonischen Entwurfs, einen Prototyp für einen zeitgemäßen Bau der vierten industriellen Revolution zu erstellen.

---

<sup>1</sup> Vgl. Lenz/Schreiber/Stark 2010, 6.

### 1.3) Aufbau der Masterthesis

Zunächst wird in der Arbeit dargelegt, welche Zusammenhänge die Architektur und die vierte industrielle Revolution haben. Darauf aufbauend wird über den Weg einer integralen Planung die Möglichkeiten einer Vernetzung von Gebäude, Produktion und Energie untersucht, um schließlich die erarbeitete Methodik, im Hauptteil der Arbeit, an einem praxisnahen Beispiel, anzuwenden.

## 2.) Industrie 4.0 im Themenfeld der Architektur

Die Entwicklung hin zur vierten industriellen Revolution, gepaart mit den Megatrends unserer Zeit, wie Digitalisierung und Klimawende, wird auch die Architektur der Industriebauten maßgebende beeinflussen. Der historische Rückblick auf die unterschiedlichen industriellen Revolutionen und deren Einflüsse und Einwirkungen auf die Architektur, soll als Ausgangspunkt für diese wissenschaftliche Arbeit dienen.

### 2.1) Industrielle Revolutionen und deren Auswirkungen auf das Planen & Bauen

Das 19. Jahrhundert stellte den Beginn eines Zeitalters von rasanten Entwicklungen und industriellen Revolutionen dar, welche große Auswirkungen auf alle Bereiche der Menschheit hatten. Im Zentrum dieser Entwicklungen standen vor allem die erhöhte Mobilität und eine umfassende gesellschaftliche Veränderung. Die Architektur begleitete diese Entwicklungen und die daraus resultierenden Objekte, welche die technischen Möglichkeiten einer jeden Revolution widerspiegeln.

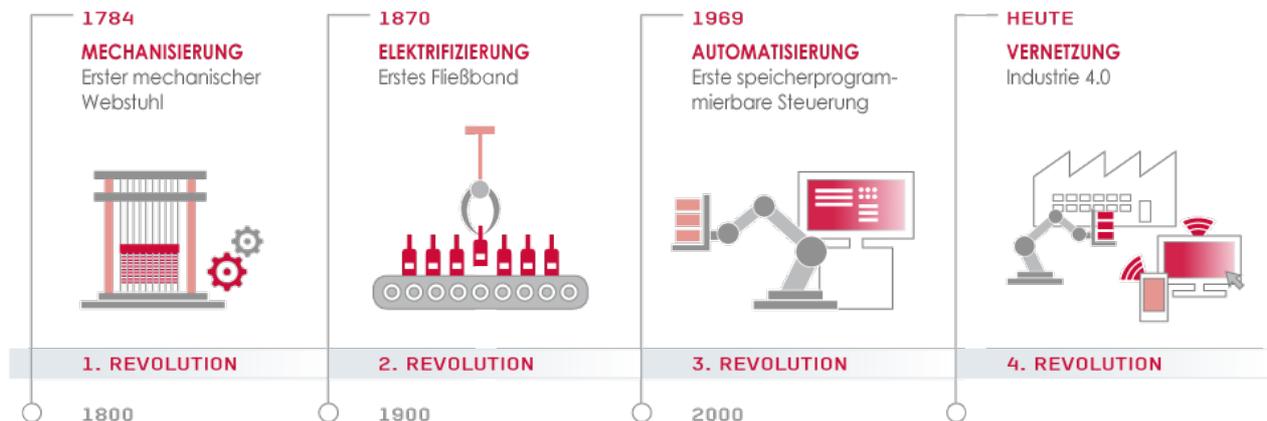


Abb.001

Zur ersten Industriellen Revolution kam es durch die Mechanisierung von Produktionsanlagen. Dies leitete die Industrialisierung von Großbritannien aus ein und wurde ursprünglich durch den Erfindergeist von James Watt und dessen ersten mechanischen Webstuhls (1784) möglich.<sup>2</sup> Durch Dampfmaschinen und die Nutzung der Wärmekraft konnten Fabriken unabhängig von Naturenergieformen betrieben werden.<sup>3</sup> Über diesen neuartigen Betrieb von Produktionsanlagen, wurde auch der bauliche Rahmen um die Maschinen herum verändert. Symbolträchtige Bauten für diese Zeit stellten auch Bahnhöfe dar, welche oftmals repräsentativ die neu gewonnene Mobilität verkörperten. In kürzester Zeit entstanden neue Bauten, welche durch die Materialität von Eisen und Glas auch einen neuen architektonischen Ausdruck mitbrachten.<sup>4</sup>

<sup>2</sup> Vgl. Kersten/Koller/Lödding 2014, 267f.

<sup>3</sup> Ebda, 130.

<sup>4</sup> Vgl. Tietz 2008, 6f.

Um das Jahr 1870, kam es durch den Einsatz von Fließbändern in Fabriken, zur zweiten Industriellen Revolution, was durch die Elektrifizierung und den von Thomas Edison entwickelten Dynamo als Stromgenerator möglich wurde. Die Verortung der Anlagen innerhalb der Fabrik wurde flexibler und die Produktion als gesamt wesentlich effektiver.<sup>5</sup> Die Industrialisierung führte auch zu einem gesellschaftlichen Wandel und dies veränderte wiederum das Bild unserer Städte. Die Architektur wurde mit gänzlich neuen Bauaufgaben konfrontiert und musste auf die stetig steigende Urbanisierung und der Bildung von Großstädten reagieren. Neben Eisen und Glas fand auch das Baumaterial Beton einen Aufschwung in dieser Zeit und unterstützte die Architekten dabei, dieser neuen und sich rasant entwickelnden Epoche einen neuen ästhetischen Ausdruck zu verleihen.<sup>6</sup>

Im Jahr 1969 führte der Modicon 084, eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) von Maschinen und Anlagen, zur dritten Industriellen Revolution.<sup>7</sup> Dieser Schritt symbolisiert die stetige Weiterentwicklung und Leistungssteigerung der Elektronik und der Informationstechnologie und ermöglichte die Koordination von weltweit vernetzten Produktionsnetzwerken.<sup>8</sup> Architekten nutzten ebenfalls die Fortschritte der Elektronik und planten ab sofort mittels CAD (computer aided design). Dieses rechnerunterstützte Konstruieren führte dazu, dass immer komplexere Aufgabenstellungen und Formen bearbeitet werden konnten.

Die ersten drei Industriellen Revolutionen unterscheiden sich insofern von der Industrie 4.0, indem diese ihren Begriff beziehungsweise ihre Definition erst im Nachhinein erhielten. Die vierte Industrielle Revolution wurde ausgerufen und ist ein Begriff der von der Forschungsunion der deutschen Bundesregierung ausgeht. Die Forschung beschäftigt sich in hohem Maße mit diesem Thema und soll dadurch zur Wahrung des führenden Produktionsstandortes Deutschland beitragen.<sup>9</sup> Industrie 4.0 stellt erneut einen Sprung in der Weiterentwicklung der Elektronik und Informationstechnologie, durch die Vernetzung unterschiedlicher und intelligent miteinander kommunizierender Systeme und dem Menschen, dar. Smart Factory, cyber-physische Systeme (CPS), das Internet der Dinge und Big Data sind die wesentlichen Schlagworte zu dieser industriellen Revolution.<sup>10</sup> Wie auch die vorhergehenden Epochen, bringt auch diese Revolution neue Anforderungen an die Architektur mit. Energie- und Ressourceneffizienz stellen aufgrund klimapolitischer Ziele, einem stetig steigenden Energiebedarf und knapper werdender Ressourcen einen wesentlichen Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen dar.<sup>11</sup> Neben dem Fortschritt der Informationstechnologien der Industrie 4.0, kann diesen Punkten auch durch den Einsatz modernster Planungstechnologien des Architekten entgegengewirkt werden und ein intelligent vernetztes System von Gebäude, Energie und Produktion erstellt werden.

---

<sup>5</sup> Vgl. Kersten/Koller/Lödding 2014, 130.

<sup>6</sup> Vgl. Tietz 2008, 8f.

<sup>7</sup> Vgl. Kersten/Koller/Lödding 2014, 267f.

<sup>8</sup> Ebda, 130.

<sup>9</sup> Ebda, 79.

<sup>10</sup> Ebda, 79.

<sup>11</sup> Ebda, 53.

Gebäude benötigen in Deutschland etwa die Hälfte des gesamten Energieverbrauchs und sind für 40 % aller Treibhausgasemissionen verantwortlich.<sup>12</sup> Neben dem Verkehr spielt noch der Industriesektor einen wesentlichen Faktor im Gesamtenergieverbrauch Deutschlands. Anhand dieser Statistik erkennt man die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Optimierung von Produktionsstätten.

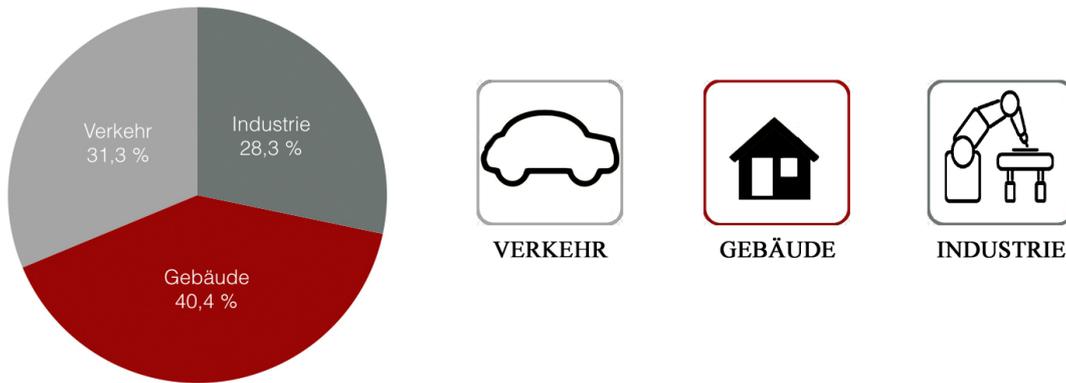


Abb.002

## 2.2) Digitalisierung & Internet der Dinge

Die Möglichkeiten neuer Informations- und Kommunikationstechniken bewirken einen umfassenden Wandel aller Bereiche unserer Zeit. Es kommt zu einer immer weiter führenden Vernetzung der realen mit der virtuellen Welt und der Einführung cyber-physischer Systeme (CPS), welche sich stetig intelligent weiterentwickeln. CPS basieren auf dem Konzept des Internet der Dinge (vernetzte Gegenstände kommunizieren selbstständig über das Internet<sup>13</sup>) und bezeichnet die Kopplung von physischen, biologischen und bautechnischen Komponenten, die über eine Recheneinheit integriert, überwacht und gesteuert werden.<sup>14</sup> Durch die smarte Vernetzungen unterschiedlichster Bereiche werden Daten miteinander über das Internet der Dinge ausgetauscht und können so dazu führen, dass Nutzerverhalten und Produkte in eine nachhaltige Richtung gesteuert werden.<sup>15</sup>

<sup>12</sup> Vgl. Lenz/Schreiber/Stark 2010, 6.

<sup>13</sup> Vgl. Lackes, Internet der Dinge, 12.07.2017.

<sup>14</sup> Vgl. Janiesch, Cyber-physische Systeme, 10.07.2017.

<sup>15</sup> Vgl. Kersten/Koller/Lödding 2014, 273.

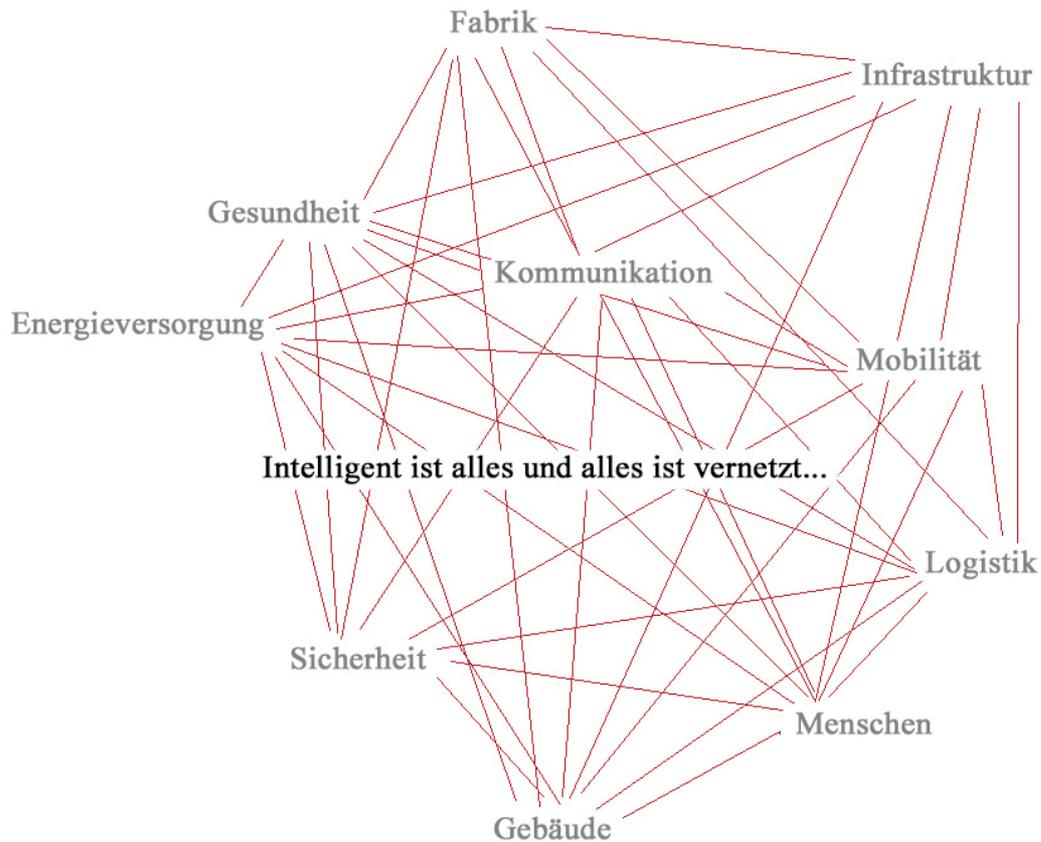


Abb.003

### 2.2.1) Industrie 4.0 und Lean Production

Unternehmen beschäftigen sich seit je her mit der Steigerung Ihrer Effizienz hinsichtlich deren industriellen Produktion und so hat sich in der Vergangenheit der Ansatz der Lean Production durchgesetzt, welcher besagt: „Das in Unternehmen mit einer effizienten Organisation Wert geschaffen werden soll, ohne dabei Verschwendung zu erzeugen.“<sup>16</sup> Hierbei geht es um die Verschlinkung von Prozessen in der eigentlichen Produktion, aber auch um die Vermeidung von nicht wertschöpfenden Tätigkeiten im Informationsfluss.<sup>17</sup>

Auf Grund einer Veränderung des Markts, in der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg, hin zu mehr Individualität von Produkten, mussten die Hersteller reagieren. Japan hatte das zusätzliche Problem knapper Ressourcen und sinkender Nachfrage in der Automobilproduktion. Toyota erkannte dieses Problem und entwickelte mit einer bedarfsgesteuerten Produktion die sogenannte Lean Production. Obwohl Taiichi Ohno, welcher im Namen Toyotas die Produktion von Ford besuchte, auf dieses Problem in Amerika aufmerksam wurde, konnten die Europäer und Amerikaner den Erfolg und das dahinter stehende System des japanischen Automobilherstellers über Jahrzehnte hinweg nicht erkennen. Dieser Vorsprung an Know-how, machte sich an übermäßig hohen Ge-

<sup>16</sup> Schuh 2013, 1.

<sup>17</sup> Vgl. Roy/Mittag/Baumeister: Industrie 4.0 - Einfluss der Digitalisierung auf die fünf Lean-Prinzipien - Schlank vs. Intelligently, 10.07.2017.

winnzahlen und der im Jahr 2007 erstmals meist verkauften Autos in Amerika bemerkbar. <sup>18</sup> Das Produktionskonzept hat sich auf Grund des großen Erfolgs, nun auch in westlichen Ländern branchenübergreifend durchgesetzt.

*„Es kommt nicht darauf an, die Zukunft vorauszusagen, sondern darauf, auf die Zukunft vorbereitet zu sein.“ <sup>19</sup>*

*Perikles, athenischer Politiker und Feldherr (um 500 - 429 v.Chr.)*

Lean Production sieht sich nun durch immer höhere Anforderungen an Individualität und Kundenwünschen mit neuen Herausforderungen konfrontiert. Des Weiteren befinden sich die produzierenden Unternehmen, durch die immer weiter voranschreitende Digitalisierung, in einem Wandel. Die Chance dieser Zeit hin zur Industrie 4.0, müssen vor allem Hochlohnstandorte westlicher Länder, wie zum Beispiel Deutschland, über den Aufbau von einem Know-how Vorsprung für sich zu Nutzen machen.

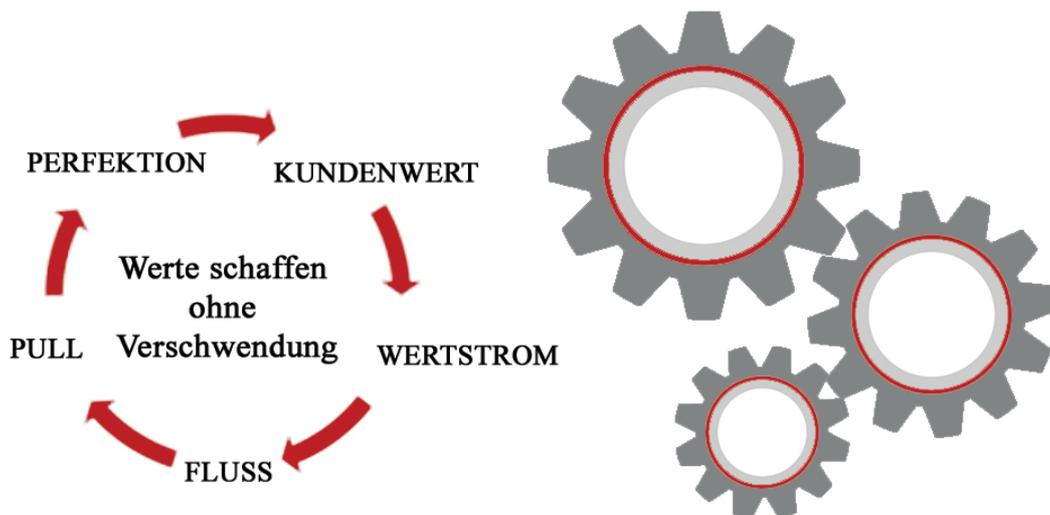


Abb.004

Die klassische Produktion wird durch cyber-physische Systeme und der Vernetzung bzw. der Implementierung des Internet der Dinge abgelöst. Diese Veränderungen haben auf die gesamte Wertschöpfungskette der Industrie weitreichende Konsequenzen, was dazu führen wird, die derzeit bekannte Lean Production zu hinterfragen. Kundenorientierung wird auch in der digitalisierten Produktion der Industrie 4.0 eine wesentliche, beziehungsweise stärker zunehmende Rolle einnehmen. Cyber-physische Systeme werden den Wertstrom verändern, welcher vernetzt zwischen der realen und virtuellen Welt verlaufen wird. Die Vernetzung des Kunden und mit der

<sup>18</sup> Schuh 2013, 2.

<sup>19</sup> Strategische Zukunftsforschung, 05.08.2017.

Produktion wird zunehmen und eine sogenannte ad-hoc Planung zur Realität werden.<sup>20</sup> Der Auftrag des Kunden wird digital erfasst und direkt an die Produktion übermittelt, welche über eine automatisierte Fertigung das Produkt nach den individuellen Bedürfnissen des Kunden wirtschaftlich herstellen wird. Über die Ansammlungen an Daten und einer damit einhergehenden Informationsdichte, sollen intelligente Maschinen und selbstlernende Systeme, die Fertigung stetig optimieren und so über einen Vorsprung an Know-how zur Sicherung des Produktionsstandorts und einer Führungsrolle des Wettbewerbs beitragen.

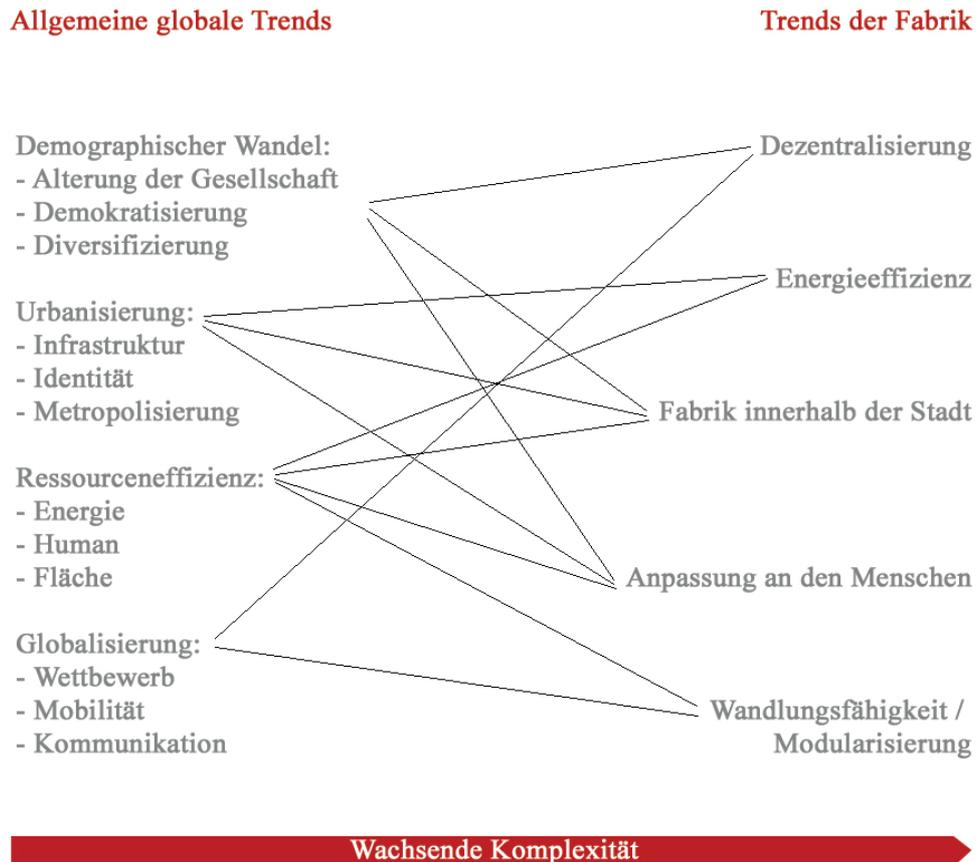


Abb.005

### 2.2.2) Architektur & Bauwirtschaft

Die Bauwirtschaft bildet das Schlusslicht aller Branchen was den Grad der Digitalisierung betrifft. Dies wurde anhand des Internetzugangs, der IT-Ausstattung, der strategischen Ausrichtung und der Digitalisierung interner Prozesse ermittelt und veranschaulicht das hohe Potential zur Optimierung im Bereich des Baugewerbes. Architekten sehen sich beinahe täglich mit Informationen zu digitalen Prozessen in der Planung und Ausführung konfrontiert, jedoch wissen nur die Wenigsten damit etwas anzufangen. Das Problem ist, dass die Digitalisierung in vollem Gange ist und daher die Notwendigkeit besteht, dass die Arbeitswelt der Architekten eine Umstellung er-

<sup>20</sup> Vgl. Roy/Mittag/Baumeister: Industrie 4.0 - Einfluss der Digitalisierung auf die fünf Lean-Prinzipien - Schlank vs. Intelligent, 10.07.2017.

fordert.<sup>21</sup> Eine solche Veränderung fand bereits in den 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts statt, bei der von Bleistift, Tusche und Reißschiene auf CAD (computer aided design) umgestellt wurde. CAD fand bereits in den 1950er und 1960er Jahren Verwendung, jedoch wurde es in der Baubranche erst durch die Einführung von AutoCAD für das Disk Operating System (DOS) interessant. Man kann auch hier die verspätete Verwendung, eines im Maschinen- und Fahrzeugbau bereits gängigen System, erkennen.

Die derzeitige Herausforderung ist es mit BIM (Building Information Modeling), die vermehrt interdisziplinäre Planung zu optimieren. Das größte Problem ist es, dass für die Verwendung von Daten der Wertschöpfungskette des Lebenszyklus von Gebäuden, wenig bis gar keine Standards definiert sind.<sup>22</sup> Ein Gebäudedatenmodell würde eine Gewerke übergreifende Grundlage dafür bilden, dass Informationen zur Planung, Ausführung und dem Betrieb zusammengeführt werden. Solche Modelle haben den Vorteil, dass die gesammelten Informationen zentral zugänglich und zukunftsfähig verwertbar sind.<sup>23</sup> Annette von Hagel, aus der Direktion Facility Management Bundesanstalt für Immobilienaufgaben in Berlin, erläutert in weiterer Folge die derzeitige Problematik und wirft Fragen zu diesem Thema auf:

„Das Facility Management wird von Architekten meines Erachtens ungenügend beachtet. Der Bruch im Informationsfluss zwischen Realisierung und Betrieb ist erschreckend. Im seit jeher modellbasierten Maschinenbau ist es undenkbar, dass etwas geplant und konstruiert wird und mit der Übergabe die Verantwortung abgegeben ist. [...] Die Verantwortung endet für mich nicht mit der Fertigstellung des Gebäudes, sondern begleitet die Übergabe des Betriebs inklusive eines Monitorings über den Betrieb hinweg. [...] Die Digitalisierung schreitet voran und wird Prozesse nachhaltig verlagern. [...] Wo liegen die Wertschöpfungspotentiale und welche Rolle spielen dabei Digitalisierung und Innovationskraft in Produktionsprozessen? Wie verändern sich gesellschaftliche Strukturen mit der Fokussierung auf ressourcenoptimierte Produktions- und Lebensformen? Oder auch: Wie wird die Digitalisierung der Wertschöpfungskette der Produktion, Industrie 4.0, die Wirtschaft verändern? BIM und damit die IT sind hier nur Mittel zum Zweck - für die Impulse sind die öffentlichen Institutionen in ihrer Vorbildfunktion gefragt.“<sup>24</sup>

In Europa entwickelt sich derzeit die Tendenz hin zu Standardisierungen in diesem Bereich, wie auch das Beispiel Österreich mit der „ÖNORM A 6241 - Digitale Bauwerksdokumentation“ zeigt. In der Schweiz und in Deutschland gibt es zwar Interessengemeinschaften, Verbände und Initiativen, welche das digitale Planen und Bauen fördern, jedoch nimmt hier Österreich eine Vorbildfunktion in der DACH-Region ein, was die Impulse von öffentlichen Institutionen betrifft. Natürlich ist es im Interesse öffentlicher Institutionen BIM zu fördern, denn neben den bekannten Faktoren Kosten und Zeit in der Projektabwicklung, ermöglicht es auch die Optimierung von Gebäuden hinsichtlich klimapolitischer Ziele, durch Energie- und Ressourceneffizientes Bauen und Betreiben.

---

<sup>21</sup> Vgl. Westphal/Herrmann 2015, 4f.

<sup>22</sup> Edba., 14.

<sup>23</sup> Edba., 16.

<sup>24</sup> Edba., 17.

### 2.3) Energieeffizienz als Notwendigkeit

Die Bauwirtschaft und hier insbesondere die Architekten stehen in der Zeit des industriellen Wandels, dem Problem von einem stetig steigenden Energiebedarf und immer knapper werdenden Ressourcen gegenüber. Zeitgleich kämpfen produzierende Unternehmen mit der großen Herausforderungen, sich mit einer ganzheitlich effizienten Wertschöpfungskette, von der Konkurrenz abzusetzen. Die in der DACH - Region ansässigen Unternehmen, können sich trotz hoher Personalkosten mit einem Vorsprung an Know-How, einer effizienten Fertigung und der Produktion nachhaltiger Produkte, einen Wettbewerbsvorteil gegenüber den Mitbewerbern aus Billiglohnländern verschaffen.

Die Architektur hat unter Anbetracht dessen, dass Gebäude in Deutschland etwa die Hälfte des gesamten Energieverbrauchs benötigen und für 40 % aller Treibhausgasemissionen verantwortlich sind<sup>25</sup>, großes Potential zur Effizienzsteigerung und Optimierung im Bau und im laufenden Betrieb der Objekte.

#### 2.3.1) Klimaziele

Energetische Optimierungen spielen in der Architektur seit der Antike eine wesentliche Rolle. Griechen, Ägypter und Römer richteten Gebäude bereits nach dem Sonnenstand aus oder trafen bauliche Maßnahmen für Kühl- und Heizzwecke. Durch die technische Weiterentwicklung, über mehrere Jahrhunderte hinweg, entwickelten die Menschen immer weitere Maßnahmen zur Optimierung der Gebäude. Durch den hohen Energieverbrauch des vergangenen Jahrhunderts entstand die Motivation des zusätzlichen Wärmeschutzes, was jedoch weniger aus ökologischer Sicht betrachtet wurde, sondern ausschließlich aufgrund von Kostensenkung durch Energieeinsparung ausgeführt wurde.<sup>26</sup> Der durch den Menschen verursachte Klimawandel, welcher sich auf die Industrialisierung mit einem nicht unwesentlichen Anteil der Bauindustrie zurückführen lässt, hat in den letzten Jahren das Thema der energetischen Optimierung auch um den Faktor Ökologie bereichert. Neben der zunehmenden Land- und Viehwirtschaft durch eine zunehmende Weltbevölkerung und der damit einhergehende steigende Verbrauch, ist das Verbrennen fossiler Energieträger der Hauptgrund der Erderwärmung.<sup>27</sup> Die Treibhausgas Emissionen stiegen beträchtlich und industrielle Prozesse und der damit verbundenen CO<sub>2</sub> Ausstoß, haben 78% des gesamten Anstiegs im Zeitraum von 1970 bis 2010 verursacht.<sup>28</sup>

---

<sup>25</sup> Vgl. Lenz/Schreiber/Stark 2010, 6.

<sup>26</sup> Edba, 8.

<sup>27</sup> Vgl. Klimawandel, 12.07.2017.

<sup>28</sup> Vgl. IPCC 2013/2014, 5.

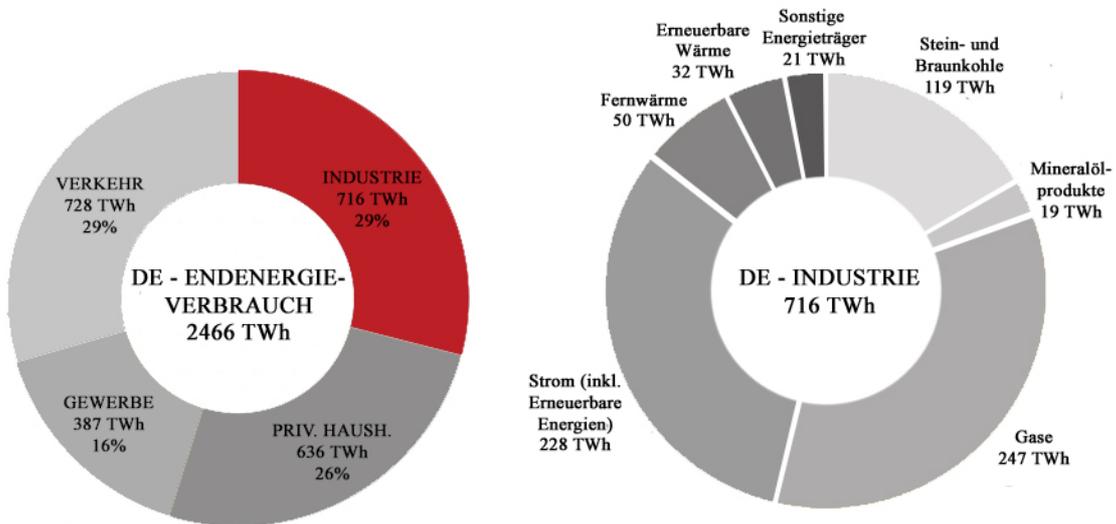


Abb.006

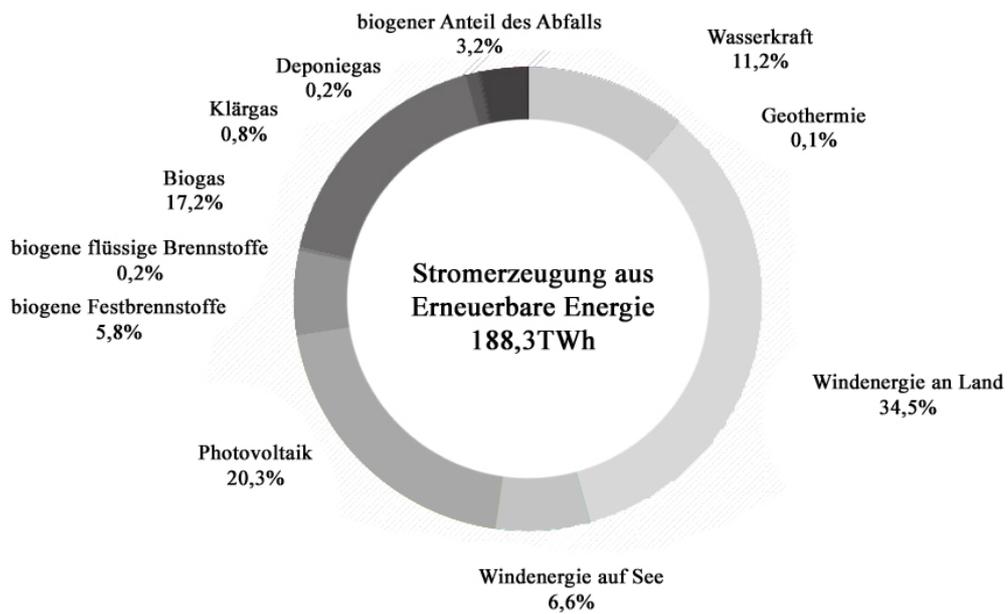


Abb.007

Davon ausgehend bildeten sich mehrere Institutionen, wie zum Beispiel der Weltklimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) der Vereinten Nationen, bei denen Wissenschaftler den aktuellen Kenntnisstand des Klimawandels darlegen und welche Gefahren davon ausgehen.<sup>29</sup> Die tatsächlichen Ausmaße können aufgrund komplexer Faktoren nur über Modellberechnungen veranschaulicht werden.<sup>30</sup>

Wie aus Statistiken der WMO (World Meteorological Organization) hervorgeht, beträgt der weltweite Temperaturanstieg, im Vergleich zu Zeiten vor der Industrialisierung (ca. 1850), 1,2° Celsius.<sup>31</sup> Die internationale Klimapolitik UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) hat es sich im Übereinkommen von Paris im Jahr 2015 zum Ziel gesetzt, dass sich dieser Wert der Erderwärmung nicht auf 2° Celsius erhöhen darf.<sup>32</sup>

Aus den Klimazielen und dem hohen Energieverbrauch des Gebäudesektors heraus, bildeten sich auch viele internationale, aber auch regionale Richtlinien für die Energieeffizienz von Gebäuden. Als Beispiel einer europaweiten Maßnahme zur Senkung des Energieverbrauchs von Gebäuden muss die EU-Gebäuderichtlinie, aus dem Jahr 2010, genannt werden. Diese Richtlinie sieht vor, dass Neubauten ab dem Jahr 2020 in EU Ländern nur noch in Passiv- und Nullenergiebauweise errichtet werden dürfen.<sup>33</sup> Auch hier sollen öffentliche Institutionen wieder als Vorbild dienen, denn für diese Bauten gilt die Richtlinie schon ab dem Jahr 2018.<sup>34</sup> Die Umsetzung dieser Richtlinie in Österreich erfolgte durch eine neue Gesetzgebung des Bundes beziehungsweise auch der einzelnen Bundesländer. Es wurde vom Österreichischen Institut für Bautechnik (OIB) hierfür die OIB-Richtlinie 6 - Energieeinsparung und Wärmeschutz, sowie ein Dokument mit Zwischenzielen in einem Nationalen Plan erarbeitet.<sup>35</sup> Deutschland reagierte auf die oben beschriebenen Entwicklungen mit der Energieeinsparverordnung (EnEV)<sup>36</sup>, welche die einzelnen deutschen Bundesländer umzusetzen haben. Institutionen wie die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB e.V.), welche 2007 aus einem Team interdisziplinärer Initiatoren der Bau- und Immobilienwirtschaft gegründet wurde, setzte es sich zum Ziel nachhaltiges Bauen in das Bewusstsein aller am Bau Beteiligten Personen zu verankern.<sup>37</sup> Ein durch diese Plattform entwickeltes Zertifizierungssystem, ist mittlerweile über die deutschen Grenzen hinaus, im der gesamten DACH Region in Verwendung.

---

<sup>29</sup> Vgl. Der Weltklimarat IPCC, 12.07.2017.

<sup>30</sup> Vgl. Klimawandel, 12.07.2017.

<sup>31</sup> Vgl. WMO provisional Statement on the Status of the Global Climate in 2016, 12.07.2017.

<sup>32</sup> Vgl. Historic Paris Agreement on Climate Change, 12.07.2017.

<sup>33</sup> Vgl. Melita Tuschinski: Neufassung der EU-Gebäuderichtlinie 2010, 12.07.2017.

<sup>34</sup> Ebda.

<sup>35</sup> Vgl. Energieeffizienz bei Gebäuden, 15.08.2017

<sup>36</sup> Vgl. EnEV, 12.07.2017.

<sup>37</sup> Vgl. Die DGNB, 12.07.2017.

### 2.3.2) Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen

*„Weiser Verbrauch ist eine weit schwierigere Kunst als weise Produktion.“<sup>38</sup>*

*John Ruskin, britischer Maler und Sozialkritiker*

Unternehmen müssen sich mit den Problemen immer knapper werdenden Ressourcen, geforderter Energieeffizienz und den politischen Zielsetzungen hinsichtlich des Klimawandels befassen. Denn diese Faktoren gewinnen in der Wettbewerbsfähigkeit an immer größerer Bedeutung und erfordern daher auch neue Ansätze in der Fabriksplanung. Neben der tatsächlichen Einsparung von Betriebskosten, verhilft eine energieeffiziente Produktion dazu, ein ganzheitlich innovatives und nachhaltiges Image in den Betrieben zu verankern. Die Architektur eignet sich hier hervorragend, diese Einstellung eines Unternehmens nach außen hin sichtbar zu machen und den Ausdruck der Entwicklung von Unternehmen zu repräsentieren. Der Weg der neuen Informations- und Kommunikationstechniken, welcher über die Industrie 4.0 eingeschlagen wurde, verhilft zu einer smarten Vernetzung der Produktion, den dadurch entstehenden Ressourcen- & Energiebedarf und dem Gebäude.<sup>39</sup>

---

<sup>38</sup> Pehnt 2010, v.

<sup>39</sup> Vgl. Kersten/Koller/Lödding 2014, 53.

### 3.) Methodik - der Weg zum Industriebau 4.0

Möglichst viele, wenn möglich gleiche Produkte waren der revolutionäre Ansatz zu Zeiten der Fließbandproduktion. Das Ergebnis war, dass eine Vielzahl an Produkten für die breite Masse zugänglich wurde. Der Nachteil für die produzierenden Unternehmen, welche nach diesem Muster heute noch arbeiteten ist, dass sie einseitig ausgerichtet sind und unter Anbetracht der Diversifikation, durch dieses starre System an Wettbewerbsfähigkeit einbüßen.

*„Das Leben gehört den Lebendigen an, und wer lebt, muss auf Wechsel gefasst sein.“<sup>40</sup>*

*Johann Wolfgang von Goethe*

„Flexibilität = Auslastung = Profitabilität“ ist eine Formel eines deutschen Automobilherstellers, welche neben deren Leitsatz „Die Produktion folgt dem Markt“, die Notwendigkeit von flexiblen bzw. wandelbaren Industriebauten und deren Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit treffend beschreibt.<sup>41</sup>

Kürzere Innovationszyklen und stetig wachsende Nachfrage an der Individualisierung von Produkten prägen die industrielle Produktion seit dem 21. Jahrhundert, was sich auch in den Fabrikkonzepten wiederfinden muss, denn die Fabrikplanung sieht sich im Zeitalter der vierten Industriellen Revolution mit neuen Anforderungen konfrontiert. Waren in der Fabrikplanung der Vergangenheit vor allem die Logistik und Wirtschaftlichkeit durch Massenproduktion gefordert, so müssen heute auch Wandelbarkeit, Nachhaltigkeit, Energie- und Ressourceneffizienz mitbedacht werden. Für produzierende Unternehmen soll ein Umbau oder Neubau einer Produktionsstätte eine langfristig wirtschaftlich nachhaltig gedachte Investition sein.<sup>42</sup>

Die Herausforderung der Architekten ist es, als Teil eines interdisziplinären Planungsteams, das Layout für eine wandlungsfähige Fabrik zu erstellen, um eine zukunftsfähige Investition der Betriebe zu garantieren. Zusätzlich wird dies über eine „Synergetische Fabrikplanung“ erreicht, welche Produktions- und Objektplanung sowie das Projektmanagement vereint.<sup>43</sup> Ziel ist es dabei, unterschiedliche Disziplinen miteinander zu vernetzen, um wechselseitig Synergien zu nutzen und dadurch die Planung zu optimieren. Der deutsche Ingenieur und Professor H.-P. Wiendahl beschreibt mit seinen fünf Schlüsselfaktoren<sup>44</sup>, was in Zukunft für eine wandlungsfähige Fabrik unabdingbar sein wird:

---

<sup>40</sup> Altmannsdorfer/Hinderer/Kronthaler/Meinig 2017, 3.

<sup>41</sup> Vgl. Nyhuis/Reinhart/Abele, Wandlungsfähige Produktionssysteme, 16.07.2017.

<sup>42</sup> Vgl. Kampker/Osebold/Trautz/Burggräf/Krunke/Meckelnborg/Leufgens/Rogel, Innovative Fabriken interdisziplinär planen, 12.07.2017.

<sup>43</sup> Vgl. Synergetische Planung wandlungsfähiger Fabriken, 02.09.2017.

<sup>44</sup> Ebda.

- Mobilität: Dieser Faktor beschreibt eine flexible Raumabgrenzung, welche schnell die Position der Räume reorganisieren lässt inkl. beweglicher Elemente der Gebäudetechnik.<sup>45</sup>
- Modularität: Modularisierung von Raum und Gebäudetechnik, insbesondere ist hier zu beachten, dass Tragwerk und die Hülle von der Sekundärstruktur zu lösen.<sup>46</sup>
- Skalierbarkeit: Definiert die Einplanung von Raumreserven bzw. das Schaffen von Möglichkeiten, welche eine Erweiterbarkeit gewährleisten.<sup>47</sup>
- Kompatibilität: Freie Grundrisse durch die Planung von Konstruktionen die eine Stützenfreiheit innerhalb der Räume ermöglichen. Eine hoch liegende Medienversorgung die leicht verschoben werden kann (Strom, Wasser, Druckluft, Rohmaterial, etc.) bzw. eine einheitliche Nutzlast der Bodenplatte (schwere Maschinen unabhängig verschieben) um flexibel auf Veränderungen reagieren zu können.<sup>48</sup>
- Universalität: Funktions- und Nutzungsneutrale Planung inkl. einer redundanten Erschließung bzw. außen liegender Vertikalerschließungen.<sup>49</sup>

### 3.1) Werkzeuge der Architekten in Zeiten der Digitalisierung

*„Es gibt keine Alternative zur Digitalisierung. Auch nicht auf dem Bau. Die Branche muss aufholen.“<sup>50</sup> Roland Berger*

Die Methodik bzw. Arbeitsweise aller Projektbeteiligten muss mit einem zeitgemäßen Planungswerkzeug, wie Building Information Modeling und Algorithmic Modeling funktionieren, welches ein interdisziplinäres Arbeiten, an einem gemeinsamen digitalen Modell, ermöglicht. Die Zusammenführung und Vernetzung von Daten eines interdisziplinären Teams ist durch Werkzeuge der zunehmenden Digitalisierung aller Geschäftsbereiche möglich.

Building Information Modeling (BIM) wird die Basis für diese Zusammenarbeit bilden und durch den Einsatz von Algorithmen ergänzt werden. Das Ziel muss es sein, einen digitalen Zwilling des Industriebaus zu erstellen und die Ergebnisse hinsichtlich Anpassungsfähigkeit, Automatisierung und Analysen auf ein neues Niveau heben.

---

<sup>45</sup> Vgl. Synergetische Planung wandlungsfähiger Fabriken, 02.09.2017.

<sup>46</sup> Ebda

<sup>47</sup> Ebda

<sup>48</sup> Ebda

<sup>49</sup> Ebda

<sup>50</sup> Ebda

Zukunftsfähige Fabriken müssen in einer Zeit, welche durch rasche Veränderungen geprägt ist, schnell reagieren können. Veränderungen innerhalb der Produktion dürfen nicht an einer räumlichen bzw. gebäudetechnischen Struktur scheitern. Architekten müssen dafür sorgen, dass zeitgemäße Fabriken so aufgebaut sind, dass sich die Produktions- und Logistiksysteme weitestgehend uneingeschränkt durch die Gebäudestruktur und deren Einrichtung (Maschinenaufstellungen, TGAE, etc.), sowie die Material-, Personal und Energieflüsse anpassen lassen. <sup>51</sup>

Steigende Energiepreise, sinkende Ressourcen, demographischer Wandel, zunehmende Individualisierung der Produkte, Konkurrenz durch die Globalisierung begründet und neue Technologien sind die wesentlichen Faktoren auf welche die Fabriken in Zukunft reagieren müssen. <sup>52</sup>

Welche Mittel der Projektbeteiligten zu einer integralen Planung, für Gebäude der Industrie 4.0, führen und zu welchen Herausforderungen es dabei kommt wird in weiterer Folge erläutert.

### 3.1.1) Building Information Modeling

*„Planung hat immer mit der Generierung von Informationen zu tun, die später in einem Fertigungsprozess genutzt werden.“*

*Alexander Rieck, designtoproduction, Stuttgart / Deutschland<sup>53</sup>*

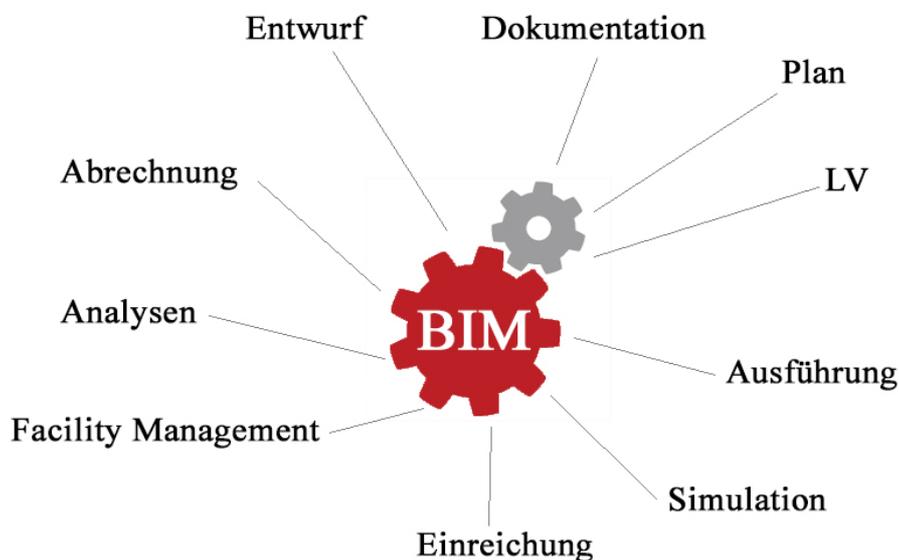


Abb.008

<sup>51</sup> Vgl. Limacher, Wandlungsfähige Fabrik, 04.08.2017.

<sup>52</sup> Vgl. Synergetische Planung wandlungsfähiger Fabriken, 02.09.2017.

<sup>53</sup> Vgl. Westphal/Herrmann 2015, 4f.

„Building Information Modeling (BIM) ist ein intelligenter, auf einem 3D-Modell basierender Prozess, der Architekten, Ingenieuren und Bauunternehmern Informationen und Werkzeuge für effiziente Planung, Entwurf, Konstruktion und Verwaltung von Gebäuden und Infrastruktur bereitstellt.“<sup>54</sup>

Die Planungsmethode BIM stellt für einen zeitgemäßen Industriebau eine Notwendigkeit dar, denn Ziel ist es das digitale Abbild des Industriebau 4.0 über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu verwenden. Vorab sollen Abläufe simuliert werden, welche Optimierungen hinsichtlich Produktions- bzw. Energieeffizienz ermöglichen. Des Weiteren werden vorab alle notwendigen Daten mit den diversen Fachplanern abgeklärt und eine integrale Planung gelebt. Dadurch werden Fehler in der Ausführung minimiert, was neben den durch den BIM-Einsatz ermöglichten Optimierungen schnell zu einer Amortisierung von höheren Planungskosten sorgt.

Die Qualität der BIM Planung macht sich auch dadurch bemerkbar, dass hier die Basis für einen digitalen Zwilling geschaffen wird, der dem Bauherrn eine weitere Nutzung in seinem Betrieb, garantiert. So kann das „as built“ Modell mit seinen Daten (Barcodes, Produkthinweise, etc.) für das Facility Management eine große Erleichterung darstellen, aber auch direkt innerhalb der Produktion zum Beispiel von Fahrerlosen Transportsystemen zur Orientierung genutzt werden. Hierfür sind jedoch klare Strukturen und Standards, welche z.B. im deutschen Stufenplan „Digitales Planen und Bauen“, entwickelt werden um eine uneingeschränkte Zusammenarbeit zu ermöglichen.<sup>55</sup>

Die BIM-Anwender Adam Orlinski und Julian Weyer beschreiben in weiterer Folge ihre Sicht zum Thema Building Information Modeling.

Adam Orlinski, Bollinger + Großmann Ingenieure, Frankfurt a.M./Deutschland:

„BIM-Software bietet uns ganz generell den großen Vorteil, die gesamte Plandarstellung automatisieren zu können. Es geht also nicht nur darum, den verschiedenen Bauteilen spezifische Informationen zu hinterlegen, so dass sie quasi wissen, was sie sind und wie sie behandelt werden müssen. Viel wichtiger ist aus unserer Sicht, dass sich die unterschiedlichen Bauteile automatisiert an andere Bauteile sowie an eventuelle Änderungen anpassen.“<sup>56</sup>

Julian Weyer, Partner bei C.F. Moller Architects, Aarhus/Dänemark:

„Aktuell steigt die Industrie immer tiefer in BIM ein [...] Es wird mehr BIM geben. Nicht nur in Form von 3D-Modellierung mit steigendem Umfang an Spezifikationen über Bauelemente, sondern auch im Einsatz von BIM in den Anfangsphasen: Solarstudien, Analysen zum Energieverbrauch und >> smart building design << mit conceptual scripting.“<sup>57</sup>

---

<sup>54</sup> Vgl. Was ist BIM?, 13.07.2017.

<sup>55</sup> Vgl. Stephan, IFC, openBIM und die neue Art der Zusammenarbeit, 22.08.2017.

<sup>56</sup> Westphal/Herrmann 2015, 60-61.

<sup>57</sup> Ebda, 24.

„Wir sehen BIM mehr in der Dokumentationsphase, es wird weiter in die Bauphase, dann in die Konstruktionsphase und dann in die Anlagenmanagementsphase übergehen.“<sup>58</sup>

„Die Entwürfe müssen >>Lean, Green and Digital<<, schlank in den Prozessen, effizient in Energieaspekten und über IT-Services, digitale Tools und die geeignete Auswahl in den Projekten eng verknüpft sein.“<sup>59</sup>

### 3.1.1.1) Integrale Planung

Projekte welche mit Building Information Modeling geplant werden, haben ein sehr großes Potential Fehler frühzeitig zu erkennen und so während der Ausführungs- aber auch der Betriebsphase das Risiko von unerwarteten Problemen zu minimieren. Außerdem ermöglicht das digitale Gebäudedatenmodell Optimierungsmaßnahmen zu tätigen, deren Potentiale vorab über Simulationen sichtbar wurden. Den Bauherren wird somit eine hohe Transparenz und Sicherheit geboten, da vor der realen Ausführung, dass Gebäude vorab digital gebaut und neben den innerbetrieblichen Abläufe auch Energieströme simuliert werden.

Um dies zu gewährleisten, müssen alle Projektbeteiligte ein einheitliches BIM-Verständnis über die verschiedenen Projektphasen hinweg haben. Hierbei geht es nicht nur darum, dass alle Informationen organisiert werden müssen, sondern das eben diese auch konsequent unter klar definierten Standards in das digitale Gebäudedatenmodell einfließen. Für die Zusammenarbeit der verschiedenen Fachplaner muss also vorab eine gemeinsame Arbeitsumgebung definiert werden, für welche sowohl die technischen Voraussetzungen als auch der Umgang während der Planungsphase geklärt werden muss. Der Informations- bzw. Datenaustausch erfolgt in der Regel in drei Bereichen, nämlich graphisch (Modellserver), alphanumerisch (Listen, Raumbücher, etc.) und dokumentarisch (Baubeschreibung, Produktdatenblätter, etc.).<sup>60</sup>

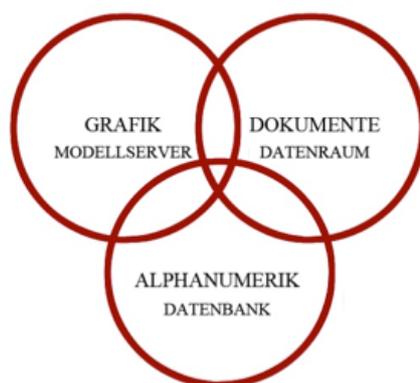


Abb.009

<sup>58</sup> Westphal/Herrmann 2015, 25.

<sup>59</sup> Ebda, 25.

<sup>60</sup> Vgl. Schober, Digitization of the construction industry, 21.08.2017.

Grundsätzlich soll die Zusammenarbeit bzw. der Informationsaustausch über Server funktionieren, da somit immer der gültige Letztstand der Planung für alle Beteiligten zugänglich ist. Dies vermindert die Fehleranfälligkeit sehr, da ein Arbeiten auf falschen Planständen verhindert wird. In der unten stehenden Abbildung ist eine auf Servern basierende Zusammenarbeit, eines integralen Planungsteams dargestellt. Grundsätzlich arbeitet jeder Fachplaner an seinem eigenen Gebäudedatenmodell, welche mit einer Gesamtdatei synchronisiert werden. Diese, oftmals auch als Zentralmodell bezeichnete Datei, führt die Informationen aller Planungsbeteiligten zusammen und prüft diese z.B. auf Kollisionen. Das Problem vom Arbeiten mit verschiedenen Planständen ist somit beseitigt und führt neben der Kollisionsprüfung dazu, dass Planungsfehler minimiert werden, was sich in weiterer Folge auch auf eine unkompliziertere Ausführung auswirkt.

### 3.1.1.2) Aufbau und Struktur des Gebäudedatenmodells

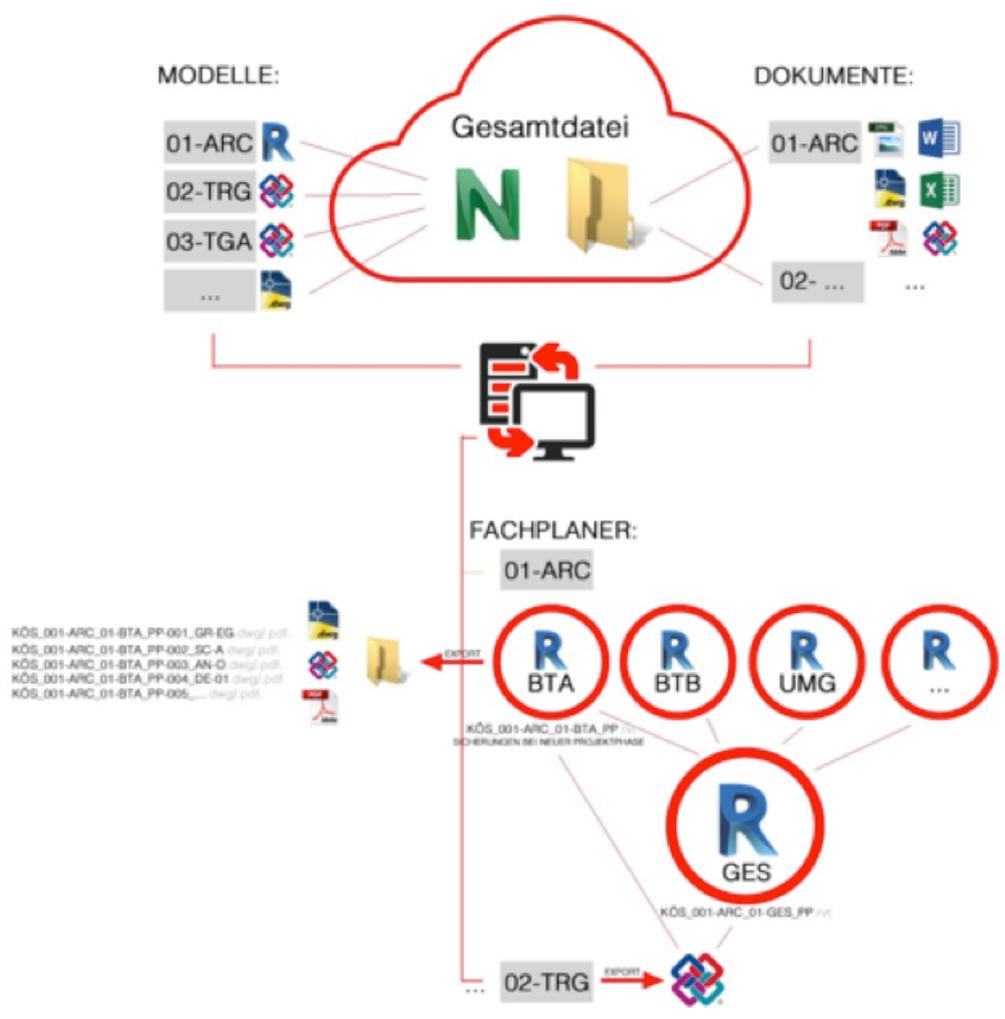


Abb.010

Bei umfangreichen Bauvorhaben für die Industrie 4.0, kommt es zur Herausforderung einer komplexeren Koordinierung aller Beteiligten, vor allem auch während der Planungsphase bzw. der Umsetzung.

Zeitgemäße Planungswerkzeuge wie Building Information Modeling können hier für das Planen, Ausführen und Betreiben der Industriebauten eine erhebliche Erleichterung darstellen, müssen auf Grund der oftmals wenig BIM-erfahrenen Projektbeteiligten, klaren Standards und Verantwortlichkeiten folgen.<sup>61</sup>

Der Architekt übernimmt hier zumeist die Rolle des Koordinators der unterschiedlichen Gewerke, da die Position eines BIM-Managers bzw. die eines Planungs koordinators in seinem tatsächlichen Umfang nur bei einigen wenigen Großprojekten zum Einsatz kommt. Der Architekt muss in dieser Rolle, also auch ein grundlegendes Verständnis für die anderen Gewerke haben, deren Modelle er in einem Gesamt- oder auch Zentralmodell genannt zusammenführt und kontrolliert, dass sich alle Projektbeteiligten an die zuvor definierten Standards halten. Wobei man auch hier wieder auf das aus der Antike stammende und von Vitruv entworfene Berufsbild des Architekten zurückblicken kann, welcher diesen in seinen Zehn Büchern über Architektur, als „Homo Universalis“ bezeichnet.<sup>62</sup> Dies bedeutet, dass der Architekt sowohl Kompetenzen in der Technik, als auch in der Theorie besitzt und sich demnach sein Wissen über mehrere Bereiche, wie Geschichte, Musik, Astronomie und Arithmetik, bzw. auch über Geometrie und die Rechtswissenschaften erstreckt. In die heutige Zeit übersetzt bedeutet dies, dass der Architekt auch Kenntnisse in der Haustechnik, Tragwerksplanung, aber auch in Produktionsprozessen haben muss.

Grundsätzlich wird für die Ausarbeitung des Projekts im Umfang der Masterarbeit, der Detaillierungsgrad Level of Detail - LOD 200 bzw. Level of Information - LOI 200 festgelegt. Diese Klassifizierung beschreibt den Informationsgrad bzw. die Planungsphase, in welcher sich das BIM-Modell befindet. Die Tiefe der Ausarbeitung wird sowohl bei LOD als auch bei LOI in fünf Schritten (100-500) gegliedert, welche von einfachen Baumassen und Raumtypen ausgehen und bis hin zu einem „as built“ Modell gehen um es auch während des Betriebs (z.B. über ein CAFM System) weiter zu verwenden.<sup>63</sup>

LOD/LOI 100: Das Modell enthält Volumenkörper, welche das Auswerten von Nutz- und Verkehrsflächen und deren Zusammenhänge ermöglichen. Des Weiteren können erste Energieabschätzungen über Simulationen der Baumassen erstellt werden. Es ist eine erste Datenbank vorhanden, welche die groben Anforderungen des Bauherrn beschreibt und z.B. frühe Kostenschätzungen ermöglicht.<sup>64</sup>

Hier kommt es zu einer Schnittstelle zwischen dem BIM Programm (z.B. Revit) und dem Algorithmic Modeling (Dynamo oder Grasshopper). Erste Baukörper und Simulationen werden in weiterer Folge auch in dem Projekt der Masterthesis erstellt und dienen als Grundlage zur Weiterbearbeitung im BIM Programm.

---

<sup>61</sup> Vgl. BIM Praxisleitfaden, 12.07.2017.

<sup>62</sup> Vgl. Vitruv.

<sup>63</sup> Vgl. BIM Praxisleitfaden, 12.07.2017.

<sup>64</sup> Ebda.

LOD/LOI 200: Hier ist die Form und Orientierung des Gebäudes festgelegt und Bauelemente wie Wände, Türen, Decken, Fassade und Räume, Tragwerk und TGAE-Bauteile als Volumenkörper definiert. Die Hauptgewerke können somit bereits in einer frühen Projektphase koordiniert werden. Die Datenbank wird erweitert und es kann die erste Version eines Raumbuchs erstellt werden.<sup>65</sup>

Auch hier tritt wieder eine Schnittstelle zwischen BIM Programm und Algorithmic Modeling auf, welche im Projekt der Masterarbeit veranschaulicht werden. Die Programme verfügen oftmals bereits über eine sogenannte Live-Synchronisation, welche Änderungen zeitgleich zwischen den Programmen austauscht. Dies ermöglicht einen hohen Grad der Parametrisierung des BIM Modells.

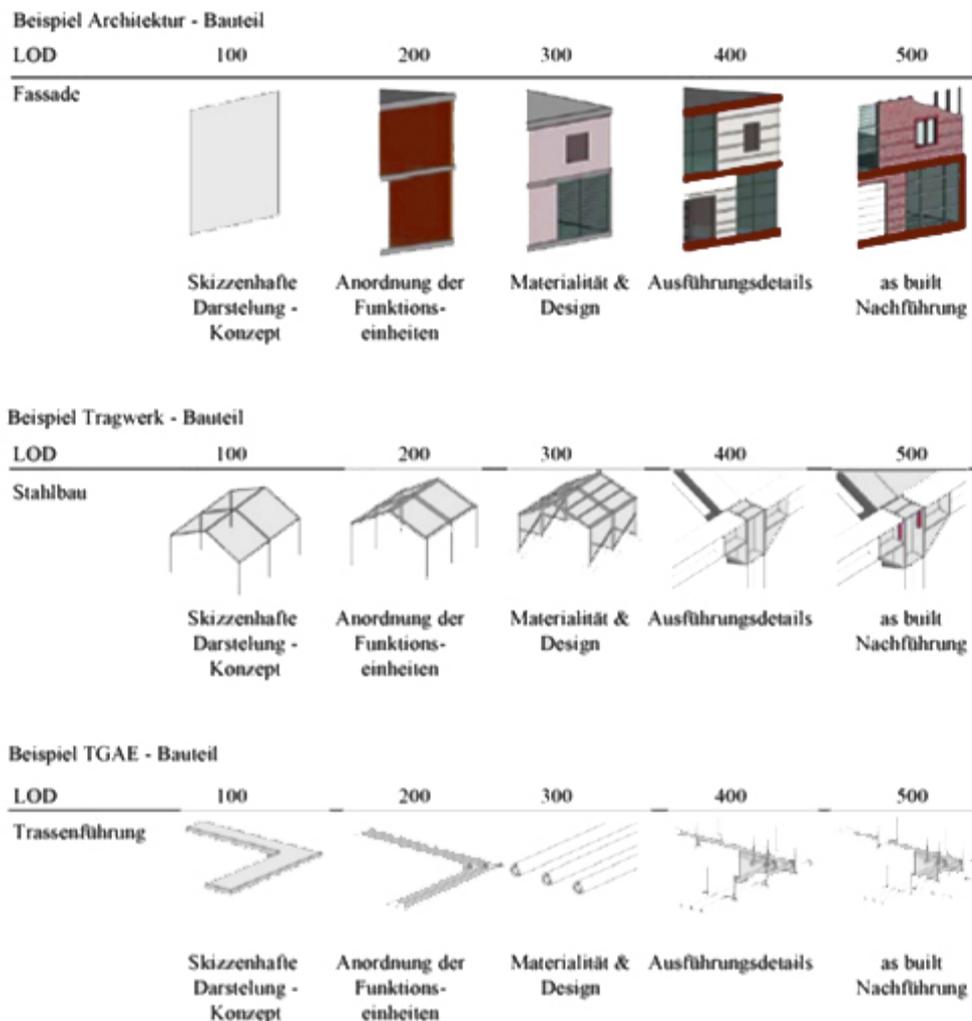


Abb.011

<sup>65</sup> Vgl. BIM Praxisleitfaden, 12.07.2017.

### 3.1.2) Algorithmic Modeling

Architekten können mit Hilfe einer visuellen Programmierung, als Erweiterung zum Building Information Modeling, Prozesse im Sinne der Industrie 4.0 automatisieren, das BIM - Modell mit externen Daten vernetzen, komplexe Geometrien erstellen und für Analysen und Simulationen einsetzen. Ziel ist es mit Hilfe von Programmen wie Dynamo oder Grasshopper, Erfahrungen und Wissen computer-interpretierbar abzulegen, um einen teilautomatisierten Entwurf zu erstellen beziehungsweise eine automatisierte Anpassung des BIM-Modells an veränderte Rahmenbedingungen zu ermöglichen.<sup>66</sup>

„Mit dem Automatisieren von Arbeitsschritten durch Algorithmic Modeling können Architekten und Ingenieure in etwa 60 bis 70 Prozent Routinearbeit und damit auch viel Zeit einsparen“, so Prof. Dr.-Ing. André Borrmann, Leiter des Lehrstuhls für Computergestützte Modellierung und Simulation an der TU München.<sup>67</sup>

#### 3.1.2.1) Automatisierung

Auf Grund der zunehmenden Industrialisierung der Bauwirtschaft, wird im Sinne der Industrie 4.0, auch in der Architektur über Automatisierungsprozesse nachgedacht. Das Bewusstsein zu diesem Thema ist auch in der Bauwirtschaft vorhanden und 93% der Unternehmen stimmen lt. einer in Deutschland durchgeführten Studie zu, dass die Digitalisierung die Gesamtheit der Prozesse beeinflussen wird.<sup>68</sup> Bei der Implementierung des Themas der Digitalisierung in Unternehmen sprechen wir oft von vier Teilbereichen, welche eine Bedeutung auf allen Stufen der Wertschöpfung haben.<sup>69</sup>

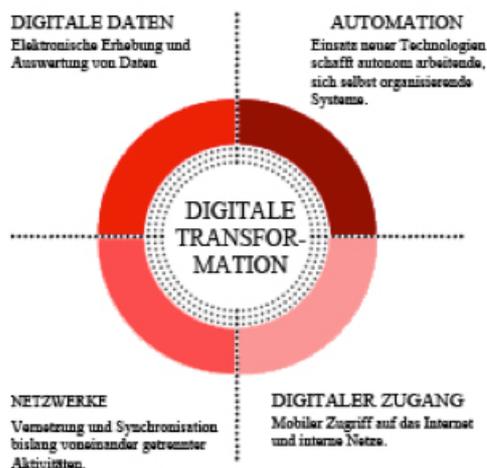


Abb.012

<sup>66</sup> Vgl. Anwenderbericht Technische Universität München, 13.07.2017.

<sup>67</sup> Ebda

<sup>68</sup> Vgl. Schober, Digitization of the construction industry, 21.08.2017.

<sup>69</sup> Ebda

In der Architektur werden zunehmend Automatismen in der Planung erarbeitet auf diese alle vier Bereiche zur Anwendung kommen. So werden unter Einsatz neuester Technologien Algorithmen erstellt, welche auf digitale Daten aus dem Internet (z.B. Standortdaten für thermische Analysen oder Preislisten für Bauteile mit aktuellen ortsspezifischen Zuschlägen, etc.) zurückgreifen und verwerten, um diese an ein vernetztes System (BIM: z.B. Schnittstelle Dynamo & Revit) weiterzugeben.

Dadurch wird das Algorithmic Modeling für das Planen, Ausführen und Betreiben eine wesentliche Rolle bei der Umsetzung der Digitalisierung sein. Vor allem die Möglichkeiten der Automatisierung können mit Programmen wie Grasshopper und Dynamo vorangetrieben werden. Durch den Einsatz dieser für den Planer neuen Technologien, werden unnötige Routinearbeiten automatisch von vordefinierten Programmen abgearbeitet und ermöglichen es Dienstleistern wie Architekten und Ingenieure, den wertvollen Faktor Zeit sinnvoller zu nutzen. Der Einsatz der Automatisierung über Algorithmen ist für die Branche bahnbrechend, da in unserer schnelllebigen Zeit, die Arbeit auf das wesentliche fokussiert werden kann und im Idealfall das Ergebnis optimierte Konzepte für energieeffiziente Gebäude sind und diese Methode zum Standard der Branche wird.

### 3.1.2.2) Simulationen

Das Ziel der Architekten muss es sein, in einem frühem Stadium des Planungsprozesses die erstellten Baukörper energetisch zu analysieren und diese daraufhin zu optimieren. Vor allem, wenn man die vorher erläuterten Zusammenhänge zwischen der Bauwirtschaft (insbesondere Architektur) und der politischen Klimaziele betrachtet, rücken Simulationen welche vorab Optimierungen treffen, in den Fokus der Planer. Diese energetischen Simulationen greifen auf Daten aus dem Internet zurück und werden in den Prozess des Algorithmus Modeling mit eingebunden. Die Daten werden oftmals von der Plattform EnergyPlus bezogen, welche neben dem Laden von standortspezifischen Wetterdaten auch ein eigene Simulationen für den Energieverbrauch von Heizung, Kühlung, Lüftung und Sanitär/Wasserverbrauch (HKLS) und Lichtverhältnissen bietet.<sup>70</sup> Diese open-source Plattform funktioniert Systemübergreifend und wird auch in Plug-in's von den Algorithmen Modeling Programmen Dynamo und Grasshopper verwendet. Bekannte Beispiele, welche in weiterer Folge auch in der Masterarbeit, zur Anwendung kommen sind Ladybug und Honeybee, welche parametrische 3D Graphiken, Animationen und eine Daten Auswertung bzw. Visualisierung unterstützt.<sup>71</sup>

Diese Tools sind die wahren Werkzeuge der Architekten in Zeiten der Digitalisierung und werden bereits heute von namhaften Unternehmen wie Foster + Partners oder der BIG - Bjarke Ingels Group verwendet, bzw. neben der Technischen Universität Graz auch international z.B. an der Harvard University oder dem MIT (Massachusetts Institute of Technology) gelehrt.<sup>72</sup>

---

<sup>70</sup> Vgl. EnergyPlus, 26.10.2017.

<sup>71</sup> Vgl. Ladybug Tools, 26.10.2017.

<sup>72</sup> Ebda.

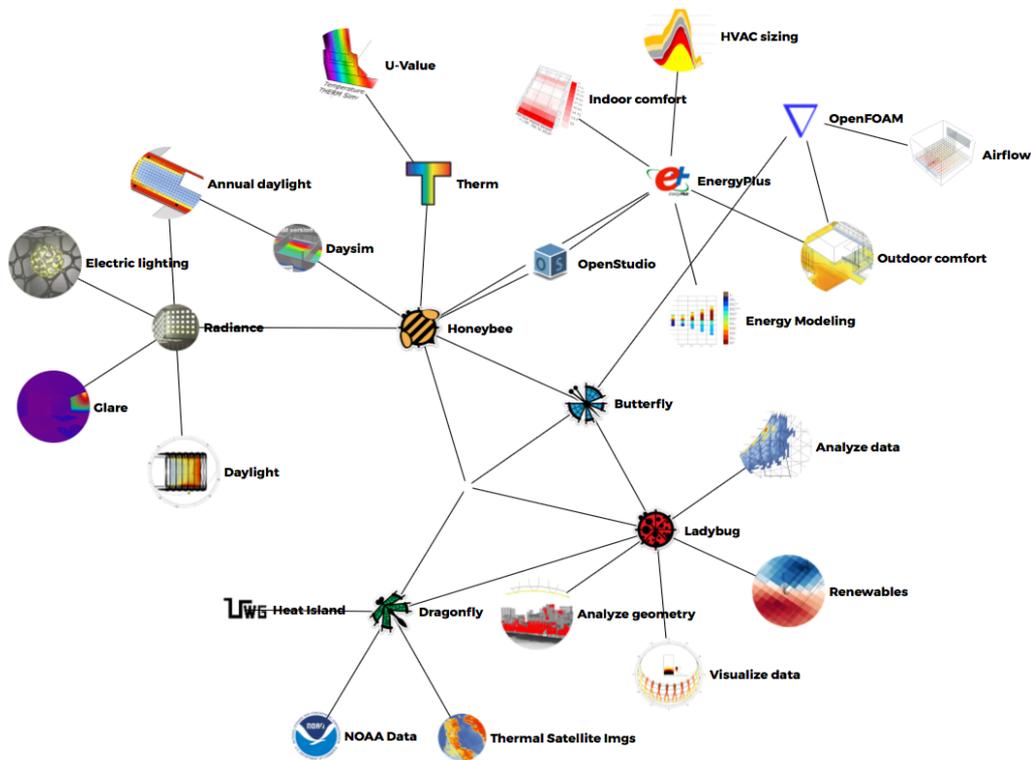


Abb.013

Auch für den Ansatz der integralen Planung sind diese Gebäudesimulationen von großer Bedeutung, da hier bereits von Projektbeginn an Daten von Fachplanern in die Modellierungsalgorithmen des Architekten einfließen und Synergieeffekte zwischen den Projektbeteiligten genutzt werden.

Durch Simulationen dieser Art werden diverse Varianten des Entwurfs analysiert und ein optimiertes Konzept erstellt. Dies hat zur Folge, dass bereits im vor der Inbetriebnahme ein digitales Abbild der Abläufe und der Effizienz erstellt werden kann. Die Reichweite dieser Analysen reicht von Untersuchungen zu großen klimatischen Phänomenen wie dem Klimawandel, bis hin zu Simulationen einzelner Bauteile oder Räumen eines Projekts.

Die Werkzeuge der Architekten, welche die Ergebnisse dieser Simulationen liefern sind in dem angestrebten Planungsprozess direkt integriert und werden in weiterer Folge kurz beschrieben:

- Ladybug:

Ladybug ist ein Werkzeug für Architekten, um Projekte mittels standortspezifischen Klimadaten zu analysieren, bzw. diese damit energieeffizienter zu designen. Hierfür greift das Programm auf Energy Plus Wetter Daten zurück und lädt diese aus dem Internet bzw. importiert diese in einem weiteren Schritt in Grasshopper oder Dynamo. In dieser Umwelt des Visuellen Programmieren (Grasshopper / Dynamo) können auf Grund der direkten Integration ad hoc Analysen zu Modifikationen am Entwurf gegeben werden. Für die Projekte können zahlreiche 2D aber auch 3D Graphiken erstellt werden, welche in einem frühen Entwurfsstadium den Designprozess maßgebend beeinflussen.<sup>73</sup>

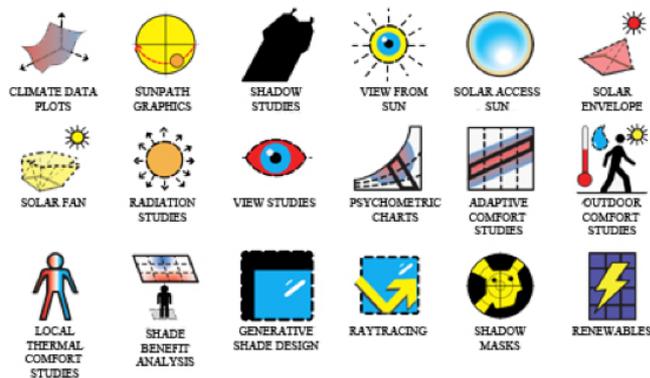


Abb.014

- Honeybee:

Honeybee erzeugt und visualisiert neben Tageslichtsimulationen auf Basis von “Radiance”, auch bauteilspezifische Wärmefluss-Simulationen mit “Therm”.

Auch hier werden die Simulationen direkt mit den Algorithmic Modeling Umgebungen, wie Grasshopper/Rhino and Dynamo/Revit verbunden und findet vor allem einem weiter fortgeschrittenen Entwurfsstadium zur Anwendung.<sup>74</sup>

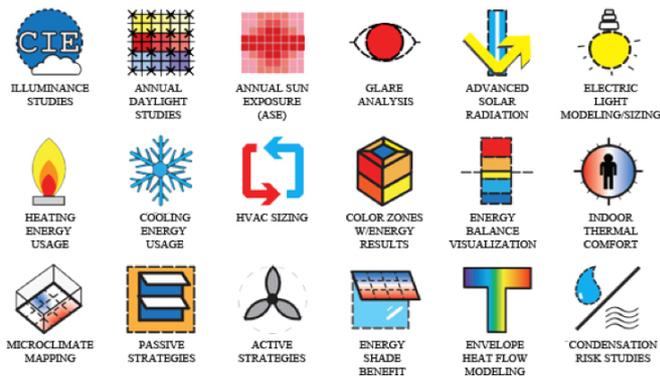


Abb.015

<sup>73</sup> Vgl. Ladybug, 26.10.2017.

<sup>74</sup> Vgl. Honeybee, 26.10.2017.

Diese Analysen (z.B. zur natürlichen Belichtung und Belüftung bzw. der freien Sicht) kommen auch in weiteren Planungsstadien, wie der Einreichung wo diesbezüglich Nachweise gefordert werden, zum Einsatz.

- Butterfly:

Butterfly ist ein Werkzeug für sogenannte fluid dynamics (CFD) Simulationen und funktioniert auf Basis von OpenFOAM, welche derzeit die am besten bewertete open-source CFD Schnittstelle darstellt. Es sind eine Vielzahl an Simulationen bzgl. Wind und Luftströme möglich, was zum einen für das Entwerfen in einem frühen Stadium von Vorteil ist, da hier die äußeren Einflüsse auf die Hülle analysiert werden. In weiterer Folge wird es auch für HKLS Analysen (Lüftungseffizienz, thermischer Komfort) eingesetzt.<sup>75</sup>

Vor allem bei TGA Planern ist dieses Tool als Schnittstelle zwischen BIM Modell und Algorithmic Modeling hilfreich, jedoch bedienen sich auch Architekten an dessen Möglichkeiten der Analysen.

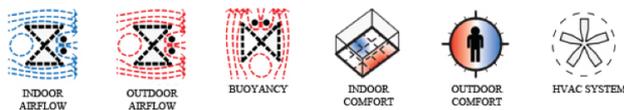


Abb.016

- Dragonfly:

Mittels Dragonfly werden künftig (das Tool befindet sich noch in der Entwicklung) große klimatische Phänomene, wie der städtische Wärmeinseleffekt, Klimawechsel und der Einfluss auf lokale Klimafaktoren wie die Analyse von veränderten Topographien untersucht.

Diese Simulationen und Analysen basieren auf dem "Urban Weather Generator" und "CitySim", bzw. greift Dragonfly auf Daten des National Climactic Data Center's (NCDC), mit deren öffentlich zur Verfügung gestellten stündlichen Wetterdaten, zurück und bezieht Daten von Satellitenbildern mit thermischen Informationen (z.B. LANDSAT). Das Plug-in Dragonfly stellt also mit seinen Möglichkeiten den Startpunkt für eine energetische Mikro-Meso-Makro Analyse dar.<sup>76</sup>

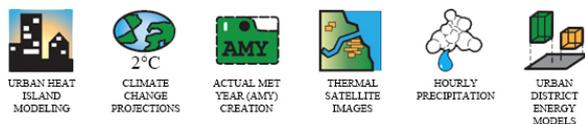


Abb.017

<sup>75</sup> Vgl. Butterfly, 26.10.2017.

<sup>76</sup> Vgl. Dragonfly, 26.10.2017.

### 3.2) Projekt - Ablaufplan

Auf Grund der Auswirkungen der Digitalisierung auf die tägliche Arbeit des Architekten und den Einsatz neuer Planungswerkzeuge, werden die notwendigen Schritte anhand eines Projekt-Ablaufplans dargestellt, welcher als Hilfsmittel bzw. Richtlinie für ein strukturiertes Arbeiten dienen soll.

Der Ablaufplan, welcher weiter unten graphisch dargestellt wird, ist linear strukturiert, jedoch wird es im Planungsverlauf zwischen den einzelnen Tools zu einer Vernetzung bzw. zu Rückgriffen kommen. Dieser erarbeitete Plan soll auch als Grundlage für die Arbeitsweise des in weiterer Folge der Masterarbeit bearbeiteten Projekts dienen und veranschaulicht direkt seine Anwendung anhand eines konkreten Beispiels.

Zu Projektbeginn werden die vorhandenen Daten (z.B. die des Standorts) mit einem Algorithmic Modeling Programm (in diesem Fall Grasshopper) analysiert und aus diesen Erkenntnissen heraus, erste parametrische Baukörper erstellt. Weiters werden die Baukörper mittels Simulationen optimiert, was auf den Baukörper als Ganzes zutrifft (Ausrichtung und Position am Bauplatz), aber auch einzelne Bauteile darin (Öffnungsgrößen von Fenster, Türen bzw. auch Fassaden). Im weiteren Planungsverlauf wird auch auf diese Analyse wieder zurückgegriffen, z.B. wird für die Belichtungsnachweise der Einreichunterlagen der dafür geeignete Algorithmus erneut verwendet. Des Weiteren fließen beim Algorithmic Modeling bereits erste Kenngrößen der TGA (z.B. Lüftung) mit ein.

Der Datenaustausch mit BIM Programmen erfolgt mit den Fachplanern über die standardisierte ifc-Schnittstelle, welche die Plattformübergreifende Weitergabe von BIM Daten (open BIM) ermöglicht). Der Architekt hat die Möglichkeit seine Algorithmen über eine Live-Synchronisation (z.B. Archicad / Grasshopper oder Dynamo / Revit) mit seinem BIM Programm zu vernetzen, wo die Bauteile genauer definiert und die Planlayouts erstellt werden.

Abschließend kommt es über Programme wie z.B. Navisworks, zur Zusammenführung aller Modelle der Fachplaner, um diese unter anderem auf Kollisionen zu prüfen.



ALGORITHMIC MODELING



DRAGONFLY



LADYBUG



HONEYBEE



BUTTERFLY



HUMMINGBIRD



IFC-EXPORT



REVIT



NAVISWORKS



BUILDING INFORMATION  
MODELING

Abb.018

#### 4.) Industriebau 4.0

In weiterer Folge sollen die oben beschriebenen Themen, an einem konkreten Beispiel dargelegt und bearbeitet werden. Hierfür wird ein Unternehmen am Produktionsstandort Oberösterreich gewählt und die davon zur Verfügung stehenden Daten des Unternehmens, welches im Industriezweig Holzverarbeitung tätig ist, für den Zweck der Masterthesis unkenntlich gemacht.

Basis für das Projekt der Masterthesis ist ein in Oberösterreich ansässiger Betrieb, welcher bereits über mehrere Generationen hinweg in der Holzverarbeitung tätig ist. Der Familienbetrieb wuchs von einem kleinen Sägewerk zu einem internationalen Unternehmen, welches verschiedenste Produkte, wie z.B. Leisten, in Holzbauweise herstellt.

Mittels Innovationen in den Produkten und einem ebenso innovativen Produktionsprozess, setzte sich das Unternehmen, in der Vergangenheit, an die Branchenspitze und bietet seinen Kunden Komplettlösungen aus einer Hand. Auf Grund der sich verändernden Anforderungen der vierten industriellen Revolution und einer guten Auftragslage, welche auf einen Know-How Vorsprung des Unternehmens rückzuführen ist, kommt es zu einer Erweiterung der Produktion und der damit verbundenen Lagerflächen, um weiterhin an der Spitze der Branche zu stehen. Trotz der hohen Kapazitäten möchte das Unternehmen an einer großen Flexibilität und der Erfüllung individueller Kundenwünsche festhalten, womit der Betrieb genau die Zeichen der Zeit erkannt hat und auf die Anforderungen der zunehmenden Individualisierung der Industrie 4.0 reagiert.

##### 4.1) Lage – Industriestandort Oberösterreich

Die Lage des Betriebs befindet sich im sogenannten Oberösterreichischen Zentralraum, welcher auch als „fünftes Viertel“ des Bundeslandes bezeichnet wird. Dieser starke Wirtschaftsraum wird von einem Dreieck aus den größten oberösterreichischen Städten Linz, Wels und Steyr gebildet. Diese besondere Lage ermöglicht es nicht nur die Arbeitswege der Facharbeiter, im Sinne der Nachhaltigkeit, möglichst kurz zu halten, sondern auch das Nutzen von einer bereits gut ausgebauten Infrastruktur für das Sustainable Supply Chain Management, welche eine gesamtseitlich nachhaltige Zulieferung ermöglicht.

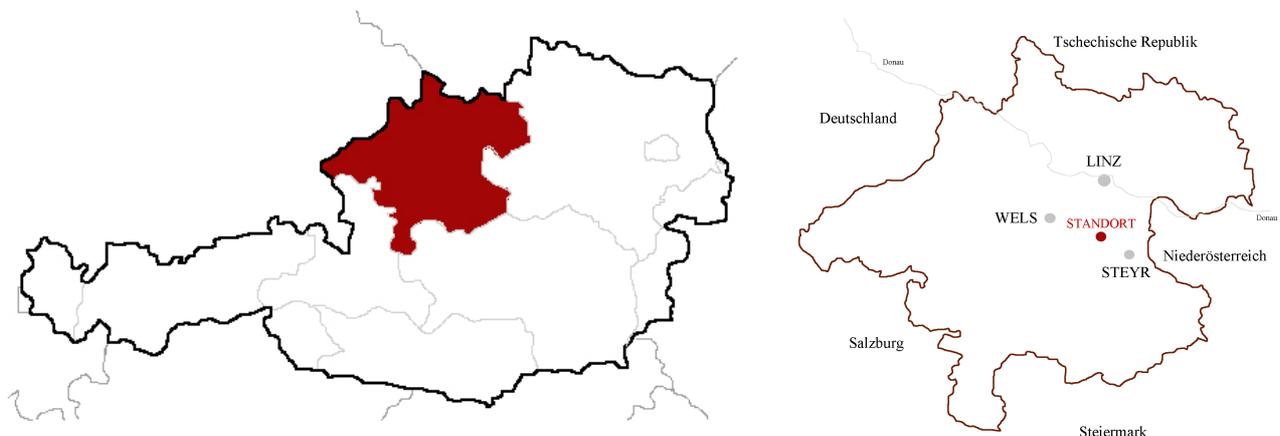


Abb.019

Grundlage für die Erweiterung des Standorts stellt ein neu erworbenes Grundstück dar, welches auf Grund der Nähe, bzw. seiner direkten Verbindung, zum bestehenden Grundstück zur strategischen Erweiterung des Unternehmens hervorragend geeignet ist.



Abb.020

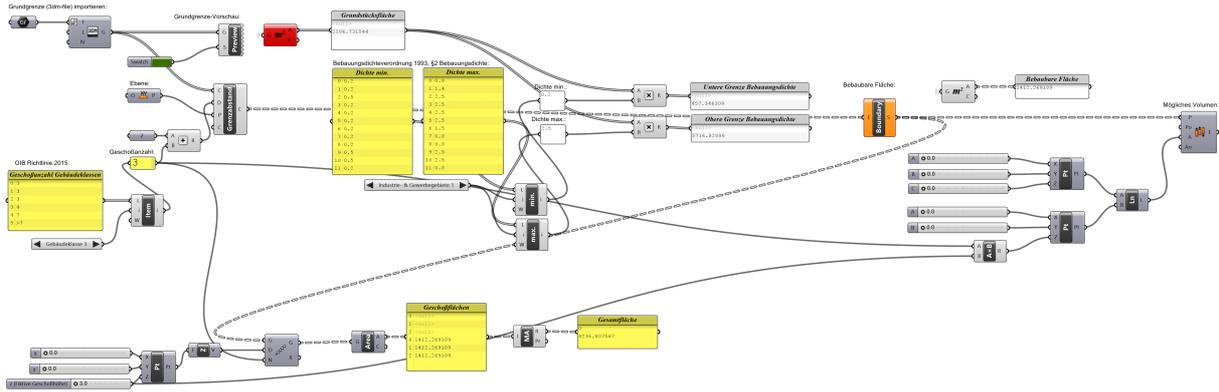


Abb.021

Zu Projektbeginn wird mit einem zum Teil automatisierten Prozess der Entwurf mit vordefinierten Algorithmen unterstützt. Architekten haben wie eingangs beschrieben die Möglichkeit, mit Programmen wie Grasshopper oder Dynamo die Chance einen Großteil Ihrer Routinearbeit, ganz im Sinne der Digitalisierung und Industrie 4.0, von einer Maschine ausführen zu lassen. Im unten stehenden Bild sieht man den Import von den Daten des zuvor gezeigten Lageplans und dessen weitere Verwendung, welche im Anschluss im Detail erläutert wird.

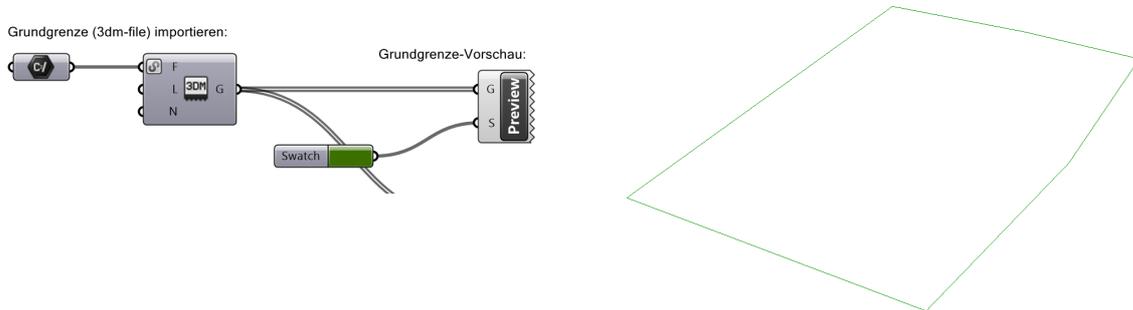


Abb.022

Als erstes werden die baurechtlichen Parameter dargestellt, welche mit Bebauungsgrenzen und Abstandsbestimmungen die Grundlage für jeden architektonischen Entwurf liefern. Das Ergebnis soll ein Volumen auf dem Bauplatz darstellen, welches auf die gesetzlichen Rahmenbedingungen hinweist. Dies erfordert es, dass diesbezügliche Wissen aus Richtlinien und Gesetzen vorab zu digitalisieren. Hierfür wurden Daten der OIB Richtlinie und der Baugesetze in das Programm übertragen, wodurch die Gebäudeklasse, die maximale Geschossanzahl, die Bebauungsdichte und Grenzabstände definiert werden.

Als Basis dienen vor allem die Grundgrenzen und andere Geometerdaten, welche als dwg Datei in das Algorithmic Modeling Programm Grasshopper importiert werden bzw. die dazugehörigen Standortdaten hierfür direkt aus dem Internet geladen werden. In der visuellen Programmierung ist darauf zu achten, Standards zu definieren, wie zum Beispiel, dass der Layer der Importdatei auf dem die Grundgrenze gezeichnet ist, immer eine standardisierte Bezeichnung hat. Dies hat den Vorteil, dass eine Struktur des Automatisierungsprozesses entsteht, welche es ermöglicht, dass der Algorithmus auch für andere Projekte übernommen werden kann.

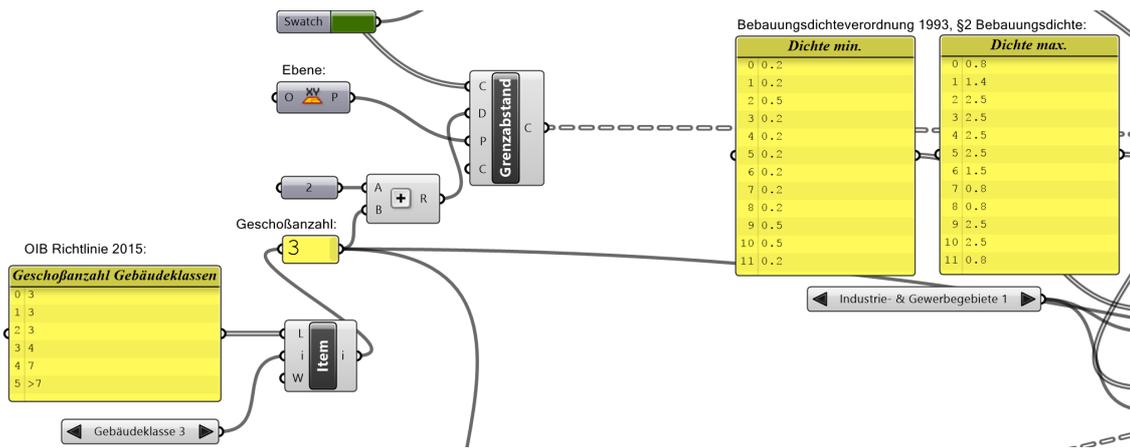


Abb.023

Zuvor digitalisierte baurechtliche Parameter analysieren nun den Bauplatz hinsichtlich der gesetzlichen Rahmenbedingungen. So wird auf Basis der für den Standort spezifischen Baugesetze und Richtlinien ein Volumen erzeugt, welches die Möglichkeiten der zu bebauenden Fläche und der Höhenentwicklung darstellt.

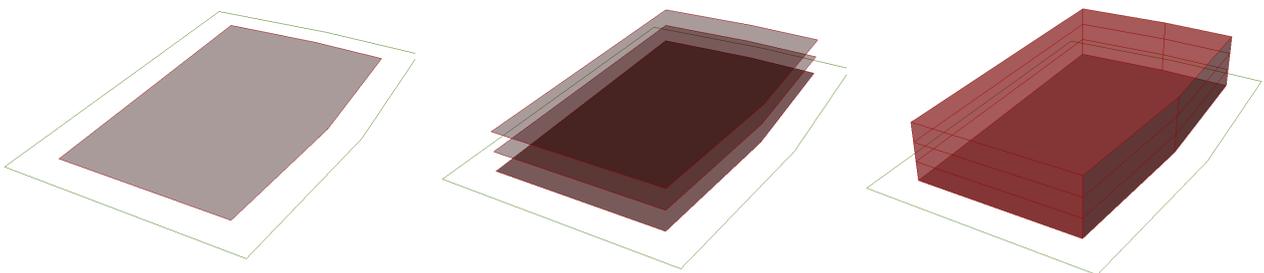


Abb.024

#### 4.1.1) Klima

Oberösterreich weist im Großteil des Landes mitteleuropäisches Übergangsklima auf, das durch ozeanische und kontinentale Einflüsse gekennzeichnet ist.<sup>77</sup> Im weiteren Entwurfsprozess werden die für den Standort klimatischen Rahmenbedingungen analysiert, bzw. soll die Erhebung dieser Daten zu einem energetisch optimierten Entwurf beitragen. Ein in Entwicklung befindliches Tool namens Dragonfly wird große klimatische Phänomene darstellen und Tendenzen wie den Klimawandel in den Entwurfsprozess einfließen lassen. Die unten stehenden Diagrammen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik zeigen die Wetterdaten des Jahres 2017 für unseren Standort. Die Anwendung der Wetterdaten werden mit dem Tool Ladybug im weiteren Projektverlauf für Analysen des Baukörpers dargestellt.

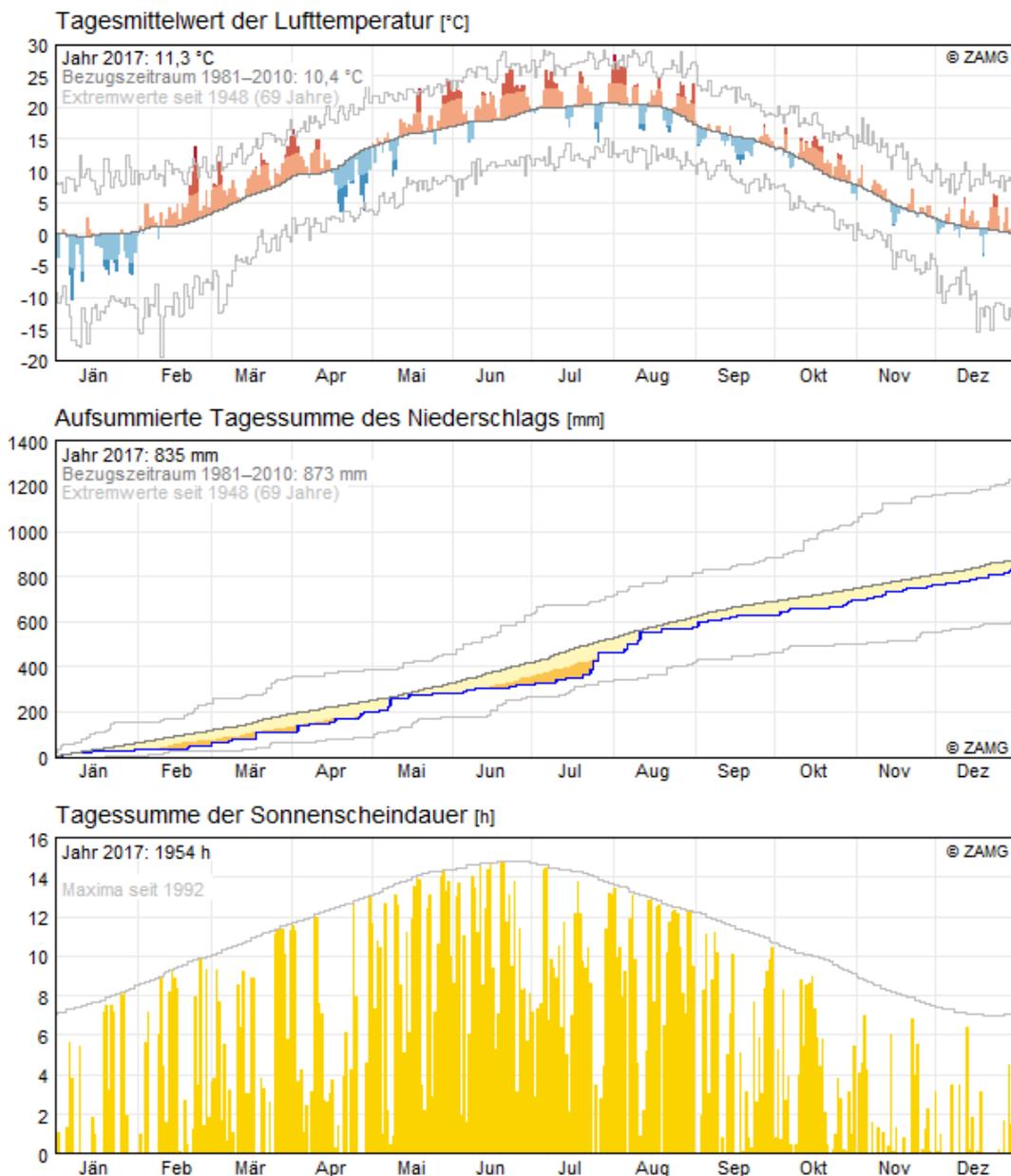


Abb.025

<sup>77</sup> Vgl. Klima in Oberösterreich, 15.11.2017.

#### 4.1.2) Wirtschaft

Oberösterreich gilt als die führende Industrieregion von Österreich, welches sich durch eine hohe wirtschaftliche Stabilität auszeichnet. Hier angesiedelte namhafte Unternehmen zeigen die Wettbewerbsstärke des Standorts und führen in der Gesellschaft zu einem steigenden Beschäftigungswachstum und niedrigen Arbeitslosenzahlen. Der Standort bietet auf Grund des hohen Angebots an gut ausgebildeten Fachkräften und intakten Umweltbedingungen ideale Rahmenbedingungen für Unternehmen und Investoren.<sup>78</sup>

Vor allem in den letzten Jahren holte Oberösterreich zu den führenden Industrieregionen Europas (Oberbayern DE, Noord Brabant NL, Chesire UK, Leicestershire UK) auf und bewegt sich in manchen Punkten sogar auf Augenhöhe.<sup>79</sup>

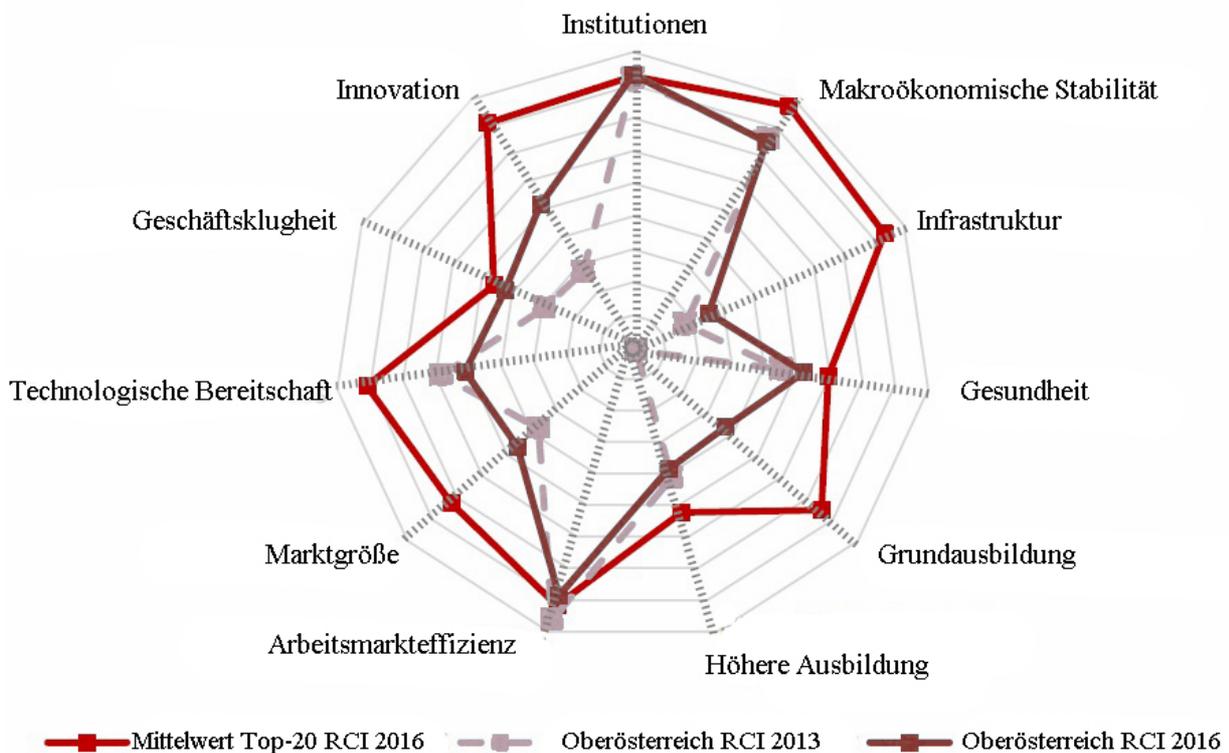


Abb.026

Insbesondere produzierende Unternehmen verleihen dem "Land ob der Enns", wie die historische Namensgebung des Bundeslands lautet, seine hohe wirtschaftliche Stärke. Die Unternehmen

<sup>78</sup> Vgl. Wirtschaftsstandort Oberösterreich, 06.11.2017.

<sup>79</sup> Vgl. Erfolgsfaktor digitale Transformation, 15.11.2017.

Oberösterreichs erwirtschaften in etwa ein Viertel der Industrieproduktion und der Exporte des Landes, weshalb der Standort die Führungsposition im Industriesektor Österreichs einnimmt.<sup>80</sup> Strukturell wird diese Leistung von großen Konzernen und Leitunternehmen, aber auch durch viele Klein- und Mittelunternehmen (KMU) erbracht. Besonders die sogenannten KMU, konnten sich in Nischen spezialisieren und positionierten sich so oftmals als weltweit anerkannte bzw. führende Unternehmen in Ihrem Bereich. Dies betrifft auch das Unternehmen, welches in der Masterarbeit bearbeitet wird und seinen Produktionsstandort in Oberösterreich erweitern möchte.<sup>81</sup>

#### 4.1.2.1) Forst- und Holzwirtschaft

Da in etwa 42 Prozent der Fläche des Bundeslandes bewaldet ist, trägt die Forst- und Holzwirtschaft zur wirtschaftlichen Stärke des Landes bei und ist zugleich ein prägendes Element der oberösterreichischen Natur- und Kulturlandschaft. Neben der Produktion des Rohstoffes Holz, stellen auch alle nachgelagerten Produktionen einen wichtigen Wirtschaftsfaktor für die Region dar. Der Rohstoff Holz dient als Grundmaterial für viele Produkte, dessen Bandbreite von großen Bauteilen wie Leimbinder bis hin zu kleinen Pellets, welche zu Heizzwecken genutzt werden, reicht.<sup>82</sup>

Im Fall der Masterarbeit bedient sich das Unternehmen ebenfalls an diesem wertvollen Rohstoff und verwendet regional gewonnenes Schnittholz zur Herstellung seiner Produkte, was in weiterer Folge im Produktionsprozess erläutert wird.

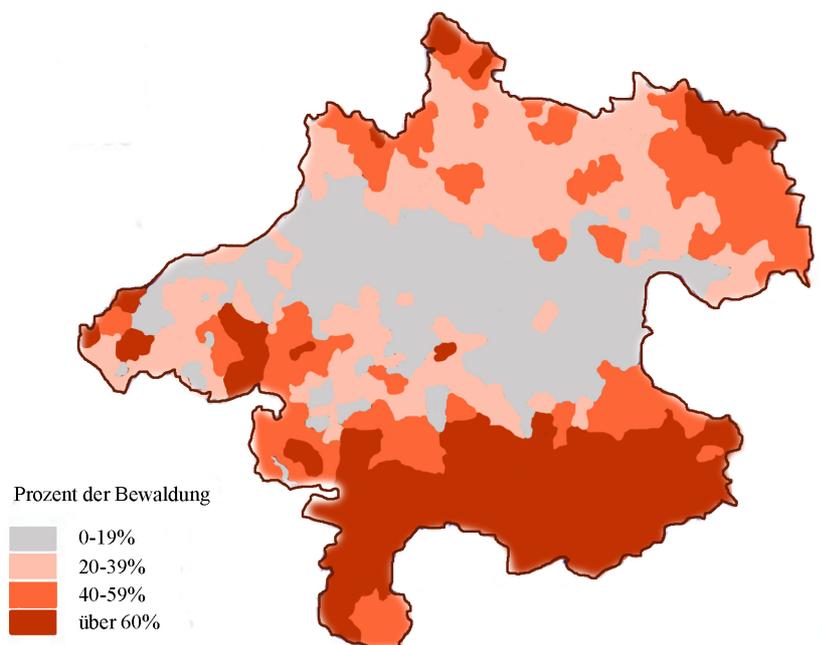


Abb.027

<sup>80</sup> Vgl. Wirtschaftsstandort Oberösterreich, 06.11.2017.

<sup>81</sup> Vgl. Wirtschaftsstandort Oberösterreich, 06.11.2017.

<sup>82</sup> Vgl. Forstwirtschaft, 15.11.2017.

### 4.1.3) Infrastruktur

Die zentrale Lage in Österreich gepaart mit den Grenzen zu Bayern und Tschechien macht die Infrastruktur von Oberösterreich zu einem vorteilhaften Produktions- und Logistikstandort. Aus diesem Grund wurde vor allem in den Infrastrukturbereich stark investiert um den Anschluss an die Top Industrieregionen Europas nicht zu verlieren. Vor allem mit den Autobahnanschlüssen an die Westautobahn (A1), der Mühlkreis- (A7), Innkreis- (A8) und Pyhrnautobahn (A9) ist Oberösterreich Verkehrstechnisch sehr gut aufgestellt. Aber auch durch die Westbahn, groß ausgebaute Eisenbahnterminals und den drei Donauhäfen bietet die Lage zusätzlich eine gute Zug- bzw. Schifffahrtsinfrastruktur. <sup>83</sup>

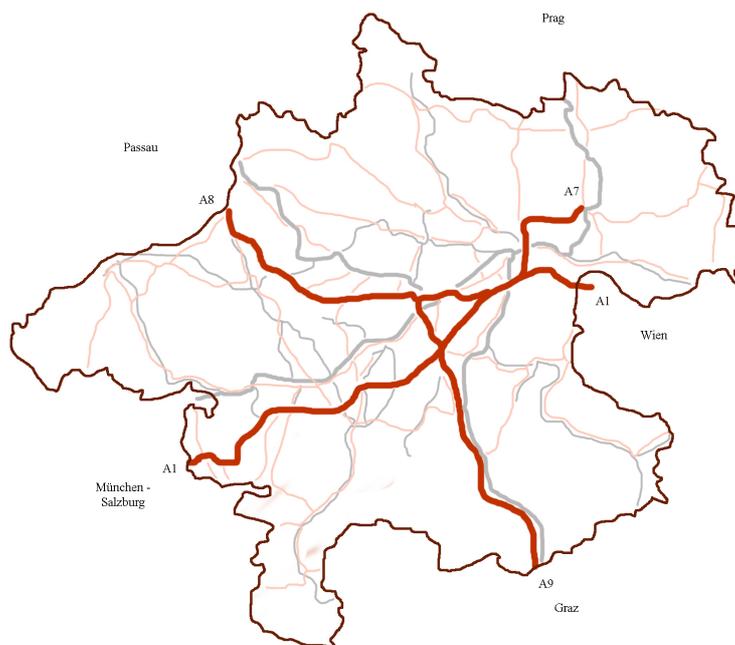


Abb.028

<sup>83</sup> Vgl. Wirtschaftsstandort Oberösterreich, 06.11.2017.

## 4.2) Arbeitswelt 4.0

Da das Unternehmen stets von einer innovativen Produktion geprägt wurde, möchte es mit der Standorterweiterung auch seine Ambitionen in Richtung Industrie 4.0 nach außen hin sichtbar machen.

Der Neubau der Produktionshalle hat aus architektonischer Sicht die Anforderung, eine durchgängig erlebbare Vernetzung von Mensch und Maschine, zu repräsentieren. Die Interaktion bzw. die Vernetzung von Mensch und Maschine findet in den herkömmlichen Industriebauten in sehr geringem Maße statt. Ein Großteil der vom Menschen verrichteten Arbeit passiert in einem, von der Produktion, getrennten Bürobau, welcher meist auch die repräsentative Funktion des Unternehmens übernimmt.

*„Das Erkennungszeichen der modernen Fabrik ist nicht der rauchende Schlot, sondern eine durch Funktion definierte Hightech-Ästhetik, die die Anpassungsfähigkeit des Unternehmens an seine Märkte zum Ausdruck bringt.“ IE Group, Zürich<sup>84</sup>*

Die eigentliche Produktion, was das Kernthema dieser Unternehmen ist, versteckt sich in oftmals in biedereren Hallen in der zweiten Reihe. Diese Hallen werden durch einen hohen Grad an Standardisierung, schnell und in der Herstellung kostengünstig errichtet. Diese Baukörper könnten, wenn sie individuell auf die Anforderungen des Unternehmens angepasst wären, durch Energieeffizienz nicht nur über den gesamten Lebenszyklus hinweg betrachtet, sondern auch in kürzeren Abständen die Baukosten amortisieren. Die Architektur muss sich als energieeffiziente Maschine in das System eingliedern und somit selbst zum Teil der Vernetzung werden. Dies bedeutet, die gängige Bauweise produzierender Unternehmen, neu zu denken.

Derzeit wird der bauliche Körper der Produktion von jenem Baukörper der Bürotätigkeiten, Administration, Forschung und Entwicklung getrennt. In Bauten, welche Know-How Vorsprünge, eine innovative Produktion und die Industrie 4.0 verkörpern sollen, müssen die getrennten Bereiche (Produktion und Büro), auch in Anbetracht dessen, dass auf den Menschen in der Industrie 4.0 neue Aufgaben zukommen, zusammengeführt werden. Der Mehrwert einer solchen Zusammenführung ist, dass hier das Gebäude selbst zu einer Form Maschine wird. Eine Maschine, welche auf die diversen Anforderungen nicht nur Rücksicht nimmt, sondern sich intelligent anpassen kann. Diese Anpassungsfähigkeit betrifft mehrere Ebenen wie zum Beispiel die Raumnutzung, Energieeffizienz, Material- und Personalströme. Ein sich selbst anpassender Industriebau wird nicht nur der immer höher werdenden Tendenz der Individualisierung der Produkte gerecht, sondern führt auch zu einer in hohem Maße energieeffizienten Produktion. Das Gebäude der Industrie 4.0 interagiert mit der sich stetig ändernden Produktion und der sich darin bewegenden Menschen.

---

<sup>84</sup> Vgl. Limacher, Wandlungsfähige Fabrik, 04.08.2017.

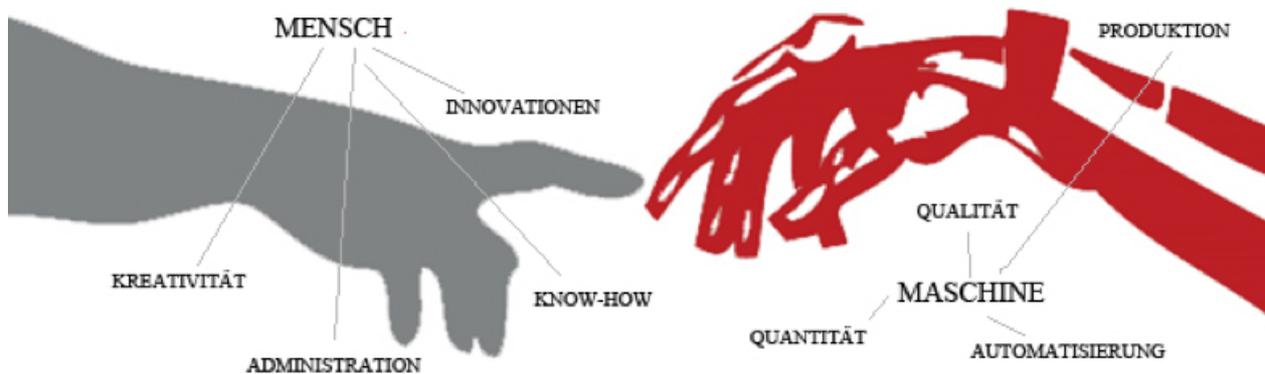


Abb.029

Die Mensch Maschine Interaktion, hat sich über die verschiedenen industriellen Revolutionen hinweg, stark verändert. In einer zum Großteil automatisierten Produktion, soll der Mensch so wenig wie möglich Werkstücke bzw. Werkzeug in den Händen halten. Die Masse an Arbeitern, welche zur Zeit des Fließbandes noch in Fabrikgebäuden tätig waren, werden in der Industrie 4.0 anderen Aufgaben zugeteilt. Mit diesem Phänomen, der sich stark verändernden Arbeitswelt, beschäftigen sich derzeit Soziologen rund um den Globus und sprechen hier von der Arbeitswelt 4.0. Für die Architektur bringt diese Veränderung ebenfalls viele Veränderungen mit sich. So haben Arbeiter in einem Fabrikgebäude der Industrie 4.0 eine komplett neue Aufgabenstellung und diese neue Rolle des Menschen im Produktionsprozess erfordert räumliche und organisatorische Konsequenzen. Das Herzstück eines jeden Industriebaus muss die eigentliche Produktion sein, warum diese auch für jeden Mitarbeiter greifbar beziehungsweise sichtbar sein muss.

#### 4.3) Produktion

Der Betrieb investierte vor allem in der kürzeren Vergangenheit in eine zunehmende Automatisierung der Logistik und der Produktion. Bereits jetzt arbeiten Roboter automatisiert im Bereich der Verpackung und Palettierung, jedoch sollen in der Erweiterung des Standorts weitere Maßnahmen getroffen werden, um kürzere Lieferzeiten und eine effizientere Produktion im Sinne der Industrie 4.0 zu verwirklichen. Deshalb gilt es bei der Produktionserweiterung, auch der Auswahl an Maschinen große Beachtung zu schenken, denn für diese gelten ebenfalls die Anforderungen hinsichtlich Automatisierung, Flexibilität und Wandelbarkeit eines zeitgemäßen Industriebaus. Sie sollten die parallele Bearbeitung unterschiedlicher Werkstücke ermöglichen, was durch den Einsatz neuester Technik möglich gemacht wird. Des Weiteren müssen sie sich leicht mit den weiteren Produktionsprozessen vernetzen lassen. Dem maßgeschneiderten Sondermaschinenbau eilt der Ruf höchster Produktivität voraus, kann als starres System jedoch nicht mit der Wandlungsfähigkeit von Modulbauweisen mithalten. Ziel muss es sein in Bauten für die Industrie 4.0 wandlungsfähige Maschinen zu verwenden, welche über den gesamten Lebenszyklus flexibel genutzt werden und entlasten neben zukünftige Investitionen und auch die Umwelt.

#### 4.3.1) Herstellungsprozess

Der Neubau wird im Grunde zwei verschiedene Produktionslinien, je nach Marktsituation bedarfsgerecht bedienen können, welche sich in eine Massivholz und eine MDF Linie aufteilen. Ziel ist es mit einem flexiblen und wandlungsfähigen Industriebau auf schwankende Nachfragen bzw. individuelle Aufträge reagieren zu können. Dies nicht nur mit verschiedenen Materiallinien, sondern auch mit der Möglichkeit andere Produkte herstellen zu können. Hierfür müssen auch wandlungsfähige Maschinen bzw. eine Modulbauweise gegeben sein. In diesem Fall sind neben dem Kerngeschäft der Herstellung von Holzleisten, ohne eine grundlegende Veränderung der Arbeitsschritte, folgende Tätigkeiten möglich:

- Profilieren von Leisten aller Art
- Fensterprofile vorbereiten
- Strukturhobeln Möbelfronten, Fußböden oder Fassaden
- Fasen der Palettenhölzer, welche es dem Stapler erleichtert Paletten aufzunehmen
- Konstruktionsvollholz vierseitig hobeln und fasen
- Hobeln von BSH-Lamellen

Die Produktion wird bei beiden Materiallinien in vier Arbeitsschritte gegliedert und ist im wesentlichen ein vollautomatisierter Prozess, in welchen die Mitarbeiter so wenig als möglich eingreifen sollen. Das bedeutet, dass die Rolle des Produktionsmitarbeiters in diesem Werk, sich von den konventionellen Betriebsstätten stark unterscheidet. Auf Grund modernster Maschinen, welche die Arbeitsschritte ohne menschliche Hilfe bewerkstelligen und einem automatisierten Konzept für die Intralogistik, haben die Mitarbeiter vor allem die Aufgabe der Qualitätssicherung und dem managen eines korrekten Ablaufs der Schnittstellen der Produktion bei Warenein- bzw. Ausgang. In weiterer Folge wird der Prozess des Kerngeschäfts erläutert:

##### **Arbeitsschritt 1: Anlieferung Rohmaterial / Lager-Wareneingang**

Grundlage einer jeden Produktion ist die Anlieferung bzw. die Lagerung des Rohmaterials. In diesem Fall wird Schnittholz für die Linie Massivholz, bzw. MDF-Platten für die Linie MDF angeliefert und in den jeweiligen Lagerbereichen untergebracht.

Auf Grund des Sustainable Supply Chain Managements, welches das Unternehmen verfolgt, wird das Rohmaterial mit möglichst kurzen Wegen aus der Region bezogen. Konkret bedeutet das, dass das Schnittholz bzw. das MDF aus der waldreichen Region südlich des Betriebsstandorts angeliefert wird.

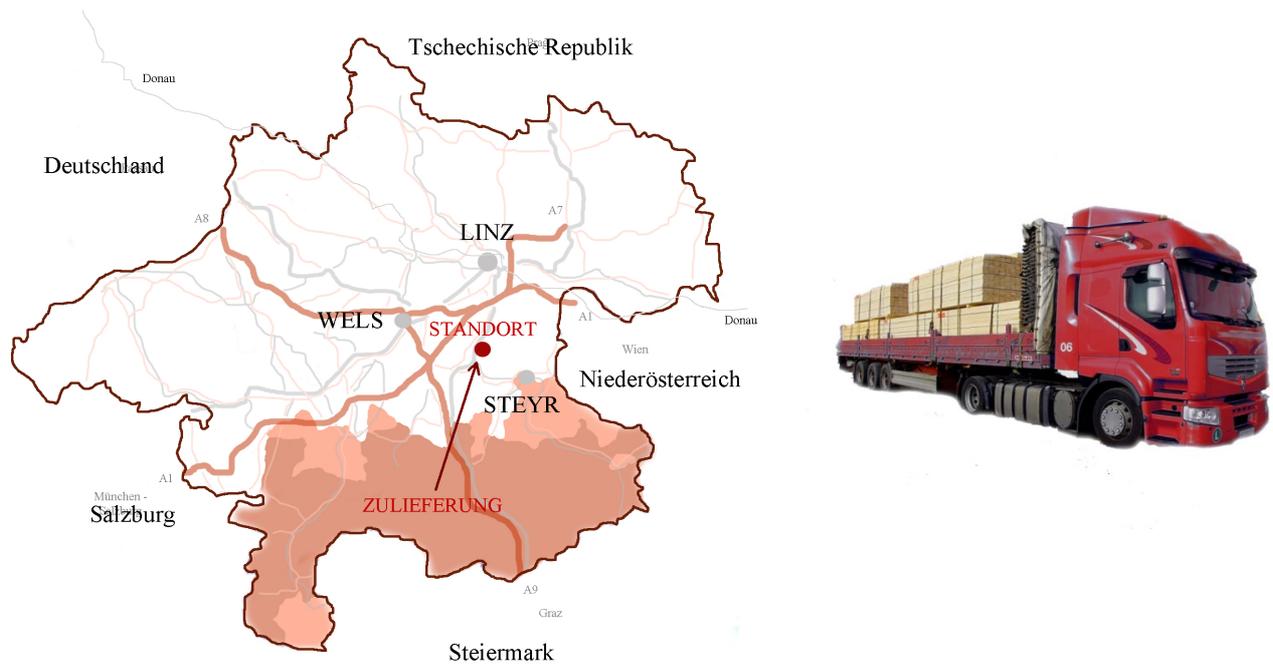


Abb.030

## Arbeitsschritt 2: Bereitstellung

- Linie Massivholz: Hier werden Paletten aus dem Verpackungslager und Schnittholz aus dem Holzlager entnommen und mit einer Kappsäge auf die fertige und standardisierte Leistenlänge von 2,4m gekürzt. Mit dem Kappen des angelieferten Schnittholzes wird die automatisierte Produktion gestartet. Die dafür notwendige Kappsäge ist mit den anderen Produktionsmaschinen bzw. der Administration (menschlicher Part der Produktion) vernetzt. Die von der Administration ausgehenden Aufträge werden von den Maschinen erkannt und ein individueller Produktionsprozess gestartet, was bedeutet, dass eine hohe Anpassungsfähigkeit der Maschinen gegeben sein muss. Der Zuschnitt wird auf Paletten dem nächsten Arbeitsschritt bereitgestellt bzw. der Überschuss im Rohzuschnitt Lager zwischengelagert.



Abb.031

- Linie MDF: Hier werden ebenfalls Leerpaletten aus dem Verpackungslager und MDF-Platten aus dem Holz- bzw. Plattenlager entnommen und für den nächsten Arbeitsschritt automatisiert bereitgestellt. Dies soll bei beiden Produktionsarten durch sogenannte Fahrerlose Transportsysteme vollautomatisiert möglich sein. Der Vorteil ist, dass eine fest installierte Fördertechnik die flexible Flächen- und Raumnutzung beeinträchtigen würde und das FTS mit seiner Umgebung (dem Gebäude) und den zu bedienenden Maschinen vernetzt arbeitet und so eine hohe Effizienz und Sicherheit garantiert.

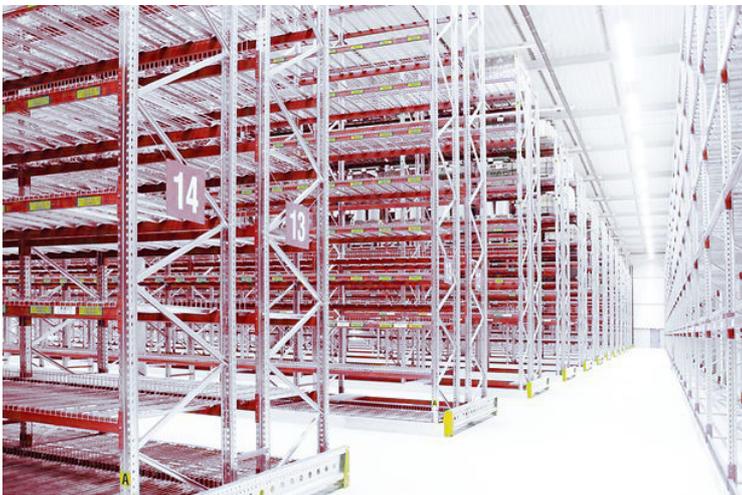


Abb.032

### **Arbeitsschritt 3: Hobeln / Form des Produkts herstellen**

Im nächsten Arbeitsschritt kommt eine wandelbare Maschine zum Einsatz, welche verschiedenste Produkte herstellen kann und so die immense Vielfalt der industriellen Holzbearbeitung abdecken kann. Dies ist für das Unternehmen von großer Bedeutung, da es hier auf verschiedene Marktsituationen ohne Umbaumaßnahmen reagieren kann.

- Linie Massivholz: Hier werden die bereitgestellten Leisten profiliert und somit Ihre endgültige Form hergestellt. Das fertige Produkt wird auf seine Qualität (z.B. Astanteil) untersucht und sortiert.
- Linie MDF: In diesem Schritt werden die Leisten profiliert bzw. ummantelt (z.B. lackiert) und stellen nach diesem Prozess ebenfalls das bereits fertige Produkt dar.



Abb.033

#### Arbeitsschritt 4: Bündeln / Palettieren

Bei beiden Produktionslinien werden die Hälfte der hergestellten Leisten gebündelt und im Logistikcenter gelagert und kommissioniert. Die andere Hälfte wird palettiert und im Kundenlager für den direkten Versand bereitgestellt.



Abb.034

#### 4.3.2) Intralogistik

Der manuelle Warentransport und Materialfluss innerhalb der Fabrikgebäude wird durch eine vollautomatisierte Intralogistik ersetzt. Fahrerlose Transportsysteme (FTS) werden immer häufiger zum Teil des Supply Chain Management und kommen vor allem westlichen Produktionsstandorten zu Gute, welche in einem harten Konkurrenzkampf mit Billiglohnländern stehen. Mit dem Sustainable Supply Chain Management wollen produzierende Unternehmen die Ressourcen der Materialflüsse der gesamten Wertschöpfungskette optimieren, indem vor allem auf die Herkunft, Nutzung und Entsorgung der Materialien Wert gelegt wird und so selbst die Energieeffizienz in der Produktion positiv beeinflussen kann. Für diese Optimierung ist eine intradisziplinäre Planung, in dessen Zentrum neben dem Logistikplaner auch der Architekt steht, notwendig. Lo-

gistikplaner arbeiten vermehrt an einer sogenannten virtuellen Logistik, welche die komplexen Lieferketten darstellt und analysiert. Der Architekt, kann mit seinen Daten basierend auf dem virtuellen Abbild einer Fabrik (Digitaler Zwilling), diesen Prozess des Sustainable Supply Chain Managements (SSCM) um ein vielfaches bereichern. Denn das BIM-Modell der Fabrik kann nicht nur für Analysen der Intralogistik eingesetzt werden, sondern auch mit dem Fahrerlosen Transportsystem (FTS) in weiterer Folge Echtzeitdaten während des Betriebs austauschen. Die Navigation der FTS haben einen Plan der Fabrik hinterlegt, welcher mittels scannen der Umgebung in Echtzeit abgeglichen wird. Die FTS bieten somit die größtmögliche Flexibilität, hinsichtlich sich stetig ändernder Transportwege auf Grund individueller Produkthanforderungen bis hin zu einer kompletten Layoutänderung.



Abb.035

#### 4.3.3) Maschinenliste

Die Maschinenliste wird in Zusammenarbeit von Prozessplanern und dem Bauherren erstellt und direkt vom Architekten übernommen, der diese wie im unten stehenden Grasshopper Skript ersichtlich, als Maschinenaufstellung in seinen Entwurfsprozess einarbeitet. Des weiteren verwenden andere Planer, wie zum Beispiel der Elektrotechniker die Daten der Leistung, um seine Anschlüsse zu auszulegen. Der Haustechniker beachtet etwaige Emissionen, welche auf die Lüftung und Kühlung des Baukörpers Einfluss nehmen. Diese Daten können auch mit Kosten verknüpft werden, um erste Konzepte der Betriebskosten zu erörtern und hier vorab Optimierungen zu treffen. Man erkennt bereits in diesem Schritt die Notwendigkeit, dass alle Planungsbeteiligten auf diese Daten Zugriff haben müssen um als interdisziplinäres Team Synergieeffekte zu nutzen um ein optimiertes Entwurfskonzept zu erstellen. Hierbei sind für die Erstellung der ersten Layouts, neben der Anzahl und Größe der Maschinen, auch die Material und Personalflüsse maßgebend, welche im nächsten Absatz dargestellt werden.

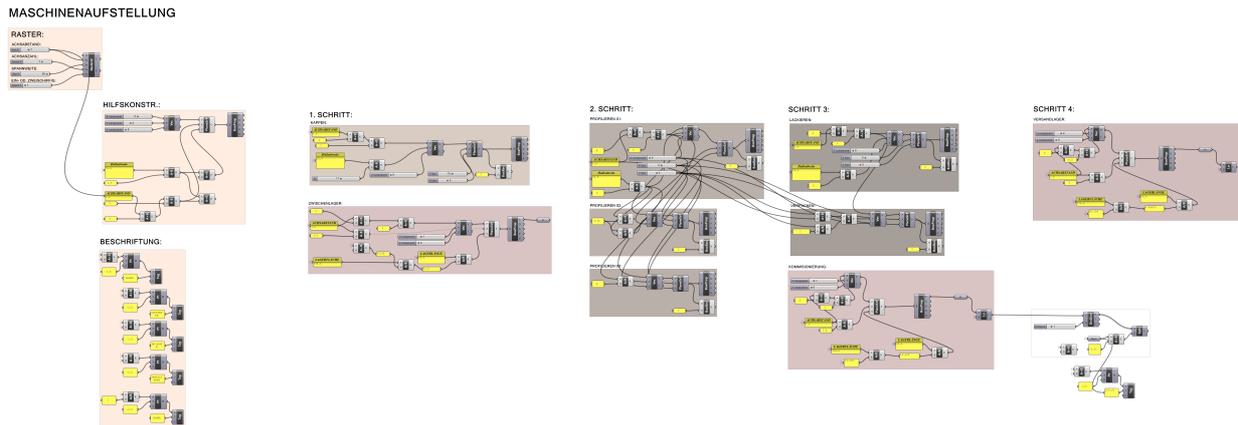


Abb.036

Funktion	Hersteller	An z.	Leistung	Ges.leistung	Volllaststunden	Verbrauch / a	Energiekosten / a
Kappsäge	Holtec	1	15 kW	15	3h/d - 900 300d/a	1350 0	
Hobelmaschine	Weinig	5	5,5 kW	27,5	270 0	9h/d - 7425 300d/a	0
Lackieranlage	Barberan	1	11 kW	11	270 0	9h/d - 2970 300d/a	0
Verpackungsanl.	Beck	1	4,5 kW	4,5	270 0	9h/d - 1215 300d/a	0
				58 kW		1296 kW 00 h	1944 0 €

Stromkosten:  
n: 0,15 €/kWh

#### 4.3.4) Materialfluss

Die Aufgabe des Architekten muss es nun sein, den Produktionsprozess in den des architektonischen Entwurfs einfließen zu lassen. Hierfür wird das Skript des des Algorithmic Modeling um die Parameter der Produktion erweitert, bzw. sollen über diese die Grundlagen für den Raumbedarf des Baukörpers definiert werden. Das Ergebnis soll ein über den Algorithmus strukturierter Baukörper sein, welcher sich über seine Material und Energieflüsse erlebbar macht.

Wie auch die grundlegenden Daten zur Produktion werden vorab vom Prozessplaner in Zusammenarbeit mit dem Bauherrn erstellt und dem Architekten für sein Grasshopper Skript in Form von Diagrammen zur Verfügung gestellt. In dem Projekt der Masterarbeit werden zwei Diagramme für die zuvor beschriebenen Produktionslinien als Basis dienen und in das Skript eingearbeitet, wobei das Hauptaugenmerk auf die Massivholzlinie gerichtet sein wird.

Linie-Massivholz Darstellung des Prozessplaners:

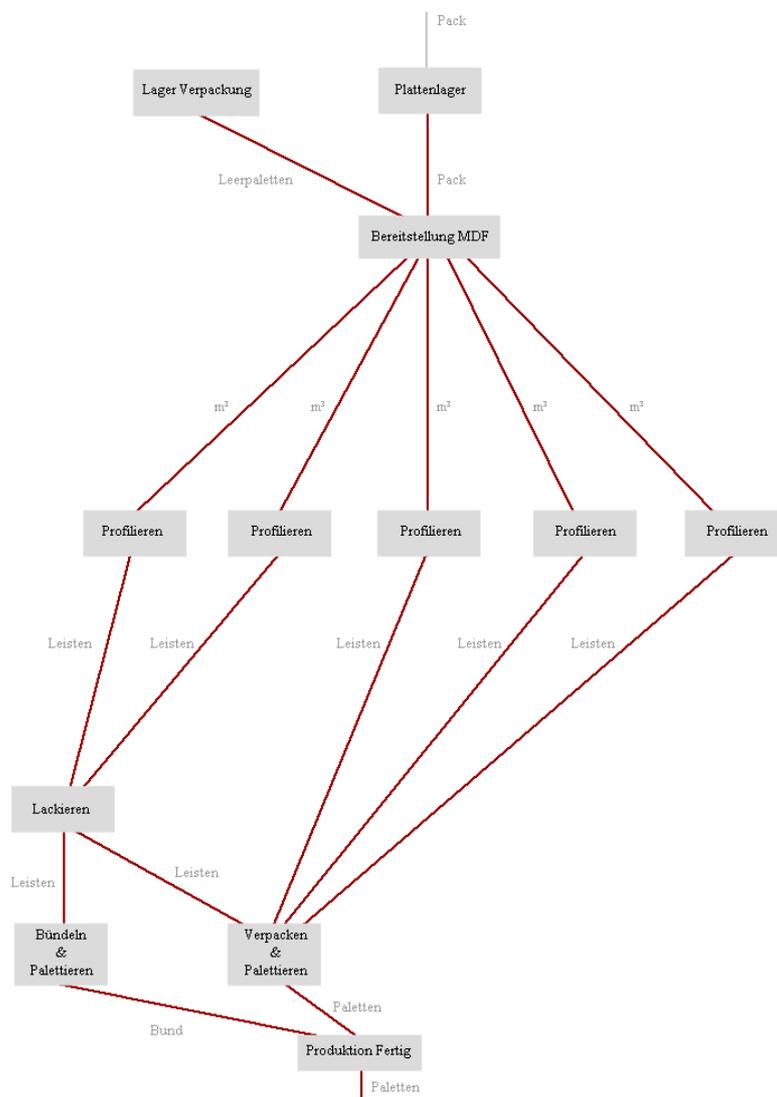


Abb.037

Linie-MDF Darstellung des Prozessplaners:

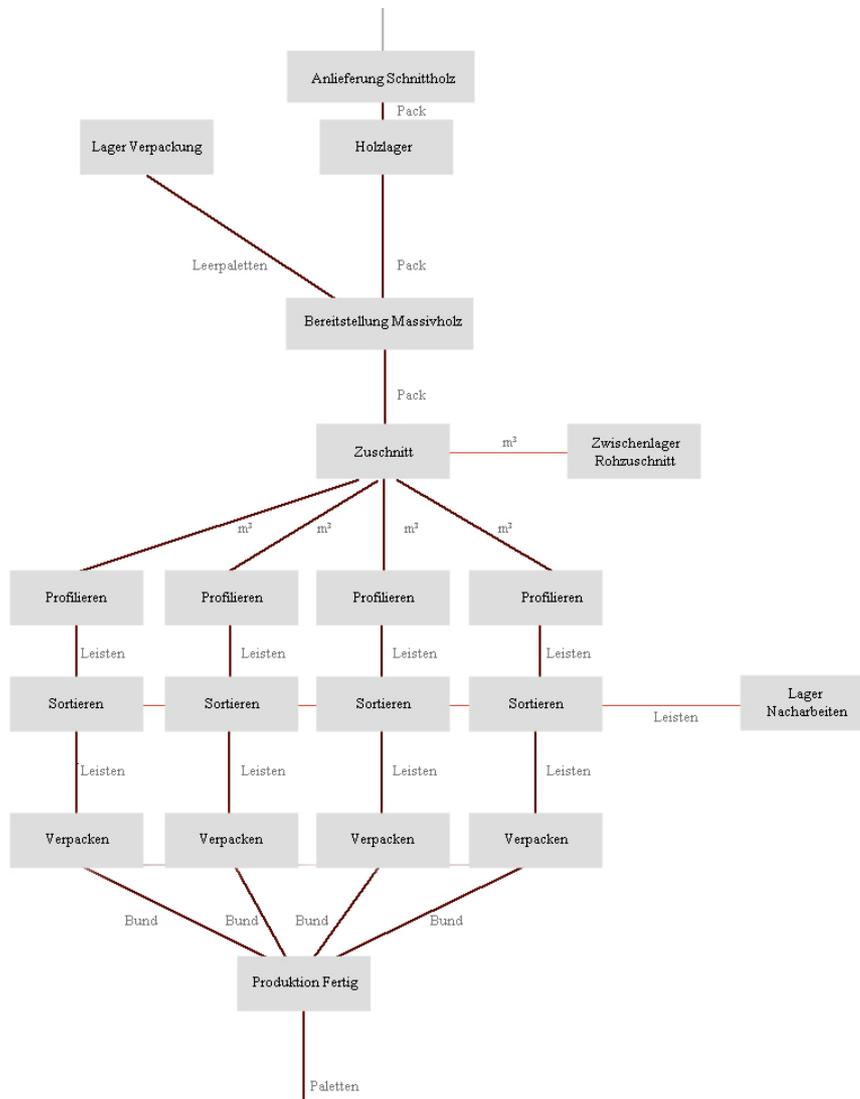


Abb.038

Die Abfolge bzw. die Vernetzung der einzelnen Objekte der Maschinenaufstellung wird in der Produktion als Materialfluss bezeichnet und ebenfalls in ein Grasshopper Skript übertragen. Die in der Grafik ersichtlichen Kreise zeigen die Bewegung des Materials und deren Größe soll die prozentuale Aufteilung dessen zwischen den jeweiligen Maschinen veranschaulichen.

Die zuvor im Produktionsablauf beschriebenen Arbeitsschritte der Massivholzlinie, wurden mit den Daten der Maschinenliste bzw. der Maschinenaufstellung und jenen Daten, welche aus den vom Prozessplaner entwickelten Diagrammen hervorgehen, in ein Grasshopper Skript übertragen. In weiterer Folge wird dies als Grundlage für den Raubedarf des Baukörpers herangezogen und mit dem eigentlichen Skript des Architekten vernetzt.

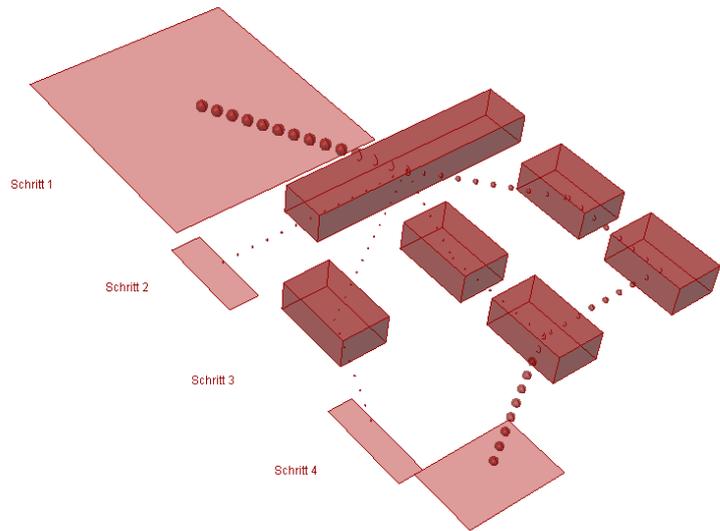
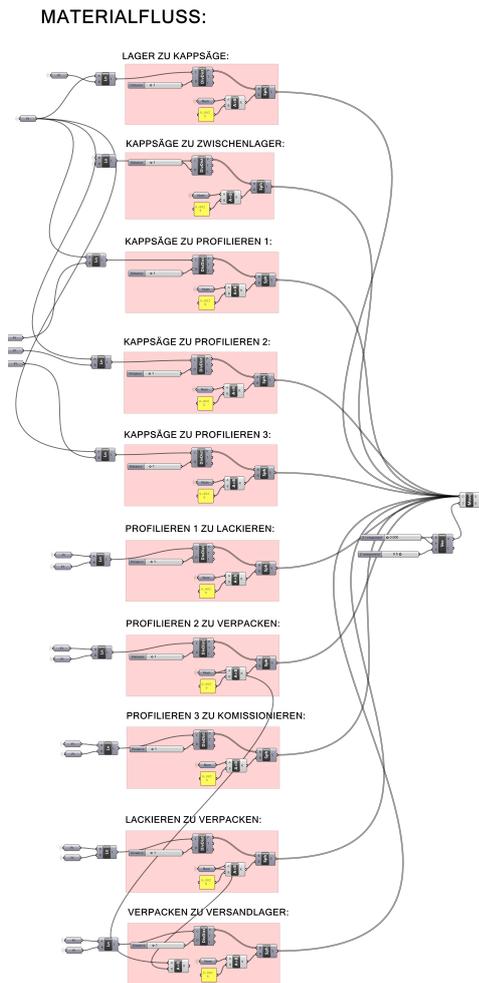


Abb.039

Um ein möglichst kompaktes Gebäude zu entwickeln, gilt es zuvor den parametrisierten und räumlich dargestellten Produktionsprozess, hinsichtlich Weglängen, Raumorganisation, Raumgrößen bzw. Volumen, zu optimieren. Der optimierte Raum, wirkt sich nämlich nicht nur durch die kürzeren Wegzeiten positiv auf eine Effizienzsteigerung der Produktion aus, sondern führt auch zu einem kompakteren Baukörper, welcher dadurch weniger Energie in der Herstellung und im Betrieb benötigt. So wurde durch die Vernetzung eine Variante mit nur drei Hobelmaschinen (Schritt 3) entwickelt, da der entwickelte Materialfluss die Maschinenauslastung dahingehend optimiert hat.

#### 4.4) Architektur & Raumorganisation

Die Raumorganisation wird in der Standorterweiterung davon geprägt sein, dass alle Tätigkeiten in direkter Verbindung zu der zum Großteil automatisierten Produktion stehen. Des Weiteren sollen alle Material, Personal und Energieflüsse im Baukörper transparent ersichtlich sein und auch hier wieder die Vernetzung von Mensch und der energieeffizienten Maschine, als welcher der Neubau gesehen wird, widerspiegeln. All diese Anforderungen, müssen in der Architektur der Baukörper der Industrie 4.0, erkennbar sein.



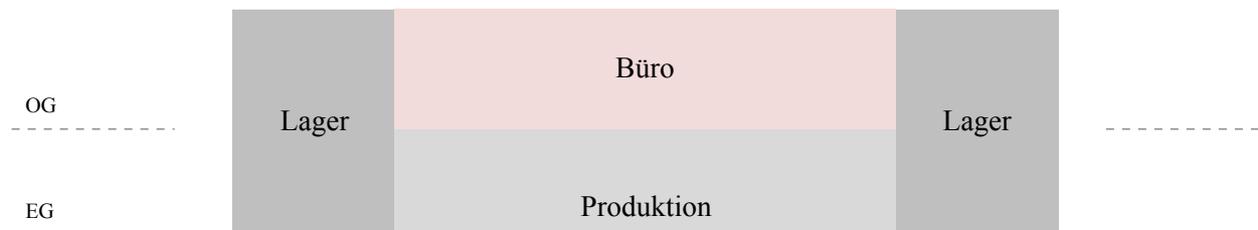
Abb.040

Eine freie bzw. anpassbare Raumorganisation soll die ständige Verbindung von Mensch und Maschine garantieren und genau diese Vernetzung muss repräsentativ nach außen und innen wirken. Eine freie Raumorganisation erfordert möglichst Stützenfreie Grundrisse, was dazu führt, dass eine Grundform des Baukörpers definiert wird. Diese Grundform, welche aus den Inneren Anforderungen der Produktion heraus entsteht soll nun, da sie auch als Hülle funktioniert, an die äußeren Einflüsse der Umwelt optimiert werden, indem sie in einem der ersten Schritte am Grundstück optimiert ausgerichtet wird.

In das positionierte Volumen wird nun das vollständige Raumprogramm der Standorterweiterung eingepflegt, wobei die benötigten Flächen und deren Vernetzung vorab definiert werden müssen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Industriebauten, bei denen eine Abfolge von Intralogistik, Produktion und Administration durch aneinander stehende Baukörper gekennzeichnet ist, sollen im Industriebau 4.0 diese stets miteinander vernetzten Bereiche zusammengeführt werden. Diese Art der architektonischen bzw. räumlichen Auffassung eines Industriebau 4.0, wird in weiterer Folge im Entwurfsprozess erläutert.

#### 4.4.1) Raumprogramm

Das Raumprogramm ergibt sich aus den bereits entwickelten Größen der Produktion und der Lagerflächen und den Anforderungen des Bauherren an die administrativen Tätigkeiten des Unternehmens im Baukörper (Büroflächen, Besprechungsräume, etc.), bzw. auch durch die notwendigen Flächen für die Technische Gebäudeausrüstung.



#### Erdgeschoß:

Funktion	Raum Name	Anzahl	Größe [m <sup>2</sup> ]	Beleuchtung		Heizen/Kühlen	
				spez. Leist. [W/m <sup>2</sup> ]	kW	spez. Leist. [W/m <sup>2</sup> ]	kW
Lager Eingang	Schnittholz	1		10	0		
	MDF	1		10	0		
	Paletten	1		10	0		
	Verpackung	1		10	0		
Produktion	Kappen	1		12	0		
	Zwischenlager	2		12	0		
	Profilieren	5		12	0		
	Lackieren	1		12	0		
	Verpacken	1		12	0		
Lager Ausgang	Versandbereitstell.	1		10	0		
	Kommissionieren	1		10	0		
TGA	Pelettieranlage	1		10	0		
	NSHV Raum	1	8	10	0		
	Kompressorraum	1	6	10	0		
	EDV + Server	1	6,4	10	0		
	Heizraum	1	10	10	0		

### 1.Obergeschoß:

Funktion	Raum		Beleuchtung		Heizen/Kühlen		
	Name	Anzahl	Größe	spez. Leist. [W/m <sup>2</sup> ]	h	spez. Leist. [W/m <sup>2</sup> ]	kW
Büro	Empfang	2		20	0		
	Technik & Vertrieb AP	10		20	0		
	GF Büro	1		20	0		
	Besprechungsraum	2		20	0		
	Kombizone (Drucker,...)	1		12	0		
	Teeküche	1		12	0		
	WC	1		10	0		

#### 4.4.2) Entwurfsparameter

Im Sinne einer transparenten Produktion und auch Intralogistik, welche repräsentativ für das Unternehmen der Industrie 4.0 ist, sollen diese Bereiche für Mitarbeiter und Kunden spürbar und erlebbar sein. Das Know How und der technische Fortschritt sollen selbstbewusst demonstriert werden und sich nicht in zweiter Reihe verstecken. Deshalb dient die Produktion als Basis des architektonischen Entwurfs und definiert die benötigten Flächen und Volumen des Industriebaus. Die folgende Abbildung zeigt die erste parametrische, in einem Grasshopper Skript erstellte, Abbildung des Produktionsprozesses mit der Vernetzung zu der sich dadurch resultierenden „bebauten Fläche“.

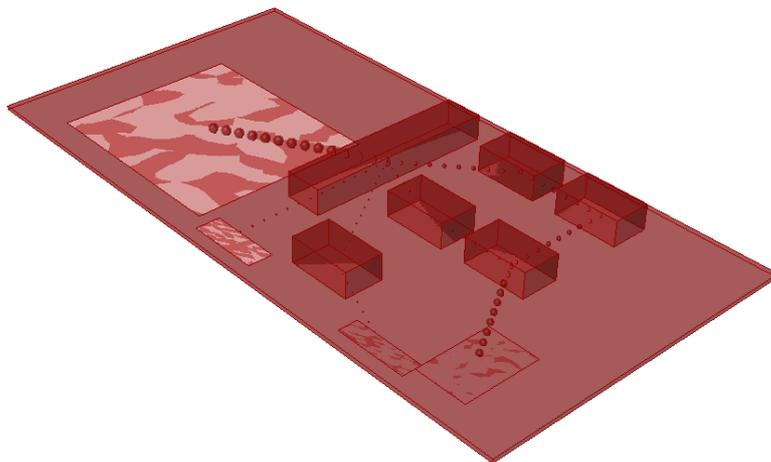


Abb.041

Die Grafik zeigt hellrote Flächen, welche den Raumbedarf für Lagertätigkeiten definiert, dunkelrote Flächen, welche die unterschiedliche Maschinen darstellen und Kreise die den Materialfluss symbolisieren. Da alle Elemente miteinander vernetzt sind, reagiert das Skript auf veränderte Produktionsabläufe. Im Grunde geht dieser simple Prozess von einem Lager aus, bei dem ein gewisser Prozentsatz des Materialbestands entnommen wird, um die ersten beiden Maschinen zu bedienen, welche den ersten Arbeitsschritt erledigen. Diese Maschinen können, wie oben ersichtlich, verschieden ausgelastet werden und so auf diverse Anforderungen individuell reagieren. Dadurch wurden sie wie zuvor beschrieben, vom Prozessplaner von den vormals fünf projektierten auf nur drei Maschinen optimiert. Im zweiten Schritt wird das eigentliche Produkt, auf Basis der Erzeugnisse des ersten Arbeitsschritts, gefertigt. Da hier jedoch nur eine Maschine zu Verfügung steht, kann das Produkt aus dem ersten Schritt zwischengelagert werden. Die aus dem Lager entnommene Menge des Materials definiert, neben den Parametern der möglichen Maschinenauslastung, auch die Größe des Zwischenlagers. Das Ende des Produktionsprozesses stellt der Schritt des Verpackens dar um die Erzeugnisse Versandfertig vorzubereiten.

Das Skript des Produktionsprozesses wird nun mit einer ebenso parametrischen bautechnischen Konstruktion vernetzt. Das hat zur Folge, dass man über die Vernetzung der bautechnischen Parameter die Flächen und Wege der Produktion beeinflussen bzw. optimieren kann und umgekehrt. Beginnend wird hierfür, eine im Industriebau konventionelle Hallenkonstruktion, als Referenzbaukörper verwendet, welche in weiterer Folge durch eine in der Masterthesis entwickelte Konstruktion optimiert wird.

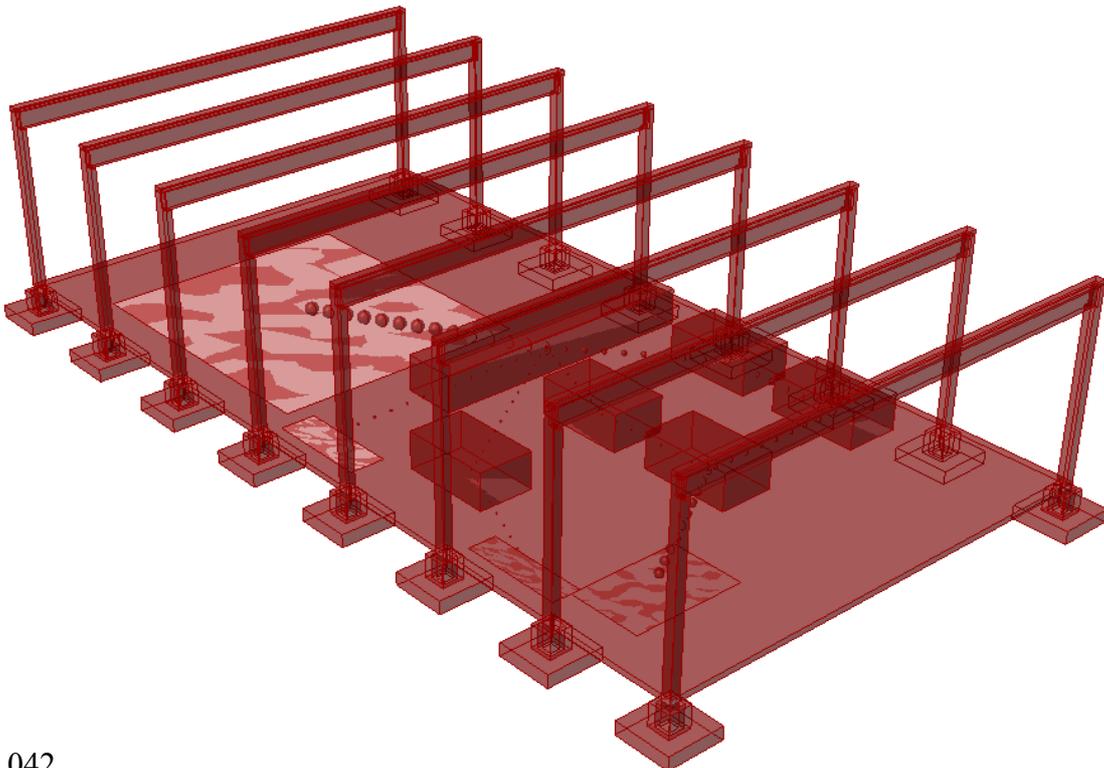


Abb.042

Grundlegend werden die internen Personal-, Material- und Energieflüsse zentral und auf kurzen Wegen zusammengefasst. Die Anordnung der Räume wird, hinsichtlich dieser Inneren und äußeren Flüsse optimiert werden. Ziel ist es in dieser wissenschaftlichen Arbeit eine Wandelbare Fabrik zu konstruieren, welche über eine intelligente Raumorganisation, auf Änderungen der Produktionsweise, wechselnde Anforderungen der Kunden und einer Tendenz zu stetig steigender Individualisierung der Produkte reagiert.

Zeitgemäße Fabriken müssen sich auf einen individuellen Produktionsprozess und einer damit verbundenen Steigerung der Auftragszahlen durch eine Variantenvielfalt schnell und flexibel anpassen lassen. Diese Individualität (Mass Customization) bedeutet für den Materialfluss der Produktion einen Mehraufwand, welcher vor allem durch den Einsatz von Automatisierungstechniken bewältigt werden soll. Ein weiterer Vorteil der wandelbaren Fabrik ist es, auch auf nicht vorhersehbare Ereignisse ad hoc reagieren zu können.

Dies bedeutet, dass die Intralogistik unterschiedlichste Produkte transportieren können muss, das Layout der Fabrik so flexibel sein muss, dass veränderte Materialflüsse keine Umbaumaßnahmen erfordern und sich die Energieflüsse an die veränderte Situation intelligent anpassen. Möglich wird eine solche Flexibilität durch eine Vernetzung der Maschinen und deren Fähigkeit miteinander zu kommunizieren. Der Mensch soll in diesen automatisierten Prozess so wenig wie möglich eingreifen und im Idealfall nur vorab den Auftrag zur Produktion erteilen und in weiterer Folge für Wartungszwecke eingreifen. Dies muss auch für mögliche Erweiterungsszenarien gelten bzw. muss auch beachtet werden, wie sich neue Systeme in den Bestand integrieren. Höhere Investmentkosten werden sich durch die Fähigkeit, sich flexibel und ohne Umbaumaßnahmen bzw. Produktionsstillstände auf neue Produktionsprozesse anpassen zu können, zeitnah amortisieren.

Die Herausforderung der Architektur liegt darin, die dafür notwendigen baulichen Umgebungsbedingungen, insbesondere dem flexiblen Layout, zu schaffen. Des Weiteren muss der Architekt die Rolle der Koordinierung der unterschiedlichen Fachplaner übernehmen, um der Idee eines intakten wandelbaren Fabriksystems zu garantieren.

Mit Hilfe des unten stehenden Grasshopper Skripts können verschiedenste Szenarien der Produktion vorab getestet werden und veranschaulicht in weiterer Folge das Prinzip der wandelbaren Fabrik, welche auf individuelle Produktionsanforderungen reagiert. So werden auf der nächsten Seite zwei unterschiedliche Fälle gezeigt, welche sich in Ihrem Materialbedarf und der Maschinenauslastung unterscheiden.

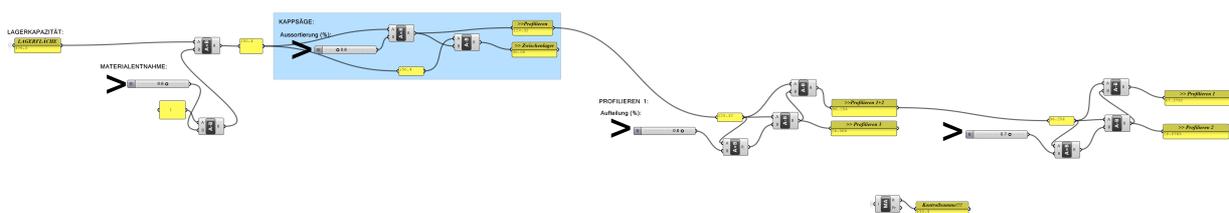


Abb.043

Produktionsbedarf Szenario 1:

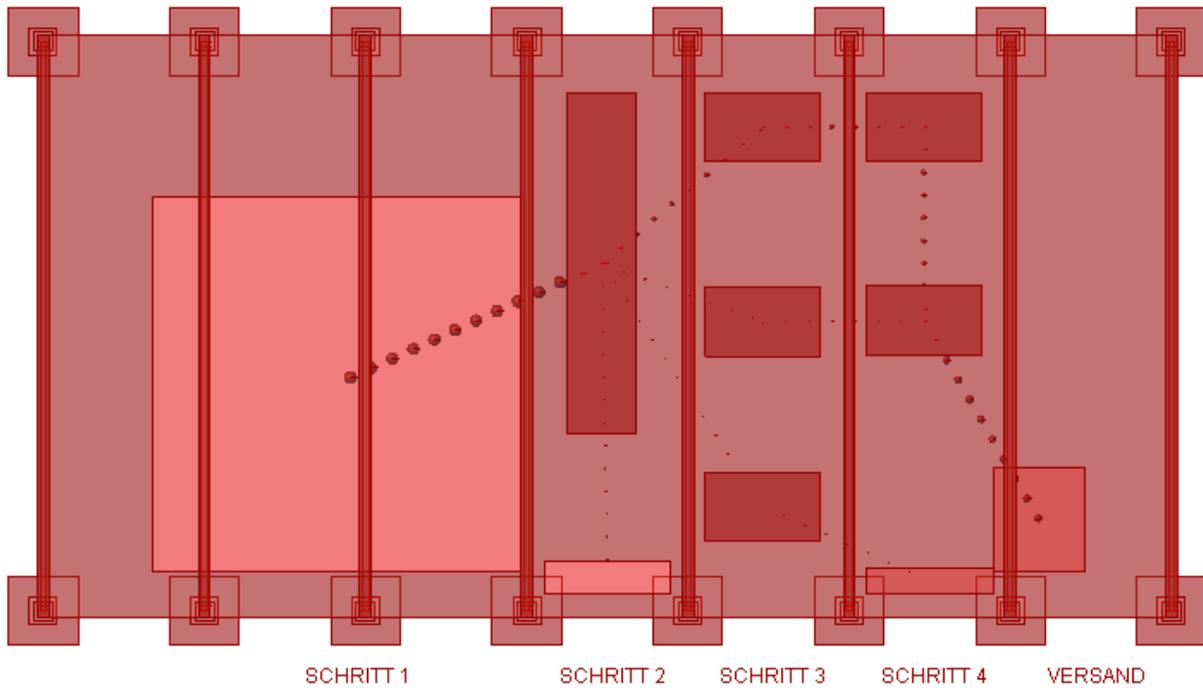


Abb.044

Produktionsbedarf Szenario 2:

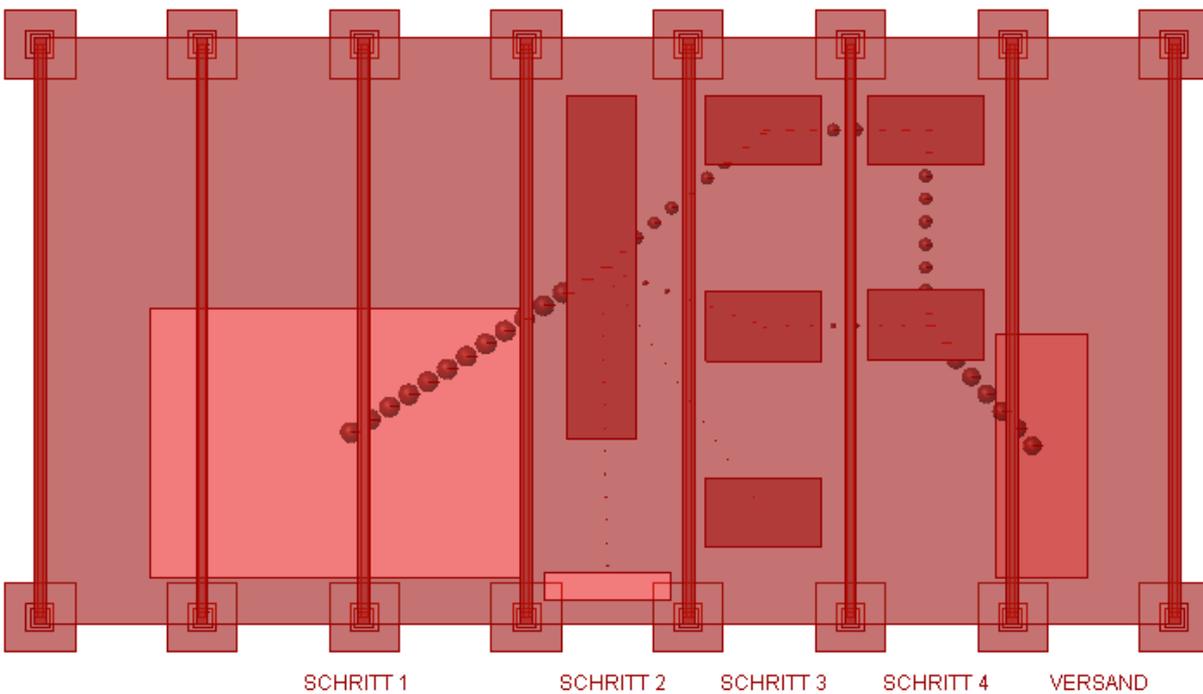


Abb.045

## 4.5) Konstruktion

Für die Konstruktion des Industriebaus kommen Algorithmen zum Einsatz, welche erste Planungsschritte automatisiert. Da in diesem Projekt ein Baukörper, für ein aus der Holzindustrie stammendes Unternehmen konzipiert wird, soll sich der Baustoff Holz auch in der Konstruktion wiederfinden. Die visuelle Präsenz des Baustoffs soll dazu beitragen, dass der Entwurfsgedanke einer ganzheitlichen Vernetzung von Produktion und Baukörper sichtbar wird. Grundsätzlich soll die gesamte Konstruktion die Vernetzung repräsentieren und nicht nur eine Einhausung der Produktion bewirken.

### 4.5.1) Konventionelle Bauweise

Wie bereits zuvor beschrieben wird der durch den Materialfluss bestimmte Raum um die konstruktive Komponente erweitert, welche als Grundlage mit einer konventionellen Lösung dargestellt wird. Das Tragwerk orientiert sich an jenen Konstruktionen, welche sich im Industriebau als Standard etabliert haben. Konkret bedeutet das, dass der Raum mit einer Stützen – Binder Konstruktion aus Stahlbeton überspannt wird und die Kraftableitung in Köcherfundamenten mündet. Raumabschließend kommen im Sockelbereich Frostschrüzen (kerngedämmte Stahlbeton Fertigteilelemente) und darüber PU-Wandpaneele zum Einsatz, bei denen Öffnungen für Belichtungsflächen freigehalten werden. Die Dachkonstruktion setzt sich aus Trapezblechen, einer Dampfsperre, einer EPS-Dämmung und PVC-Folien zusammen. Obwohl sich diese Bauweise im Industriebau zu einem Standard entwickelt hat, gibt es unzählige Punkte, welche Schwachstellen aufweisen und werden deshalb im Fall der Masterarbeit komplett überarbeitet, um eine Konstruktion zu entwickeln, welche dem Industriebau 4.0 gerecht wird. Dennoch soll die konventionelle Lösung als Grundlage dargestellt werden, um auf einen Referenzkörper zurückgreifen zu können, aus dem Vergleichswerte entnommen werden, bzw. um die Notwendigkeit zu unterstreichen, welche es erfordert den konventionellen Industriebau zu überdenken.

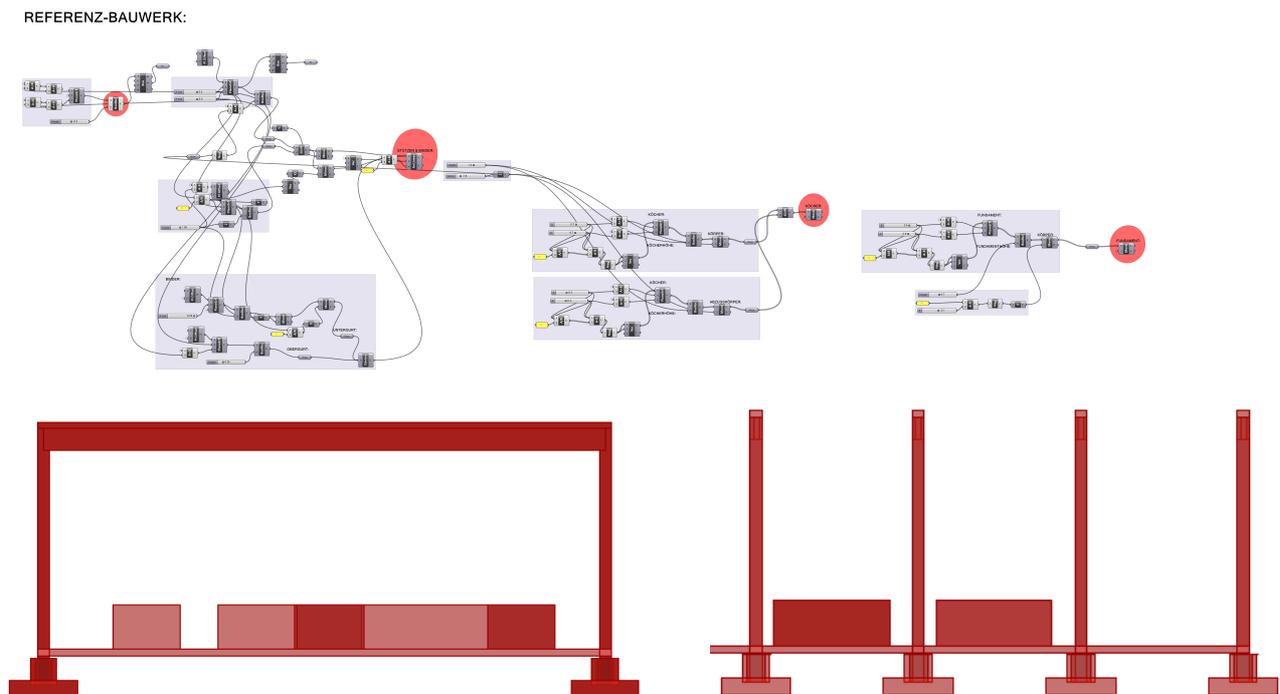


Abb.046

Der Fassadenschnitt des Referenzbaukörpers veranschaulicht die Vielzahl der einzelnen Bauteile, eines konventionellen Industriebaus. Diese Bauteile und Materialien werden in weiterer Folge im einzelnen beschrieben und analysiert.

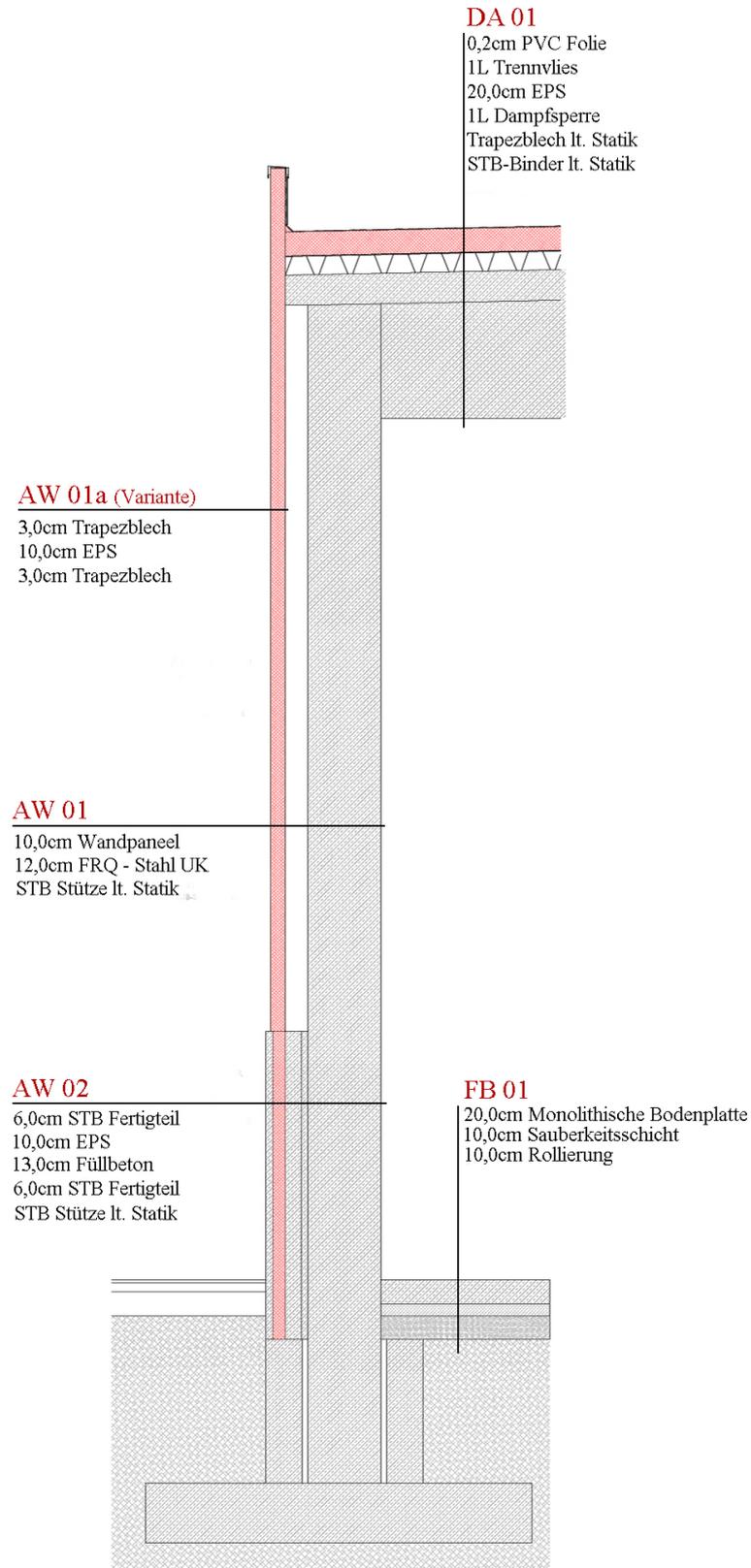


Abb.047

#### PU-Paneele:

Dieses Bauteil ist aus dem konventionellen Industriebau nicht mehr wegzudenken, da es sich auf Grund seiner wirtschaftlichen Systembauart als Gebäudehülle im Bereich Dach und Wand bewährt hat. Das auch als Sandwichpaneel bezeichnete Bauteil besteht aus Stahlblechen mit einer dazwischen liegenden Schicht aus Polyurethan Hartschaum, ein Produkt das auf die fossile Erdölproduktion zurückgreift. Des Weiteren ist zu beachten, dass im Brandfall giftige Gase austreten können. Über den gesamten Lebenszyklus zeigt sich ein hoher Energieaufwand in der Herstellung (graue Energie) der Dämmschicht und der Stahlbleche, jedoch ist positiv anzumerken, dass beide Elemente in mehreren Varianten wiederverwertet werden können.<sup>85</sup>

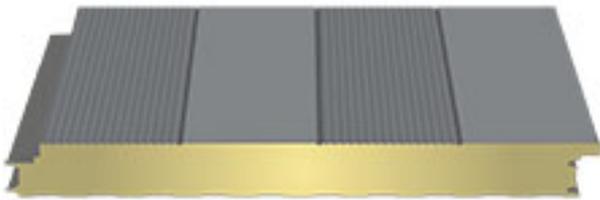


Abb.048

#### EPS-Dämmung:

Dieser Dämmstoff ist nach Mineralwolle die am häufigsten verwendete Art, mit dem ein Gebäude gedämmt wird. Das PS steht für Polystyrol, welches der Hauptbestandteil dieses Baustoffs ist und als Kunststoff ebenfalls seinen Ursprung in der Erdölproduktion hat. Wenn man das Volumen und die wärmedämmende Wirkung der Platten betrachtet, nehmen die luftgefüllten Poren den größten Anteil ein, worauf auch die Bezeichnung expandiertes Polystyrol (EPS) rückzuführen ist. Ursprünglich wurde dieses Bauteil im Jahr 1951 von der Firma BASF mit dem Eigennamen Styropor eingeführt, weshalb diese Bezeichnung heute auch noch häufig umgangssprachlich verwendet wird.<sup>86</sup>



Abb.049

---

<sup>85</sup> Vgl. Brucha Paneel, 30.10.2017.

<sup>86</sup> Vgl. Expandierter Polystyrolschaum (EPS), 10.11.2017.

### Stahlbeton:

Stahlbeton ist ein Verbundwerkstoff, bei dem die Komponente Zement des Betons für die Verbindung mit den Rippen des Bewehrungsstahls verantwortlich ist. Der Energieaufwand bei der Herstellung ist im Wesentlichen vom Zementanteil und dem Armierungsgrad abhängig. Die Vorteile einer hohen Druckfestigkeit, der hohen Speichermasse, der beliebigen Formbarkeit, einem guten Schall-, Brand- und Feuchteschutz, stehen den Nachteilen einer schlechten Wärmedämmung, dem Alterungsprozess, dem schlechten CO<sub>2</sub> Fußabdruck und der Tatsache gegenüber, dass es ein Verbundbaustoff ist, gegenüber.<sup>87</sup>

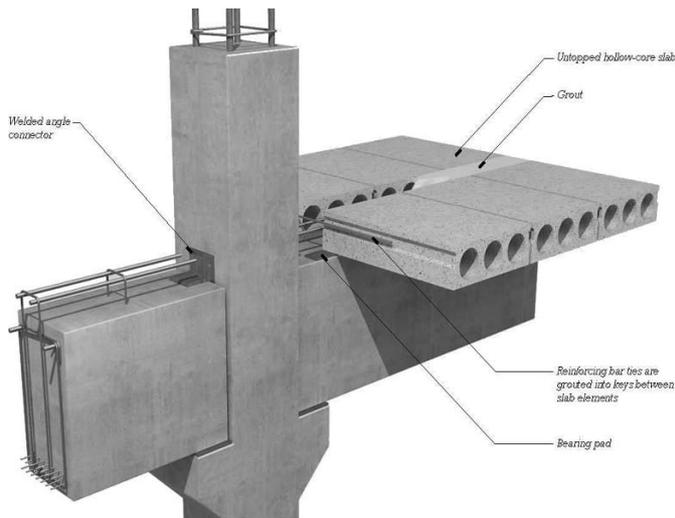


Abb.050

### Stahlkonstruktionen:

Stahlkonstruktionen und hier insbesondere das Trapezblech besticht durch seine einfache Form, welche unter geringen Materialaufwand eine hohe Tragfähigkeit, abhängig von den Profilhöhen, erreicht. Stahlkonstruktionen weisen in der Herstellung den höchsten Energieaufwand, inkl. einem hohen CO<sub>2</sub> Fußabdruck, aller Baustoffe auf und können nur durch eine maximierte Wirkung unter geringstmöglichen Materialaufwand effizient sein.<sup>88</sup>



Abb.051

<sup>87</sup> Vgl. Fertigteilbeton, 10.11.2017.

<sup>88</sup> Vgl. Stahl, 10.11.2017.

#### 4.5.2) Graue Energie

Wie eingangs in der Masterthesis beschrieben, ist die Bauindustrie der größte Verbraucher aller Industriezweige hinsichtlich Materialien, Energie und der produzierten Abfälle. Deshalb wird hier, vor allem durch die politischen Zielsetzungen der letzten Jahre, mehr Effizienz gefordert.

Da der allseits bekannte Energieausweis im Wesentlichen auf den Energieverbrauch während des Betriebs hinweist, wird keine Aussage über die dafür notwendige Energie in der Herstellung des Gebäudes getroffen. Ein guter Wert des Heizwärmebedarfs muss nicht gleich bedeuten, dass ein Bauwerk über den gesamten Lebenszyklus hinweg als nachhaltig betrachtet werden kann. Aus diesem Grund wird zukünftig auf die Auswahl der Baustoffe eine immer größere Bedeutung zukommen, wenn man ein ganzheitliches Energie- und Ressourcenschonendes Projekt verwirklichen möchte. Der „versteckte“ Energieaufwand, welcher in der Herstellung der Konstruktionen liegt, wird auch als Graue Energie bezeichnet. Außerdem muss man bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von Industriebauten, welche zwischen 25 und 40 Jahren liegt, an jene Zeit der Wiederverwertbarkeit der Materialien denken.<sup>89</sup>

Dies wird als Ansatz des sogenannten Cradle-to-Cradle (von der Wiege zur Wiege) bezeichnet und soll einen Kreislauf aller im Bau verwendeten Materialien ermöglichen.<sup>90</sup>

Die oben beschriebenen Punkte fließen in die sogenannte Ökobilanz (LCA – Life Cycle Assessment)<sup>91</sup> eines Gebäudes ein, welche eine Aussage über den gesamten Lebenszyklus hinsichtlich Ressourcen- und Energiebedarf, bzw. den damit verbundenen Umwelteinwirkungen liefert. Es wurden von der „Projektplattform Energie“ an der TU München, in einem Leitfaden, die sogenannten Ökologischen Eigenschaften definiert und diese sind wie folgt aufgliedert:<sup>92</sup>

- Energiebedarf für Herstellung, Transport und Entsorgung
- Schadstoffabgabe bei Herstellung, Verarbeitung, Gebrauch und Entsorgung
- Verwendung von Recyclingmaterial
- Lebensdauer, Reparaturfreundlichkeit bzw. leichte und umweltfreundliche Erneuerbarkeit
- Wiederverwendbarkeit als Bauteil oder Werkstoff (Recyclingfähigkeit)
- Regionalität

---

<sup>89</sup> Vgl. Wirtschaftliche Nutzungsdauer von Gebäuden, 12.07.2017.

<sup>90</sup> Vgl. Schneider/Pfoh/Grimm, Projektplattform Energie - Leitfaden 01, 09.11.2017.

<sup>91</sup> Ebda

<sup>92</sup> Ebda

Die nachstehenden Tabellen weisen auf den Energiebedarf (Primärenergiegehalt nicht erneuerbar - PEI) diverser Baustoffe in der Herstellung (cradle-to-gate<sup>93</sup>) hin und weisen dadurch auf ein großes Potential zur Verbesserung konventioneller Bauweisen hin. Wenn man so zum Beispiel den Primärenergiegehalt von PU-Dämmplatten, mit jenem von einer Zellulose Einblasdämmung vergleicht, so hat die synthetische PU-Dämmung (PEI 2758 MJ/m<sup>3</sup>) einen 18,6 mal höheren Bedarf, als die organisch nachwachsende Zellulosedämmung (PEI 148 MJ/m<sup>3</sup>).

Beim analysieren dieser Tabellen erkennt man, das durch den Einsatz von regionalen, nachwachsenden Rohstoffen und einer minimierten Verwendung der Materialmengen, große Einsparungen im Energiebedarf getroffen werden können. In weiterer Folge werden diese Maßnahmen durch einen Vergleich des Referenzbaukörpers, mit jener Konstruktion verglichen, die im nachfolgenden Absatz entwickelt wird. <sup>94</sup>

---

<sup>93</sup> Vgl. Schneider/Pfoh/Grimm, Projektplattform Energie - Leitfaden 01, 09.11.2017.

<sup>94</sup> Ebda

Tabelle - Dämmungen<sup>95</sup>:

		Rohdichte	Primärenergiegehalt nicht erneuerbar		Wärmeleitfähigkeit	Diffusionswiderstandszahl
		$\rho$	PEI	PEI	$\lambda$	$\mu$
		kg/m <sup>3</sup>	MJ/m <sup>3</sup>	kWh/m <sup>3</sup>	W/(mK)	
anorganisch / mineralisch	Blähton Körnung	360	1974	548	0,16	3
	Perlite 0-3	90	672	187	0,06	3
	Blähglas Körnung	150	807	224	0,035 - 0,7	5
	Mineralwolle (Fassaden-Dämmung)	46	865	239	0,03 - 0,05	1
	Glaswolle	20-153	594 - 4544	165 - 1262	0,035 - 0,045	1/2
	Foamglas W+F	100	1525	424	0,04 - 0,06	oo
	Steinwolle	22-200	717 - 5616	199 - 1560	0,035 - 0,045	1/2
organisch / synthetisch	XPS Dämmstoff	32	3059	850	0,025 - 0,054	80/250
	PU-Dämmplatte, Blockschaum	40	2758	766	0,02 - 0,04	30/100
	EPS W/D 0,35-IVH	35	1837	510	0,029 - 0,05	20/100
	EPS PS 25	25	2386	663	0,029 - 0,05	20/100
organisch / nachwachsend	Holzfaserdämmplatte Mix (Trockenverfahren)	60	1922	534	0,04 - 0,055	3/5
	Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)	200	2026	563	0,04 - 0,055	3/5
	Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff	45	148	41	0,04 - 0,045	2/2
	Zellulosefaserplatten	80	2121	589	0,04	2/2
	Expandierter Kork	100	999	277	0,04 - 0,055	5/10

<sup>95</sup> Vgl. Schneider/Pfoh/Grimm, Projektplattform Energie - Leitfaden 01, 09.11.2017.

Tabelle - Mineralische Baustoffe <sup>96</sup>:

		Rohdichte	Primärenergiegehalt nicht erneuerbar		Wärmeleitfähigkeit	Diffusionswiderstandszahl
		$\rho$	PEI	PEI	$\lambda$	$\mu$
		kg/m <sup>3</sup>	MJ/m <sup>3</sup>	kWh/m <sup>3</sup>	W/(mK)	
Ziegel	Mauerziegel Durchschnitt, Poroton	740	1181	328	0,14	5 / 10
	Perlitegefüllte Ziegel S, Poroton	800	1743	484	0,09 - 0,11	5 / 10
Porenbeton	Porenbeton P2 04 unbewehrt	380	1387	385	0,11	5 / 10
	Porenbeton P4 05 unbewehrt	472	2308	641	0,15	5 / 10
Kalksandstein	Kalksandstein Mix	2000	2483	690	1,1	15 / 25
Lehm	Lehmstein	1200	1440	400	0,47	5 / 10
	Stampflehmwand	2000	106	30	1,1	5 / 10
Beton	Transportbeton C20/25	2365	1133	315	2	80 / 130
	Beton- Mauersteine	2000	1365	379	1,35	70 / 150
	Bims- Leichtbeton Planstein Außenwand	500	744	207	0,15	5 / 15
	Blähton- Leichtbeton Planstein Außenwand	500	1882	523	0,16	5 / 15
	Betonfertigteil Decke	2520	5173	1437	2,5	80 / 130
	Betonfertigteil Wand	2427	2588	719	2,5	80 / 130
Glas	Glasbausteine	1800	34522	9589	0,58	oo
	Isolierglas 2- Scheiben	2500	53709	14919	0,8-1,1	oo
Gips	Gipskartonplatte	800	2987	830	0,25	4 / 10
	Gipsfaserplatte	1000	5505	1529	0,37	5 / 10

<sup>96</sup> Vgl. Schneider/Pfoh/Grimm, Projektplattform Energie - Leitfaden 01, 09.11.2017.

Tabelle - Holz <sup>97</sup>:

	Rohdichte	Primärenergiegehalt nicht erneuerbar		Wärmeleitfähigkeit	Diffusionswiderstandszahl
	$\rho$	PEI	PEI	$\lambda$	$\mu$
	kg/m <sup>3</sup>	MJ/m <sup>3</sup>	kWh/m <sup>3</sup>	W/(mK)	
Konstruktionsvollholz 15% Feuchte	529	4271	1186	0,13	50
Schnittholz Fichte (12 % Feuchte / 10,7 / H2O)	482	2741	762	0,12	50
Brettschichtholz Nadelholz	515	4966	1379	0,13	50
Sperrholzplatte	490	3293	915	0,14	70/200
Spanplatte	681,5	6465	1796	0,15	15/50
OSB (Durchschnitt) 5% Feuchte	650	5084	1412	0,13	50

Tabelle - Metalle <sup>98</sup>:

	Rohdichte	Primärenergiegehalt nicht erneuerbar		Wärmeleitfähigkeit	Diffusionswiderstandszahl
	$\rho$	PEI	PEI	$\lambda$	$\mu$
	kg/m <sup>3</sup>	MJ/m <sup>3</sup>	kWh/m <sup>3</sup>	W/(mK)	
Bewehrungsstahl	7800	79892	22192	50	oo
Stahlprofil	7800	231561	64323	50	oo
Stahl Feiblech	7800	233808	64947	50	oo
Edelstahlblech	7900	382918	106366	17/30	oo
Aluminiumblech	2800	396062	110017	160	oo
Kupferblech	8900	92715	25754	380	oo
Zinkblech	7100	336879	93577	110	oo
Messing-Bauteil	8400	177447	49291	120	oo

<sup>97</sup> Vgl. Schneider/Pfoh/Grimm, Projektplattform Energie - Leitfaden 01, 09.11.2017.

<sup>98</sup> Ebd.

### 4.5.3) Konstruktion des Industriebau 4.0

Für den Neubau eines zeitgemäßen Industriebau 4.0, der auf die eingangs beschriebenen Megatrends der Digitalisierung und der Energiewende, mit all ihren verbundenen Schlagwörtern wie zum Beispiel Nachhaltigkeit, Energieeffizienz, Mensch-Maschine Interaktion, Individualisierung, Vernetzung durch Internet der Dinge, usw. reagiert, muss eine Konstruktion entwickelt werden, welche über Synergieeffekte die einzelnen Punkte miteinander vernetzt und optimiert. Falwerke bieten die besten Voraussetzungen, diesen Punkten gerecht zu werden, was im nachfolgenden Absatz erläutert wird.

#### 4.5.3.1) Das Falwerk

Falwerke zählen zu den sogenannten räumlichen Tragwerken, welches auf Grund der Faltung von Körpern hohen Belastungen, auch bei dünnen Materialstärken standhält. Die Minimierung von Materialstärken ist für den Kontext eines Energie- und Ressourcenschonenden Baukörper von sehr großer Bedeutung.

Auf Grund der Formenvielfalt verschiedenster Faltungen, welche dem Ursprung nach auf einer sehr einfachen Technik beruhen, wird den Architekten eine große Gestaltungsfreiheit geboten. Der Mensch wendet seit langem diese Faltechnik bei Origami, einer japanischen Kunst des Papierfaltens, an. In der Natur kommen ebenfalls zahlreiche gefaltete Strukturen vor, wie zum Beispiel bei Pflanzen und Insekten, die sich diese formgebende Stabilität bei Flügel und Blätter zu Nutze machen und hierfür mit geringen Materialstärken auskommen.<sup>99</sup>

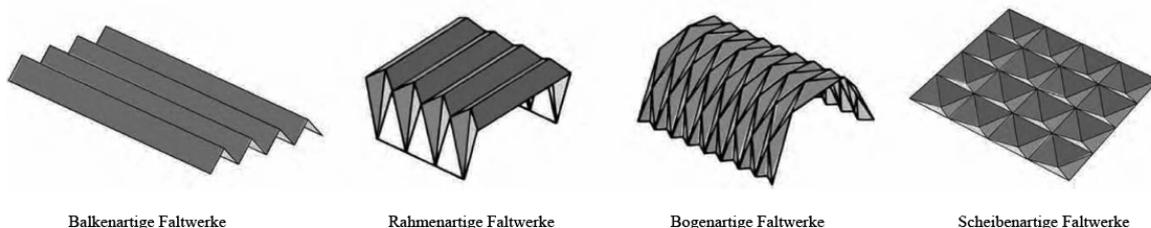


Abb.052

In der Bautechnik kommen Falwerke neben ganzen statischen Systemen (Balken, Rahmen, Bogen, Schreibe), auch in einzelnen Bauteilen vor, welche bekannteste Anwendung das Trapezblech darstellt. Die Form der Dachflächen eines Falwerks könnte eine vorgegebene bzw. neuinterpretierte Abwandlung des Shed-Daches darstellen. Diese Dachform hat sich auf Grund seiner Belichtung tiefer Hallen zu einem Standard im Industriebau entwickelt und seine Form zu einem Sinnbild dieser Baukörper.

<sup>99</sup> Vgl. Weinand, Origami: Falwerke aus Holzwerkstoffplatten, 14.09.2017.

#### 4.5.3.2) Tragwerk

Das Prinzip bei dem Origami für technische Konstruktionen verwendet wird, wird als Origami sekkei bezeichnet. Konstruktionen dieser Art, bei denen eine Vielzahl positiver technischer Eigenschaften entsteht, bieten sich vor allem für das Konzipieren von Tragwerken an. Gefaltete starr miteinander verbundene Flächen erzeugen mit wenig Materialeinsatz hohe Tragfähigkeiten. Werden die Faltungen kinematisch ausgeführt, so entstehen, sofern die Falten biegesteif verbunden werden, wandelbare und anpassungsfähige statische Systeme.<sup>100</sup>

Aller Vorteile zum Trotz sind Konstruktionen dieser Art im derzeitigen architektonischen Zeitgeist selten ausgeführt und die durch Faltungen, wandelbare Tragwerke gar nicht vorhanden. Dies ist wahrscheinlich auf eine vergleichsweise räumlich komplexere Struktur rückzuführen, welche mit zeitgemäßen digitalen Planungswerkzeugen, allen voran dem Algorithmic Modeling, zu bewerkstelligen ist. Ziel ist es das Wissen rund um die Prinzipien des Origami zu digitalisieren und bautechnisch verwendbar zu gestalten. Origami folgt strengen Regeln, bei der neben der Falttechnik, keine weiteren Hilfsmittel zur Konstruktion der Strukturen verwendet werden dürfen. Diese Regeln müssen, wie unten ersichtlich, in Form von Algorithmen in den architektonischen Entwurfsprozess mit eingebunden werden.<sup>101</sup>

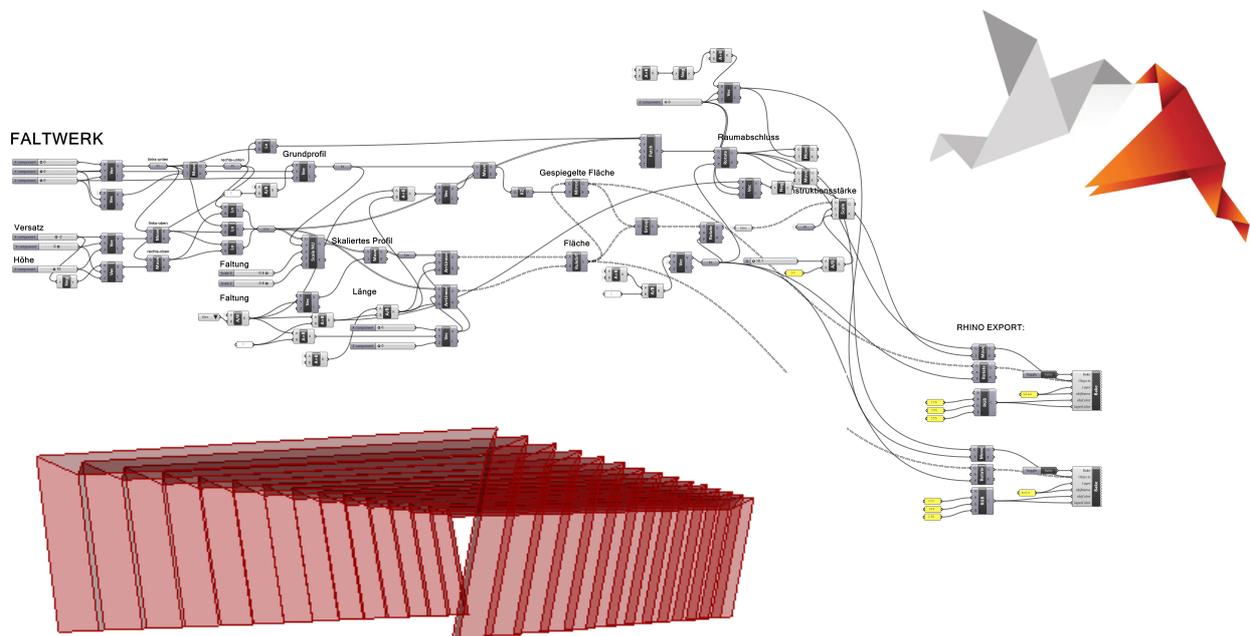


Abb.053

<sup>100</sup> Vgl. Hoffmann, Faltkonstruktionen und Origami-basierte Tragstrukturen, 14.09.2017.

<sup>101</sup> Ebd.

#### 4.5.3.3) Anwendungen des Faltwerks in der Bautechnik

Ein Faltwerk zählt zu den räumlichen Flächentragwerken, was dazu führt, dass die Konstruktion nicht nur tragend, sondern auch raumüberdeckend ist. Sie besteht aus Platten bzw. Scheiben ausgeführten ebenen Flächen, welche schubfest miteinander verbunden werden und das Falten der Flächen bewirkt eine erhöhte Steifigkeit dünner Materialstärken. Die Tragfähigkeit des Systems wird durch zwei Parameter definiert, nämlich der Neigung und Tiefe der einzelnen Falten.<sup>102</sup> Sie werden neben Stahl- bzw. Spannbeton auch in Stahl, Holz und Kunststoff ausgeführt.<sup>103</sup>

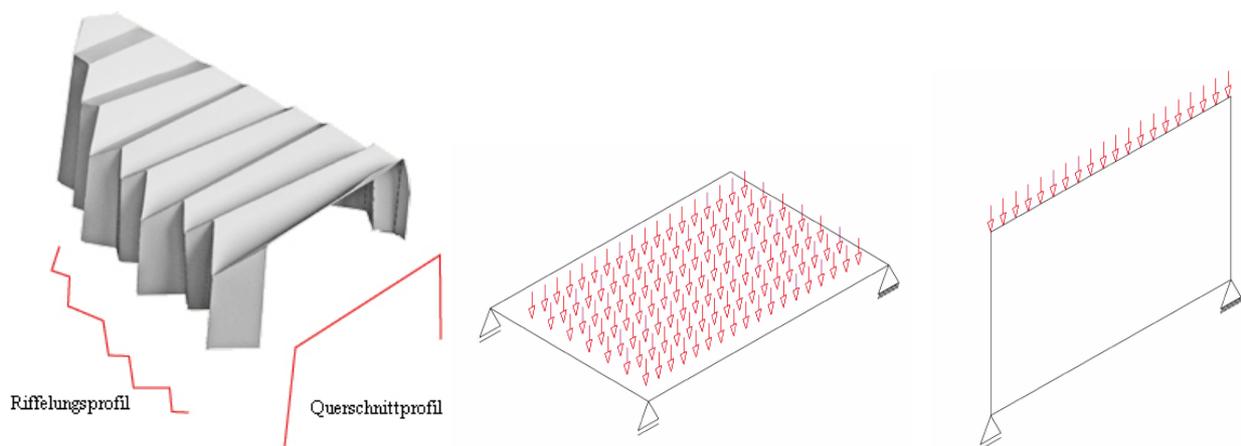


Abb.054

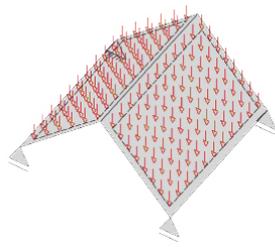
Die einzelnen Flächen werden sowohl als Platte als auch als Scheibe beansprucht. Dabei tragen die einzelnen Elemente Belastungen quer zur Fläche zunächst als Platte zu den Kanten hin ab, welche als Auflager dienen. Entlang der Kanten werden die Kräfte in Richtung der benachbarten Flächen zerlegt. Dadurch werden diese Flächen als Scheiben aktiviert.<sup>104</sup>

Da die Verformungen der Einzelscheiben unter Belastung unterschiedlich sind, verschieben sich die Kanten gegeneinander. Um dies zu verhindern, müssen sie schubfest miteinander verbunden sein. Die Flächen übertragen als Platten Biegemomente und als Scheiben Normalkräfte. Sie müssen daher gegen Ausbeulen und Ausknicken stabilisiert werden.

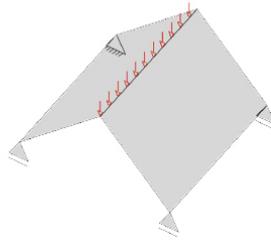
<sup>102</sup> Vgl. Buri/Weinand, Origami-Faltwerke, 14.09.2017.

<sup>103</sup> Vgl. Schuler, Tragwerkslehre 3, 23.10.2017.

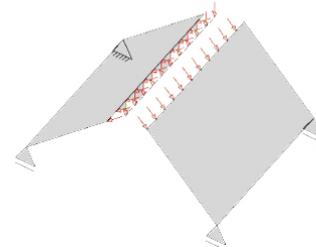
<sup>104</sup> Vgl. Jos/Pansy, Faltwerk, 13.09.2017.



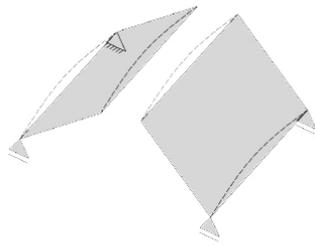
Beanspruchung der Fläche als Platte



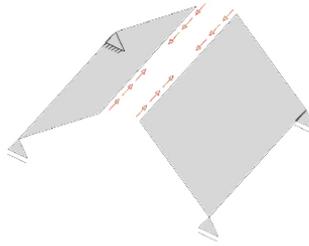
Lastabtragung zur Kante



Resultierende Kräfte werden in die Fläche eingeleitet, die als Scheibe wirkt



Unterschiedliche Verformung der Kanten verschieben diese



Schubspannungen entstehen in den Kanten, diese müssen daher schubfest miteinander verbunden sein

Abb.055

Die Leistungsfähigkeit eines Faltwerks in Bezug auf die maximal aufnehmbaren Lasten ist abhängig von <sup>105</sup>:

- dem Querschnitt der Gesamtkonstruktion
- der Konstruktionshöhe: Je flacher die Konstruktionshöhe ist, desto eher neigt sie zum Durchbiegen
- der Steifigkeit der einzelnen Flächenelemente
- der Stabilisierung der Konstruktion durch die Verbindung der Kanten untereinander oder durch andere konstruktive Maßnahmen

<sup>105</sup> Vgl. Jos/Pansy, Faltwerk, 13.09.2017.

Des weiteren wirken sich auch äußere Umwelteinflüsse, wie zum Beispiel Schneelasten, auf die Tragfähigkeit von Gebäuden aus. Wie unten dargestellt, wurden in diesem Projekt die Daten der Schneelastzonen digitalisiert und haben auf die Konstruktionsstärke des Tragwerks Einfluss. So wird materialspezifisch und ortsabhängig die notwendige Dimensionierung für den Baukörper von einem Algorithmus erstellt.

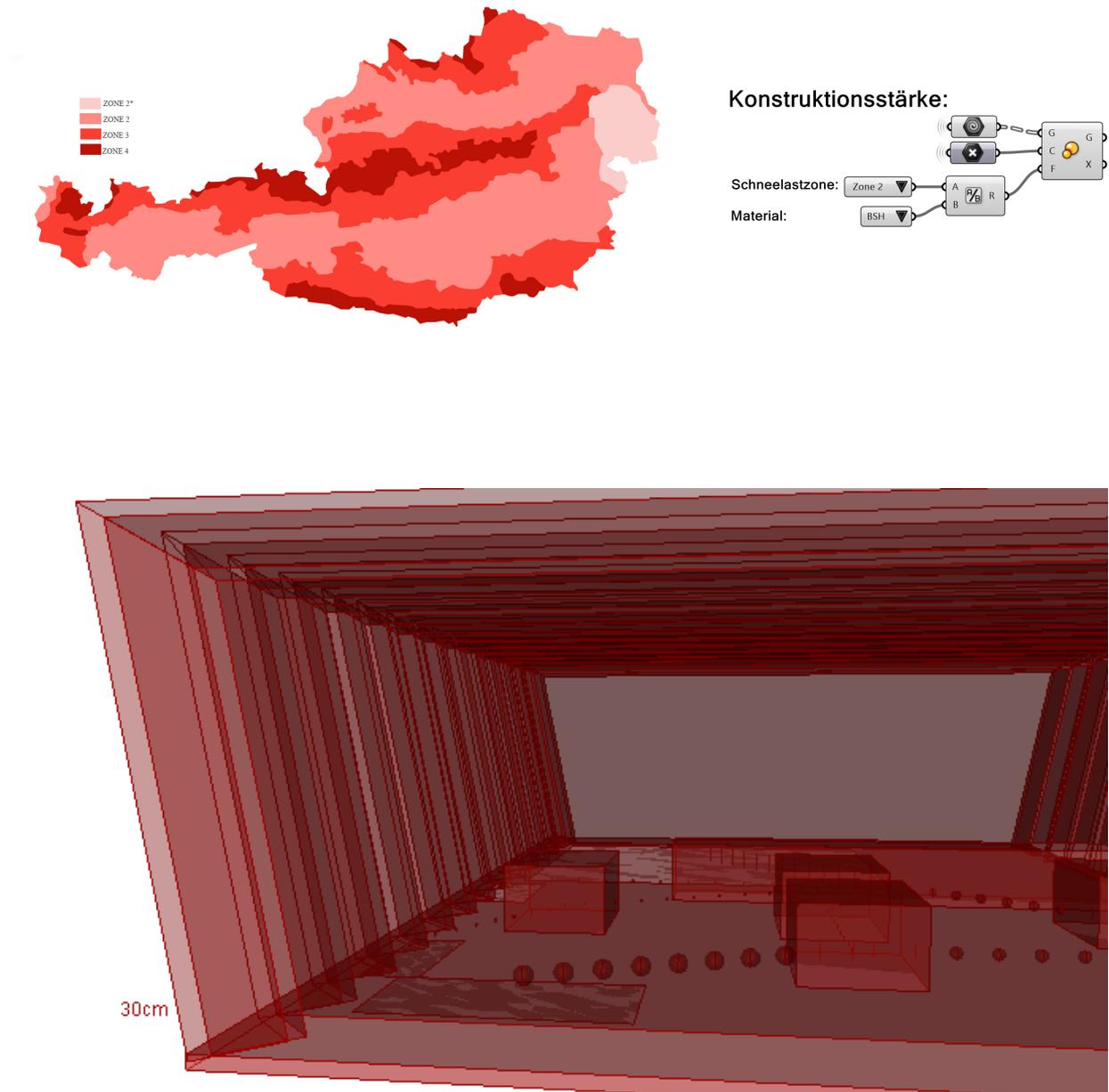


Abb.056

#### 4.5.4) Materialität

Unter Anbetracht dessen, dass Bauteile konventioneller Industriebauten bereits in der Herstellung einen sehr hohen Energieaufwand aufweisen, sollte hier nach nachhaltigeren Lösungen gesucht werden. Dies würde den Verbrauch der in den zuvor angeführten Energiebedarf der „Grauen Energie“ erheblich senken und durch eine über den gesamten Lebenszyklus betrachtete, bewusste Auswahl der Baustoffe, auch das Cradle-to-Cradle Prinzip fördern.

Vergleich des CO<sub>2</sub> - Fußabdruck unterschiedlicher Baumaterialien:

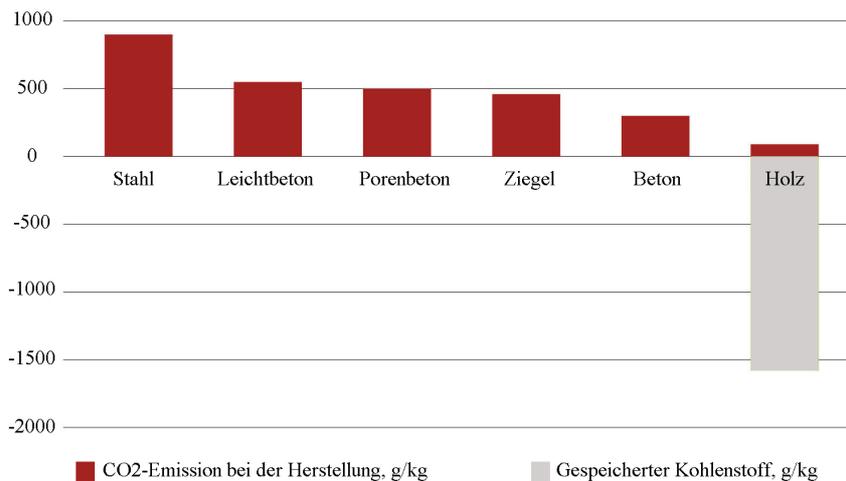


Abb.057

##### 4.5.4.1) Nachwachsender Baustoff - Holz

In der kürzeren Vergangenheit kommt der Baustoff Holz auch im Industriebau immer öfter zur Verwendung. Holz hat als nachwachsender und CO<sub>2</sub> speichernder Rohstoff, neben den nachhaltigen Aspekten, auch den Vorteil von der Möglichkeit eines hohen Grads an Vorfertigung und den damit verbundene schnellen Bau- und Montagezeiten, welche im Industriebau derzeit meist durch Betonfertigteilbau abgedeckt werden.

##### Tragfähigkeit:

Durch die stetige Weiterentwicklung von zum Beispiel Brettsperrholz, werden stützenfreie Grundrisse von mehr als einhundert Meter Spannweite möglich und erzeugen damit effizient und wandelbar nutzbare Flächen.<sup>106</sup>

<sup>106</sup> Vgl. Schickhofer, Die Holzmassivbauweise am Beispiel von Brettsperrholz, 21.10.2017.

Herstellung:

Die Grundlage für die Herstellung von Brettsperrholz sind sägeraue Bretter, welches als nicht hochwertiges Material angesehen wird, jedoch gute statische Eigenschaften bereitstellt. Brettsperrholz wird unter Einsatz neuester Technologien vorgefertigt bzw. von Industrierobotern bearbeitet und ist im Gegensatz zu traditionellen stabförmigen Holzbauweisen beinahe beliebig formbar. Die flächigen und tragenden Platten- und Scheibenelemente der Holz-Massivbauweise (Brettsperrholz), zeichnen sich durch eine hohe Steifigkeit aus und besitzen im Gegensatz zum Leichtbau hohe speicherwirksame Massen. Die fertigen, industriell produzierten, BSP-Elemente können, durch eine zusätzliche Schicht, auch eine hochwertige Sichtqualität in Holzoptik bieten.<sup>107</sup>

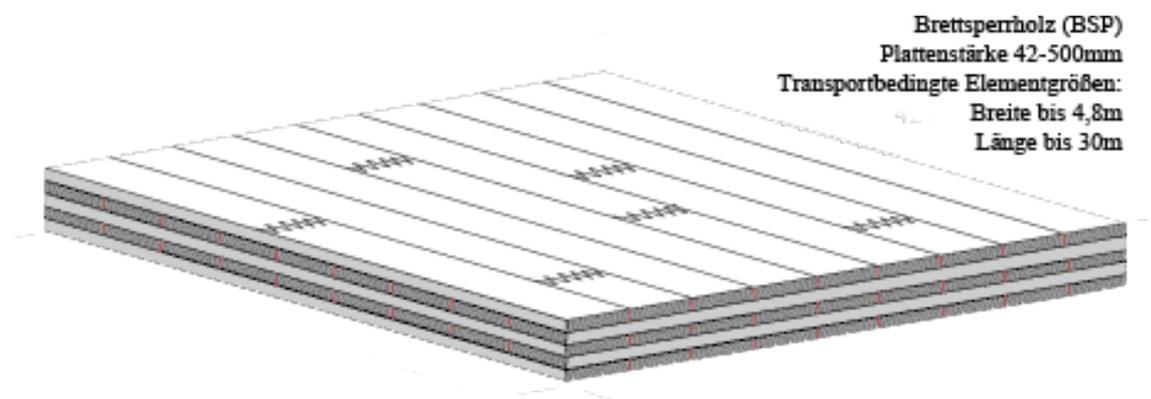


Abb.058

Brandschutz:

Ein heikles Thema eines jeden Holzbauwerks stellt der Brandschutz dar, vor allem weil auch jedem Laien bewusst ist, dass Holz brennt. Im Gegensatz zu Stahl, verhält sich Holz jedoch aus Brandschutztechnischer Sicht gutmütig, weil im Brandfall eine schützende Holzkohleschicht entsteht. Diese hat die Eigenschaft Wärme schlecht zu leiten, was dazu führt, dass der tragende Kern des Querschnitts geschützt wird. Versuche ergaben, dass in der Zeit von einer halben Stunde, der Querschnitt von Holzbauteilen von allen Seiten um 20mm geschwächt wurde (siehe Abbildung). Bei einer ausreichend dimensionierten Konstruktion, kann also ohne jegliche zusätzliche Maßnahmen, der notwendige Brandschutzwert erfüllt werden.<sup>108</sup>

Auf Grund erhöhter Brandlasten durch Verpackungsmaterial und den zu verarbeitenden Rohmaterialien der Produktion, sollte in das Team der integralen Planung ohnehin möglichst früh ein Brandschutzplaner hinzugezogen werden. Dieser wird über allfällig zusätzlich notwendige Maßnahmen wie Sprinkleranlagen, RWA und Brandmeldeanlagen entscheiden und in den Entwurfsprozess mit einfließen lassen.

<sup>107</sup> Vgl. Schickhofer, Die Holzmassivbauweise am Beispiel von Brettsperrholz, 21.10.2017.

<sup>108</sup> Vgl. Brandschutz, 29.10.2017.

Bewitterung:

Grundsätzlich wird Brettschichtholz in drei Nutzungsklassen eingeteilt, wobei die Nutzungsklasse 3, den Anforderungen der freien Bewitterung ohne zusätzlichen Holzschutz gerecht wird. Es kommt im Laufe der Zeit zu einer natürlichen Abwitterung des Holzes, was sich durch eine Farbänderung, hin zu einem Grauton, bemerkbar macht. Diese durch UV-Strahlung und Regenwasser entstehende Verfärbung von wetterbeanspruchten Holzbauteilen hat keine Auswirkungen auf die statischen Fähigkeiten des Elements.<sup>109</sup>

#### 4.5.4.2) CO<sub>2</sub>-armer Beton:

Für die Fundamente und die Bodenplatte des Baukörpers kann jedoch nicht auf den Baustoff Beton verzichtet werden, weshalb für diese Bauteile geachtet werden muss, dass ein CO<sub>2</sub>-armer Beton verwendet wird. Der Vergleich des unten stehenden CO<sub>2</sub> Fußabdrucks bekräftigt die Entscheidung das Baumaterial Beton bzw. auch Stahl nur dort zu verwenden, wo es unumgänglich ist.

Laut einem deutschen Hersteller von Betonfertigteilen, werden pro Tonne Betonfertigteile ca. 260 kg CO<sub>2</sub> ausgestoßen. Verursacher dieser schädlichen Emissionen sind neben der Bereitstellung der benötigten Rohstoffe (insbesondere Zement), auch der Energieverbrauch im Fertigteilwerk und der Transport der Elemente auf die Baustelle. Beton besteht aus einer Zusammensetzung von Zement, Wasser, Kalk, Sand, Zuschlagstoffen und Zusatzmitteln. Das Bindemittel Zement hat einen überaus hohen CO<sub>2</sub>-Ausstoß, weshalb die Reduzierung des Zementanteils, die Verwendung eines klinkerreduzierten Zements oder den Einsatz von ersetzenden Sekundärrohstoffen zu großen Einsparungen beim CO<sub>2</sub> Fußabdruck des Betons führen. Rohstoffe regional zu beziehen und Transportwege kurz zu halten kann auch ein entscheidender Faktor zu einer Reduktion der Umweltbelastungen durch Betonfertigteile sein.<sup>110</sup>

#### 4.5.4.3) Dämmung:

Da das Tragwerk des Projekts als zweischichtige Falterwerkstruktur definiert wurde, soll die Dämmfunktion von einer ungebundenen Zellulosedämmung übernommen werden, welche nach der Montage des Tragwerks vor Ort in den Zwischenraum eingeblasen wird und sich dort zu einer kompakten Dämmmatte verbindet. Zellulosefasern werden in der Regel aus recycelten und mechanisch zerkleinerten Tageszeitungspapier hergestellt und dienen als Wärme- und Schalldämmung, welche keinerlei Druckbelastung aufnehmen können. Somit eignet sich dieses Dämmmaterial hervorragend als Hohlraumdämmung für das geplante zweischalige Falterwerk. Um einen bestimmten Brandschutzwert zu erreichen bzw. einem biologischen Befall entgegenzuwirken, werden dem Material mineralische Salze beigefügt. Zellulosedämmstoffe haben sich hinsichtlich des Brandschutzes im Vergleich zu konventionellen Dämmmaterialien als besonders wirksam erwiesen.<sup>111</sup>

---

<sup>109</sup> Vgl. Brettschichtholz KVH, 12.09.2017.

<sup>110</sup> Vgl. Nachhaltigkeit, 02.11.2017.

<sup>111</sup> Vgl. Zellulosedämmstoff, 10.11.2017.

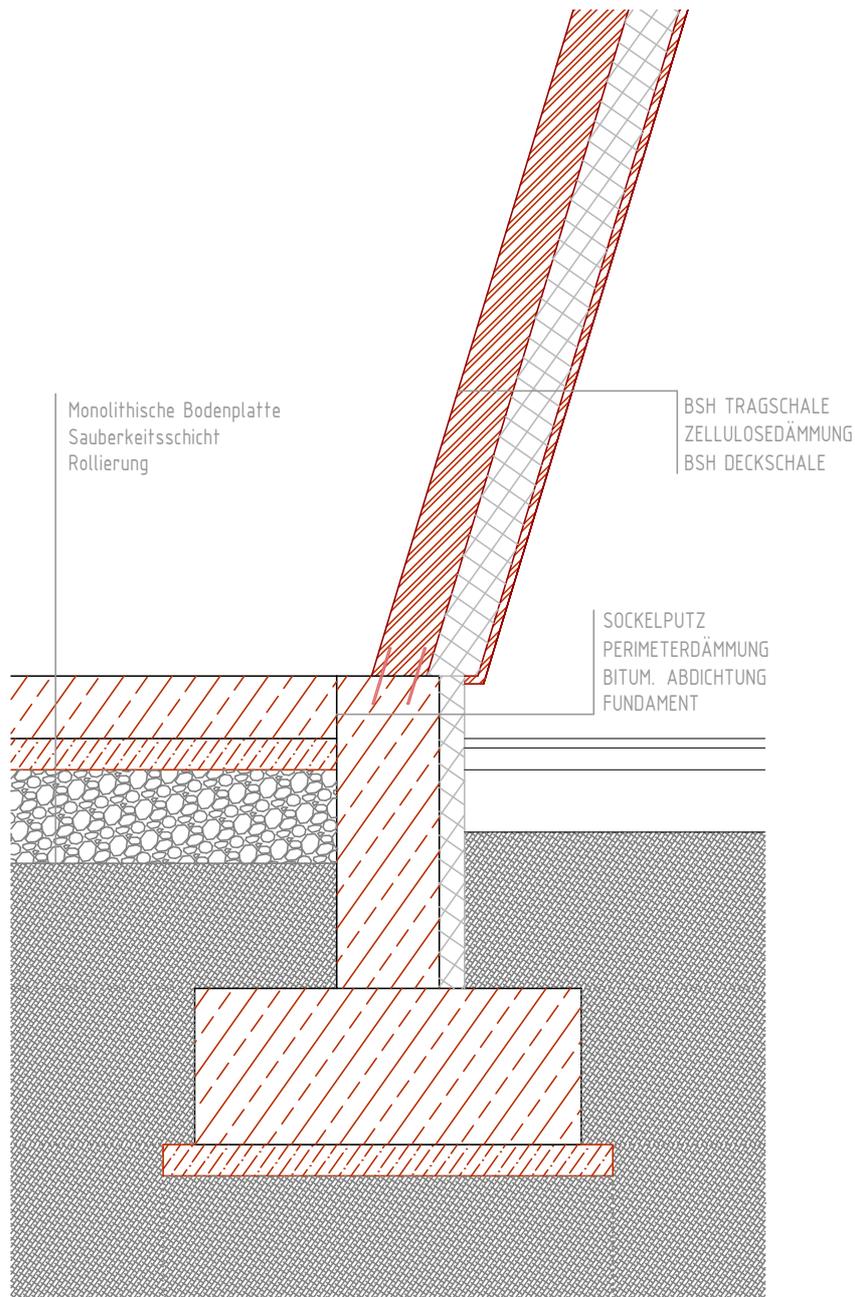


Abb.059

#### 4.5.5) Herstellung

Jene wenigen Falwerke die bereits zur Realisierung kamen, wurden der Großteil mit Beton oder mit glasfaserverstärkten Kunststoffen hergestellt. Durch die Möglichkeiten, welche industriell gefertigte großformatigen Brettsperrholzplatten bieten, ist es anzudenken Falwerke auch in Holzbauweise auszuführen. Unter Einsatz von CNC Maschinen und Industrieroboter können die Holzelemente weiter bearbeitet werden und in die digitale Wertschöpfungskette eingebunden werden. Diese Einbindung ermöglicht einem durchgängigen Weg von einem digitalen zu einem physischen Modell und reduziert Planungs-, Herstellungs- & Montagezeiten.<sup>112</sup>

<sup>112</sup> Vgl. Savoyat, Origami aus gekrümmtem Holz, 29.09.2017.

Der Holzbau hat sich von einer ursprünglich handwerklichen, zu einer industriellen und digitalisierten Bauweise entwickelt. Die Digitalisierung revolutionierte Entwurfs- und Herstellungsprozesse und ermöglichte die Produktion zuvor unmöglicher Konstruktionen.<sup>113</sup>



Abb.060

Der Industriebau ist durch ein „Bauen im System“ geprägt, bei dem möglichst viele formgleiche vorgefertigte Elemente versetzt werden. Anhand neu gewonnener digitaler Methoden, werden individuelle Bauteile zu einem relativ geringen Preis ermöglicht. Der Systembau des Industriebaus verliert deswegen nicht an Gültigkeit, sondern verliert dadurch lediglich seine eingeschränkten Möglichkeiten. Der Lehrstuhl für Holzkonstruktionen (IBOIS) der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), beschäftigt sich mit der Machbarkeit von Faltsystemen in Holzbauweise und erforscht diese anhand erster Referenzbauten.<sup>114</sup>

Bei der Herstellung von Faltsystemen mit dem Baustoff Holz spielen vor allem Holz-Holz Verbindungen, die sogenannten Schwalbenschwanzverbindungen, eine große Rolle. Diese Technik spiegelt eine der ältesten Verbindungsmethoden im Holzbau wieder, welche auch heute noch nicht an Berechtigung in seiner Verwendung verloren hat.<sup>115</sup>

---

<sup>113</sup> Vgl. Savoyat, Origami aus gekrümmtem Holz, 29.09.2017.

<sup>114</sup> Ebda

<sup>115</sup> Ebda

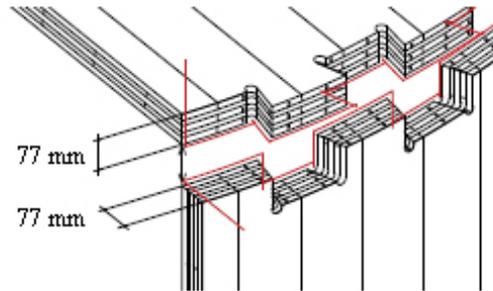
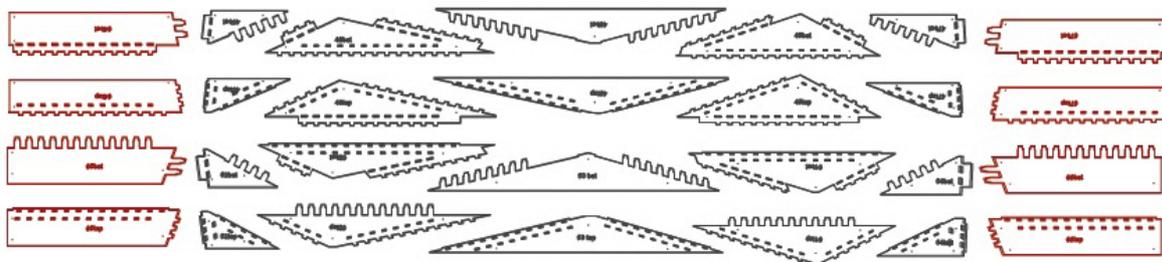
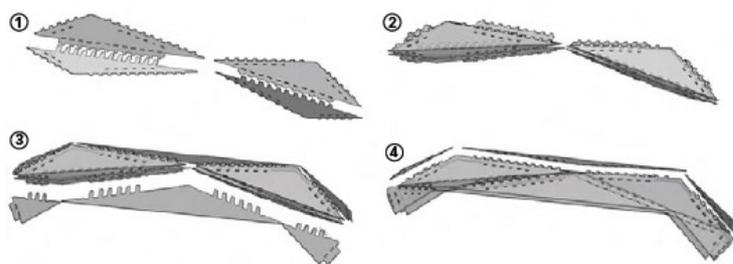


Abb.061

Das IBOIS der EPFL hat diese Verbindungstechniken erforscht und auch in den baulichen Maßstab übertragen und damit aufgezeigt, dass gefaltete Plattentragwerke mit einem minimalen Einsatz von Metallverbindern und Leim hergestellt werden können. Die universitären Mitarbeiter entwickelten für diesen Zweck ein Tool um diese Verbindungen Computerunterstützt automatisch berechnen und darstellen zu lassen. Die entstandenen Zapfenverbindungen funktionieren zur Kraftübertragung und stellen eine Fügehilfe dar, welche einen schnellen und genauen Zusammenbau einer Vielzahl individueller Bauteile ermöglicht, was auf der unten stehenden Grafik veranschaulicht wird.<sup>116</sup>



Fabrikationsdaten / Vorgefertigte Ausschnitte von Dach- und Wandplatten



Zapfenverbindungen



Digitales Abbild des Tragwerks

Abb.062

<sup>116</sup> Vgl. Origami-Faltkunst für Tragwerke, 03.09.2017.

#### 4.5.6) Gestaltung

Das architektonisch spannende an Faltenwerken ist, dass die Falten neben der statischen Wirkung als Tragwerk auch als gestaltendes Element fungieren und einen Rhythmus erzeugen der dabei ein Wechselspiel aus Licht und Schatten erzeugt. Sie haben ein skulpturales Erscheinungsbild bzw. können mit diesen Konstruktionen die Baukörper auch Falten- oder Flechtwerke dargestellt werden. Einen Baukörper als Faltenwerk auszuführen ermöglicht die Nutzung von vielen sich unterstützenden Synergieeffekten. <sup>117</sup>

Die wesentlichen Entwurfskriterien für Faltenwerke sind <sup>118</sup>:

- Spannweite
- Gesamtgeometrie des Faltenwerks (Gesamtquerschnitt)
- Konstruktionshöhe des Faltenwerks
- Beanspruchungen der Teilflächen
- Geometrie und max. Abmessungen der Teilflächen-Fertigungsverfahren bzw. Größe der Halbzeuge (Plattenware)-Verringerung der Beulgefahr durch Begrenzung der Größe einzelner Teilflächen-Transportmöglichkeiten und Montagetechnik
- Steifigkeit der Teilflächen
- Max. Anzahl der an einem Punkt zusammentreffenden Kanten

#### FALTWERK

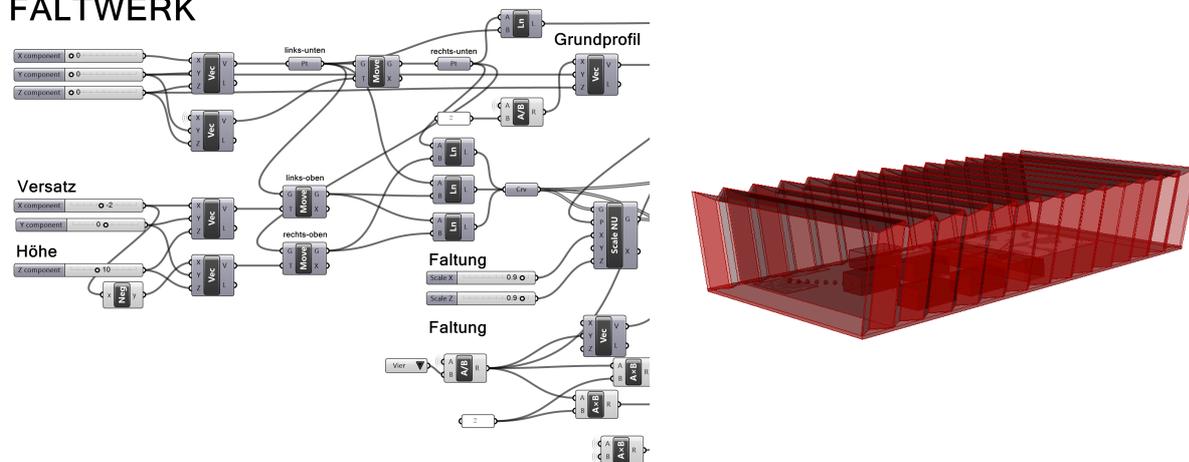


Abb.063

Die Gestaltung von Faltenwerken kann durch diese wenigen Kriterien bestimmt werden, was gepaart mit dem zeitgemäßen computergenerieren von Körpern ein schnelles räumliches darstellen ermöglicht. Architekten sollen sich an einem programmierten Entwurfswerkzeug bedienen, welches die Verketzung von Entwurf und Konstruktion ermöglicht und so zu nachhaltigen Lösungen führt. Durch eine Reduktion der Kriterien auf zwei wesentliche Parameter, wie z.B. Querschnittsprofil und Teilflächen, ist ein schnelles generieren und anpassen der Formen möglich. Trotz der

<sup>117</sup> Vgl. Buri/Weinand, Origami-Faltenwerke, 14.09.2017.

<sup>118</sup> Vgl. Jos/Pansy, Faltenwerk, 13.09.2017.

geringen Parameter ergibt sich ein großer Handlungsspielraum für Architekten und das erschaffen individueller Konstruktionen, welche an die spezifischen Bedürfnisse unterschiedlicher Projekte Rücksicht nehmen können. Falterwerke haben ein eindrucksvolles und eigenständiges Erscheinungsbild, was durch das individuelle anpassen an die projekteigenen Anforderungen den gestalterischen Grundgedanken nicht beeinträchtigt. <sup>119</sup>

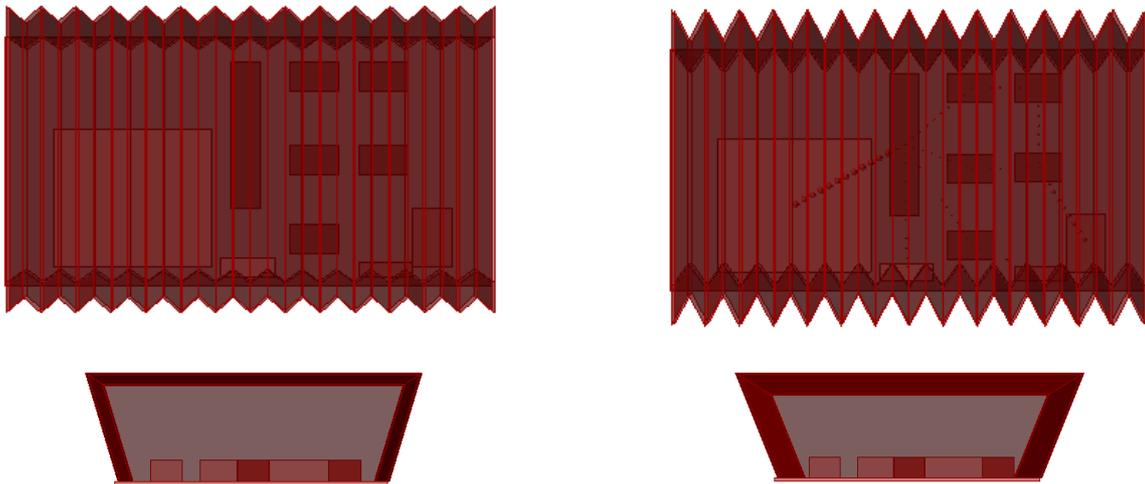


Abb.064

Mittels visuell programmierten Algorithmen, hat man die Möglichkeit mit dem manipulieren von Parametern sehr schnell neue Varianten zu erproben, da die Architektur, Statik und Teile der Produktion miteinander im Entwurfswerkzeug vernetzt sind.

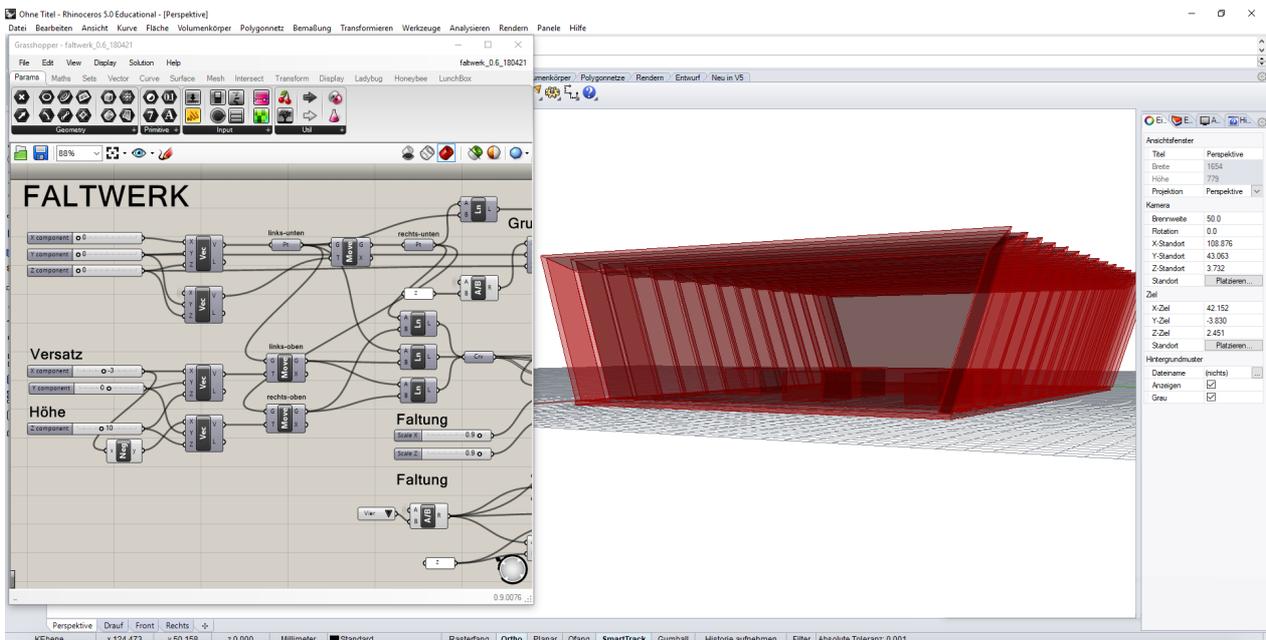


Abb.065

<sup>119</sup> Vgl. Origami-Faltkunst für Tragwerke, 03.09.2017.

#### 4.5.7) Synergie

Auf Grund der statischen und räumlich-plastischen Wirkungen von faltwerken sind Ingenieure und Architekten an diesen Konstruktionen gleichermaßen gefordert und interessiert. Es entstehen Synergieeffekte zwischen den verschiedenen Fachplanern, denn die spezielle Form des faltwerks ermöglicht die Tragfähigkeit der Konstruktion und ist zugleich architektonischer Ausdruck und darüber hinaus gewinnt die Konstruktion durch einen minimalen Materialbedarf an Effizienz. Die hierbei notwendige synergetische Planung erfordert eine enge Zusammenarbeit von Ingenieuren und Architekten und soll dadurch zu neuen maßgebenden Bauwerken führen.<sup>120</sup>

Ein klar definierter Arbeitsprozess muss für dieses Zusammenwirken der Disziplinen in allen Projektphasen gelten, welcher sich an den eingangs beschriebenen bestehenden Richtlinien (Level of Detail/Information) und BIM-Prozessen orientiert und klare Schnittstellen zwischen Architektur und Ingenieurwesen definiert.

#### 4.5.8) Referenzprojekte

Mit dem Verweis auf ein Referenzprojekt soll die Machbarkeit einer Ausführung, der oben beschriebenen Ansätze, des in der Masterthesis entwickelten Industriebau 4.0, unterstrichen werden.

Yves Weinand war federführend bei dem Neubau des Théâtre de Vidy bei Lausanne, welches als zweischichtiges faltwerk in Holzbauweise ausgeführt wurde und mit seiner innovativen architektonische Struktur, der Umweltfreundlichkeit und der einfachen (De-)Montage besticht. Zum Einsatz kamen die mit Computerhilfe vorgefertigten Holz-Holz Verbindungen der Platten, die als Forschungsgegenstand des EPFL eingangs beschrieben wurden. Der Baukörper zeigt zudem klar auf, dass das Tragwerk und die Form als ein selbstverständlich miteinander vernetztes Ganzes wirken.

Das faltwerk überdeckt zwischen den zwei gefalteten und neun Meter hohen Wänden eine stützenfreie Grundfläche von 538 m<sup>2</sup>, welche sich in etwa durch eine Breite von 20 Metern und eine Länge von 28 Metern zusammensetzt. Die Montage des Gebäudes erfolgt in elf Achssegmenten, bei dem jedes Segment mit zwei Wandelementen und einem Dachelement vorgefertigt wird. Vor Ort werden die Wandsegmente mit dem jeweiligen Nachbarsegment verbunden bzw. mit dem, als faltwerk konstruierten Bindern, zusammengesetzt. Bei diesem als Prototyp zu verstehenden faltwerk kam eine zweischichtige Konstruktion zum Einsatz, welche die Möglichkeit der integralen Verbindungstechnik ausnutzt und besonders dünne Plattenquerschnitte miteinander verbindet. Dies macht es möglich, dass das Tragwerk eine Distanz von 16 bis 20 m stützenfrei, mit einer Plattenstärke von nur 45 mm, überspannen kann. Der Hohlraum der zweischichtigen Plattenkonstruktion beträgt 210 mm und bietet somit ausreichend Platz für die Dämmung, welche über vorgefertigte Bohrungen in der oberen Plattenlage im Zuge der Montage auf der Baustelle eingeblasen wird. Eine einschichtige Konstruktion eines Brettchichtholz Tragwerk, wäre zwar mit einer schnelleren und einfacheren Fügung bei der Montage bevorzugt, jedoch bei zu dämmenden

---

<sup>120</sup> Vgl. Origami-Faltkunst für Tragwerke, 03.09.2017.

Bauwerken dennoch deutlich langsamer, da hier komplexe Zuschnitte der Feststoffdämmung hinzukommen würden.<sup>121</sup>

Eigens für das Projekt wurde mit Hilfe von dem Software Development Kit (SDK), Rhino Commons und der Programmiersprache C# ein Tool entwickelt, welches als Basis des durchgängig digitalen Wertschöpfungskette dient und als Benutzerschnittstelle für Architekten in Grasshopper bereitgestellt wird. Somit wurde der Algorithmus bzw. das Tool in den Entwurfsprozess des Architekten integriert, was es ermöglicht über Eingabeparameter die Konstruktion mit einfachen Mitteln anpassen zu können.<sup>122</sup>



Abb.066

#### 4.6) Technische Gebäudeausrüstung

Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass über die Orientierung, die Form und die Konstruktion des Gebäudes, die Maßnahmen für die Technische Gebäudeausrüstung auf ein Minimum reduziert werden sollen. Durch den Einsatz neuester Technik, welche bei den verbleibenden notwendigen Anlagen zum Einsatz kommt, sollen durch eine Vernetzungen aller Elemente, Synergieeffekte genutzt werden. Diese Technische Gebäudeausrüstung soll zu einer im Betrieb stets individuell anpassbaren Optimierung des Energiebedarfs beitragen.

---

<sup>121</sup> Vgl. Robeller/Weinand, Standfest gefügt, 29.09.2017.

<sup>122</sup> Ebda

#### 4.6.1) Mess- & Regeltechnik

Das Fachgebiet der Technik für Elektrisches Messen, Steuern und Regeln (EMSR) wird in der Interaktion von Gebäude und Produktion eine sehr wichtige Position einnehmen. So können über die EMSR Maßnahmen getroffen werden um Energieströme intelligent dorthin zu lenken, wo sie derzeit tatsächlich benötigt werden. Dies führt dazu, dass im Vergleich zu einem konventionellen Industriebau, ein wesentlicher Anteil des Energiebedarfs eingespart werden kann und so dem Grundsatz der zuvor thematisierten Lean Production entspricht, Werte ohne Verschwendung zu erzeugen. Durch den Einsatz eines hohen Grads der Automatisierung, müssen viele Arbeitsbereiche nicht mehr den hohen Anforderungen eines ständigen Arbeitsplatzes, gemäß den Arbeitsstättenverordnungen, entsprechen. Hier liegt ein sehr hohes Einsparungspotential hinsichtlich der Beleuchtung und Belüftung von Arbeitsplätzen, welche nur in vollem Ausmaß erfüllt werden sollen, wenn sich in diesem Bereich tatsächlich ein Mensch aufhält. In der Produktion der Industrie 4.0 werden Menschen nur noch sporadisch bzw. zu Wartungszwecken oder als Kontrollorgan in die Fertigung eingreifen, den Rest der Zeit muss die Raumkonditionierung den in vielerlei Hinsicht minderen Anforderungen der Maschinen genügen. So wird auch die Manipulation durch den Menschen, z.B. durch das Öffnen von Fenstern und einer damit verbundenen Veränderung der Raumluftqualität, entgegengewirkt. Auf die Leistungen der EMSR wird in weiterer Folge auch bei der Haus- und der Elektrotechnik zurückgegriffen und in den folgenden Absätzen erläutert.

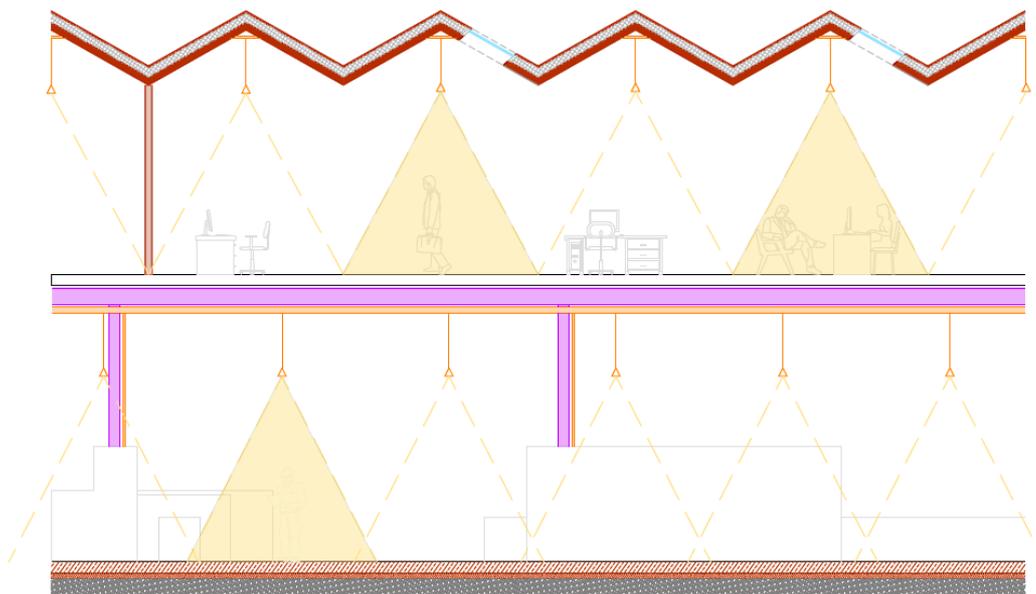
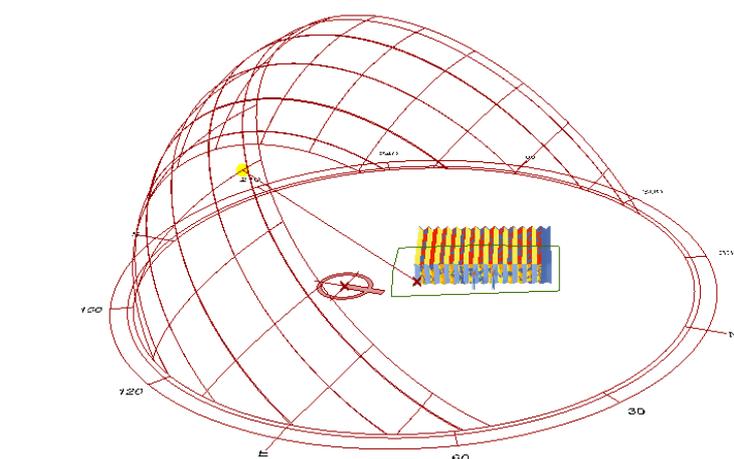


Abb.067

#### 4.6.2) HKLS

Naturgemäß nehmen die Gewerke der HKLS (Heizen, Kühlen, Lüftung, Sanitär) eine wichtige Rolle in Industriebauten ein. Die Anforderungen an die TGA (Technische Gebäudeausrüstung), ist auch hier durch die Individualität innerhalb der Produktion geprägt und muss sich ebenso an stetig veränderbare Produktionsprozesse anpassen. Maßnahmen welche den Baukörper als Ganzes betreffen, wie zum Beispiel die Ausrichtung auf dem Grundstück, fließen genauso in das Haustechnik-Konzept ein, wie anpassbare konstruktive Bauteile (leicht wandelbare Technik- bzw. Medienebenen) im Gebäudeinneren und durch die EMSR automatisiert gelenkte Energieströme.

Wie in der linken Abbildung ersichtlich, hat bereits die Ausrichtung des Baukörpers auf dem Grundstück, Folgen für das Konzept der Haustechnik. Die Orientierung, die Form und die Größe und Anzahl der Öffnungen, wirken sich maßgeblich auf den Heiz- und Kühlbedarf des Gebäudes aus. Wie bereits eingangs beschrieben, treffen auch in der HKLS die fünf Schlüsselfaktoren (Mobilität, Modularität, Skalierbarkeit, Kompatibilität und Universalität)<sup>123</sup>, des deutschen Ingenieur und Professor H.-P. Wiendahl, zu. Im Fall der Masterarbeit sollen diese Punkte über eine wandelbare Medienebene (rechte Abbildung), welche sich unterhalb der Brettschichtholzdecke des Zwischengeschosß befindet, erfüllt werden.



*Sun-Path Diagram - Latitude: 48.23  
26 JUL 9:00, ALT = 43.72, AZM = 112.58*

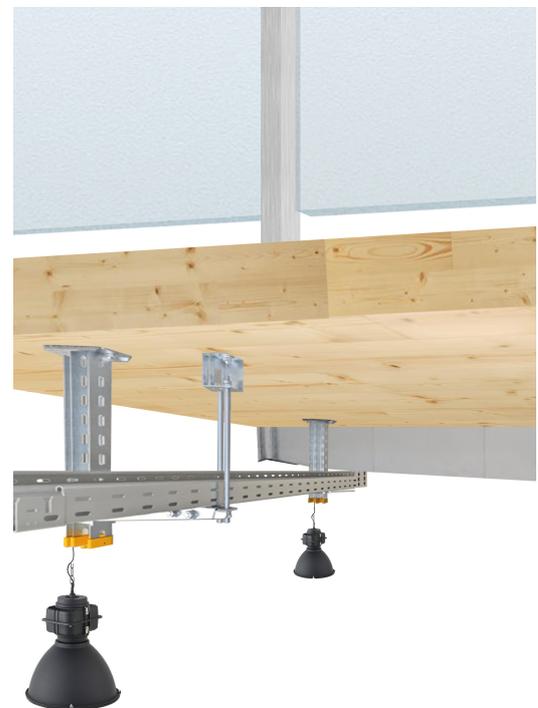


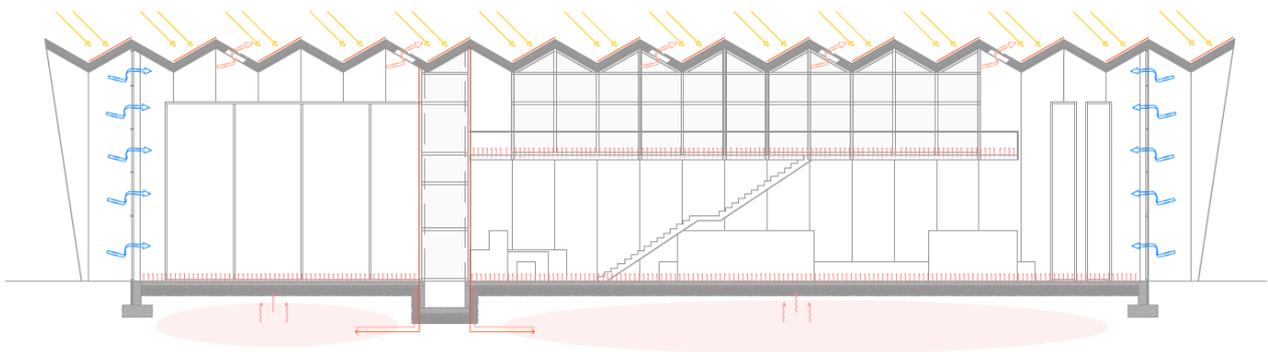
Abb.068

<sup>123</sup> Vgl. Limacher, Wandlungsfähige Fabrik, 04.08.2017.

#### 4.6.2.1) Heizen & Kühlen

Das Konzept sieht es vor, das unter der Halle liegende Erdreich als Wärmespeicher zu nutzen und somit das konventionelle Heizen zu einem Großteil ersetzen. Die nach Süden ausgerichteten Faltungen werden mit Hybridmodulen<sup>124</sup> ausgestattet, welche die Wirkungen der Photovoltaik (Stromerzeugung) und Solarthermie (Heizen) kombinieren. Die aus der Solarthermie gewonnene Wärmeenergie soll in das Erdreich eingebracht werden, wo diese gespeichert wird, um bei Bedarf über eine im Boden verlegte Industrieflächenheizung die Wärmeenergie im Winter abzugeben. Durch den Einsatz von Wärmepumpen soll ein Kühlen im Sommer mit dem gleichen System ermöglicht werden.

Winter:



Sommer:

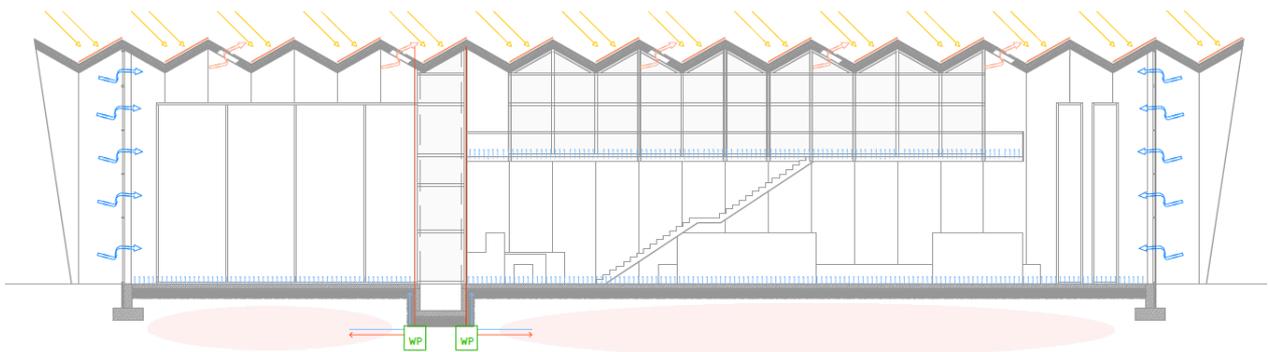


Abb.069

Mittels einer natürlichen Nachtkühlung, die über ein automatisches Öffnen der Elemente der Braundrauchentlüftung funktioniert, kann eine sommerliche Überhitzung ohne Einsatz von Primärenergie gewährleistet werden.

<sup>124</sup> Vgl. Strom & Warmwasser mit einem System erzeugen, 30.11.2017.

Um Spitzenzeiten des Heizbedarfs abzudecken, wird alternativ auch eine Heizung mittels Pellets projektiert, da hierfür ein Abfallprodukt der Produktion als Heizenergie zurück in den Prozess eingebracht wird. Da bei den Produktionsschritten des Kappens und des Profilieren (Hobeln) Sägespäne bzw. Hobelspäne anfallen, werden diese für die Herstellung von eigenen Pellets verwendet. Dafür werden die Späne in einer, in der Produktion eigens integrierten Pelletieranlage, weiterverarbeitet und kommen in weiterer Folge als Heizenergie erneut in den Kreislauf der Produktion zurück.

Die gesamte Heizlast von rund 80 kW<sup>125</sup> kann mit einer Pelletsheizung nicht wirtschaftlich erreicht werden, da hier eine Lagerfläche von rund 28.800m<sup>3</sup> notwendig wäre um die 32.000kg (1kW Heizlast = 400 kg-Pellets / Jahr)<sup>126</sup> abzudecken. Um Spitzenzeiten abzudecken und das größte Abfallprodukt (Sägespäne) der Produktion wiederzuverwenden bzw. in den Prozess rückzuführen, soll eine Gebäudeinterne Pelletieranlage ausgeführt werden.

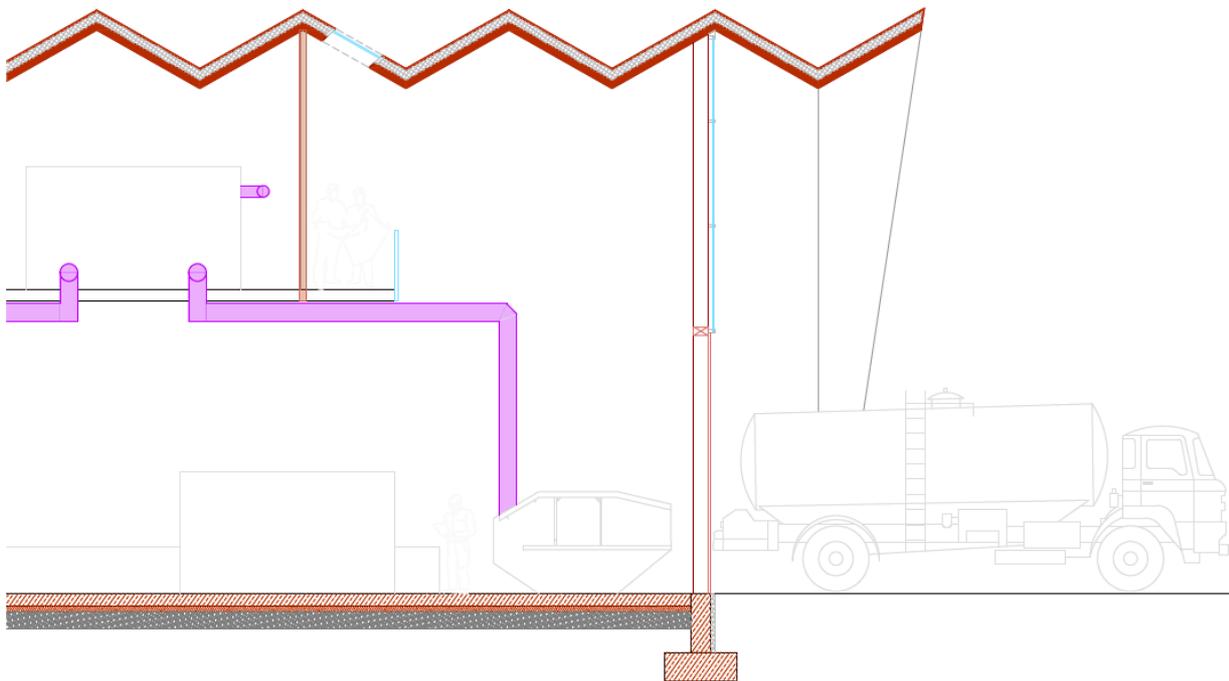


Abb.070

<sup>125</sup> Wärmebedarfsrechner, 20.05.2018.

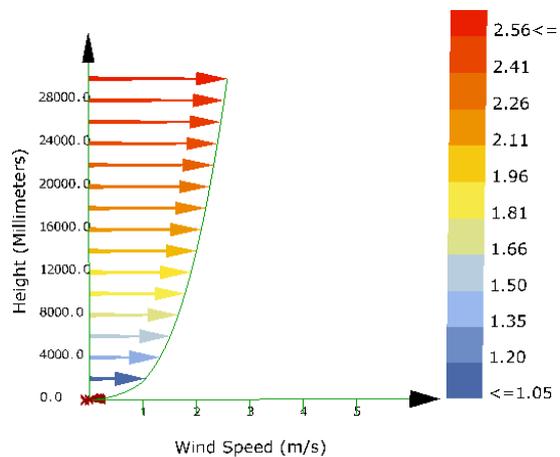
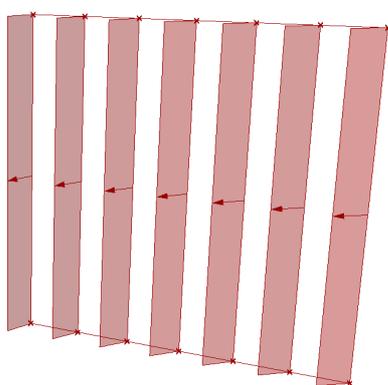
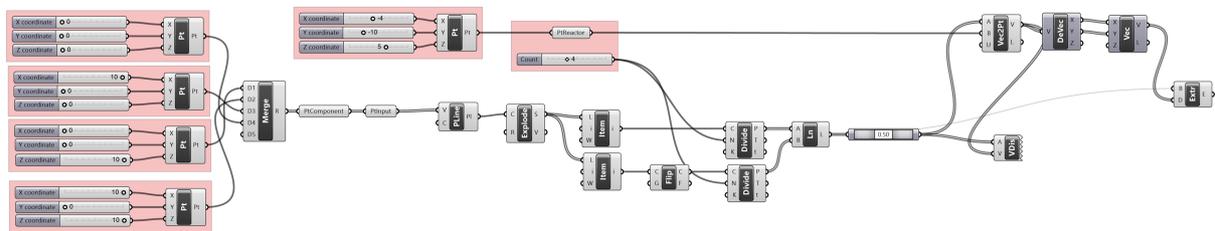
<sup>126</sup> Vgl. Heizen mit Pellets, 20.05.2018.

#### 4.6.2.2) Lüftung

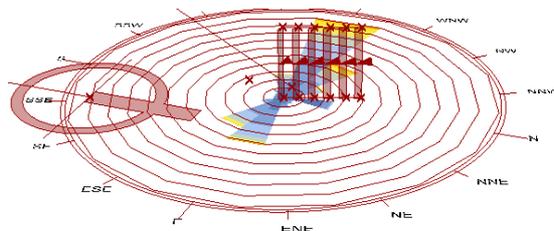
Das Konzept sieht ein natürliches Brandlüftungs- und Lüftungssystem (NRWG) vor.

Das System funktioniert mittels sensorgesteuerten Lamellen, die neben den inneren Einflüssen des Gebäudes, auch auf äußere Einwirkungen der Witterung reagieren. Auch hier zeigt sich wieder die Notwendigkeit der EMSR, die zum Beispiel der Funktion der Brandrauchentlüftung (BRE), immer eine Vorrangstellung einräumen muss.

Die unten stehende Grafik zeigt, die mittels Algorithmic Modeling hergestellte, Vernetzung von Wetterdaten und den sensorgesteuerten Lamellen. Diese sollen während des Betriebs, durch Gebäude interne Bedingungen, automatisiert geöffnet werden und die Anzahl der offenen Lamellen bzw. deren Öffnungsgrad durch die äußeren Umwelteinflüsse bestimmt werden.



Wind Profile - Prevailing Wind Average Velocity



Wind-Rose  
 LINZ\_AUT  
 1 JAN 1:00 - 31 DEC 24:00  
 Hourly Data: Wind Speed (m/s)  
 Calm for 3.80% of the time = 333 hours.  
 Each closed polyline shows frequency of 2.5%. = 217 hours.

Abb.071

Des Weiteren erkennt man auch hier, dass ein Bauteil mehrere Gewerke betrifft und dadurch Synergieeffekte genutzt werden. Die Lamellen gliedern sich in eine Ebene mit der statisch wirksamen und architektonisch formgebenden Konstruktion ein. Auf Grund der wandelbaren Funktionen des Bauteils selbst, werden neben dem Hauptzweck des natürlichen Luftwechsels, auch solare Gewinne erzielt, das Tageslicht optimal ausgenutzt, Brandschutztechnische Maßnahmen getroffen und der Baukörper über Nacht gekühlt.

#### 4.6.3) Elektrotechnik

Natürliches und künstliches Licht bildet einen wichtigen Bestandteil für die Qualität und Wahrnehmung von Architektur, warum auch der Input der Fachplaner aus dem Gebiet der Elektrotechnik in einem frühen Planungsstadium in den architektonischen Entwurf einfließen sollte. Grundsätzlich soll durch ein nachhaltiges Beleuchtungs- bzw. Belichtungskonzept die künstliche Beleuchtung in diesem Projekt soweit wie möglich vermieden werden. Laut der Internationalen Energieagentur (IEA) ist die Beleuchtung für ca. 15% des weltweiten Stromverbrauchs und 5% der Treibhaus Emissionen verantwortlich.<sup>127</sup>

Für die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) ist dieses Thema, auf Grund seines hohen Potentials zur Effizienzsteigerung, mitunter ein Schwerpunkt und klassifiziert Beleuchtung wie folgt <sup>128</sup>:

- **Funktionale Qualität:**
  - Einflussnahme der Nutzer
  - Lichtsteuerung
  - Tageslichtverfügbarkeit
  - Sichtverbindung nach Außen
  - Schutz vor Blendung (Tages- & Kunstlicht)
  - Gute Farbwiedergabe
  - Besonnung

---

<sup>127</sup> Vgl. Nachhaltige Beleuchtung, 20.10.2017.

<sup>128</sup> Ebda

- **Ökologische Qualität:**  
-Energieeffizienz der Beleuchtung
- **Ökonomische Qualität:**  
-Kosteneffizienz der Beleuchtung

Ziel ist es durch das Zusammenführen von Disziplinen bzw. den daraus erkenntlichen Nutzen der entstehenden Synergieeffekte ziehen, um die Architektonische Wirkung mit Aspekten der Nachhaltigkeit zu verbinden. Es muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass die nicht verbrauchte Energie, die beste alternative Energiequelle darstellt. Der ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. bewertet das Potential zur Stromeinsparung bei elektrischen Geräten und Prozessautomation in Deutschland bei 80 Milliarden Kilowattstunden pro Jahr. <sup>129</sup>

Energieverbrauch im Lebenszyklus in % :

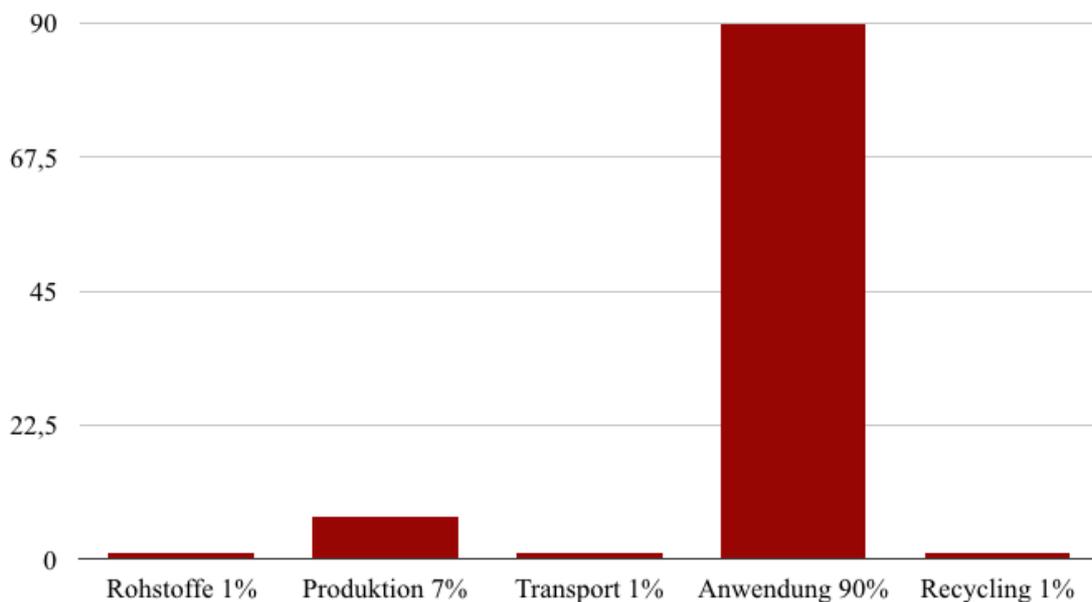


Abb.072

<sup>129</sup> Vgl. Nachhaltige Beleuchtung, 20.10.2017.

#### 4.6.3.1) Sonnenenergie

Die Orientierung und die Gebäudeform, sollen Ihre Möglichkeiten auch hinsichtlich einer zusätzlichen sauberen Energiegewinnung nutzen. Im Fall der in Nord-Süd Richtung ausgerichteten Riffelung des Faltdwerks, sollen die nach Süden orientierten Flächen zur zusätzlichen Energieversorgung genutzt werden. Hier wird sich an der Technik der Photovoltaik bedient, welche die Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie ermöglicht. Da die Form unseres Baukörpers diesen Synergieeffekt bietet und in dem in der Masterthesis behandelten Produktionsprozess, Strom die einzig benötigte Energieform darstellt, ist es unumgänglich das Gebäude selbst in die Stromproduktion unterstützend miteinzubeziehen.

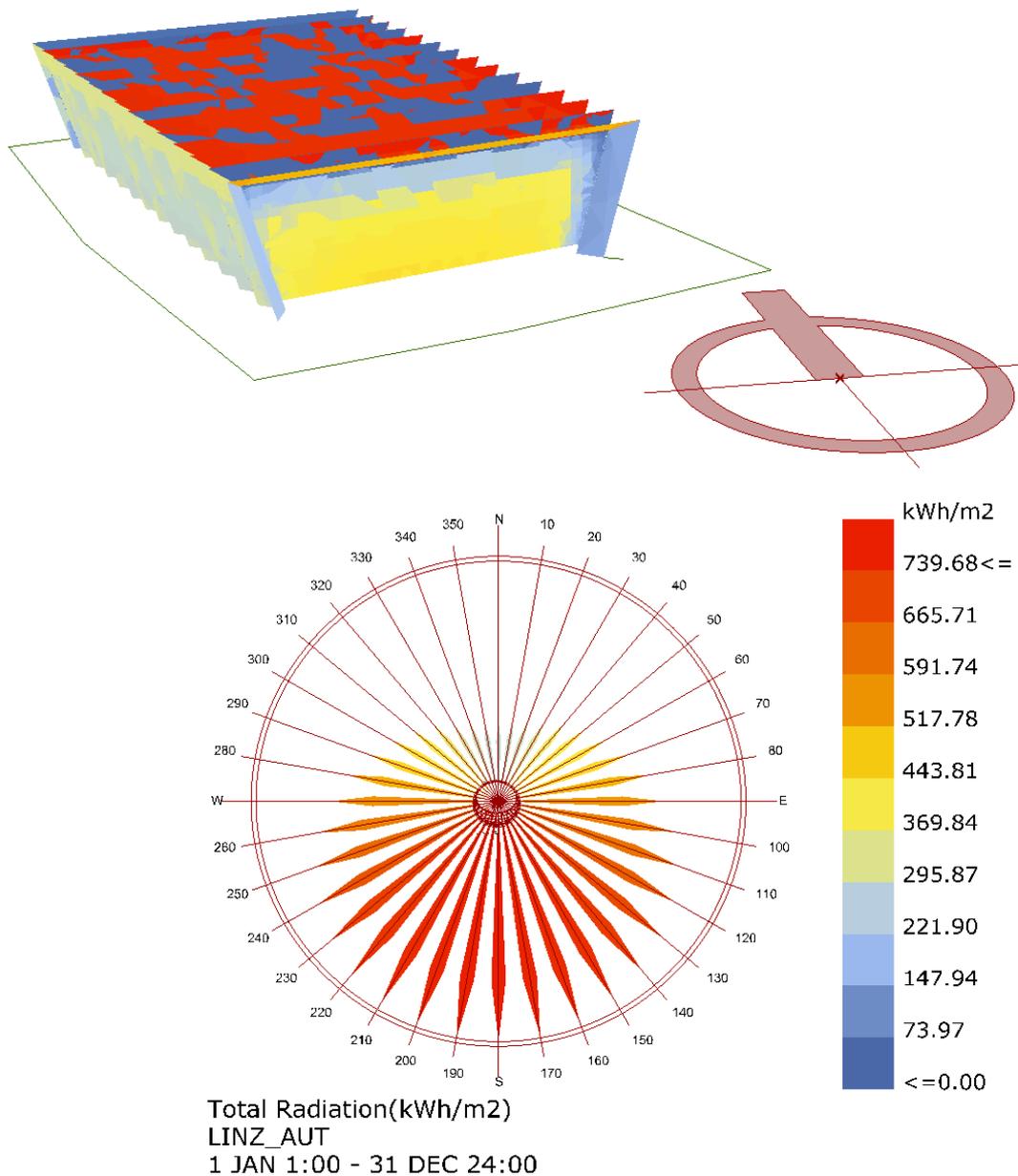


Abb.073

#### 4.6.3.2) Beleuchtungstechnik

Ein Weg zur Einsparung von Primärenergie, wäre für die notwendige künstliche Beleuchtung der Einsatz modernster Technik (LED) und einer bedarfsgerechten Steuerung.

Lichtquellen im Vergleich:

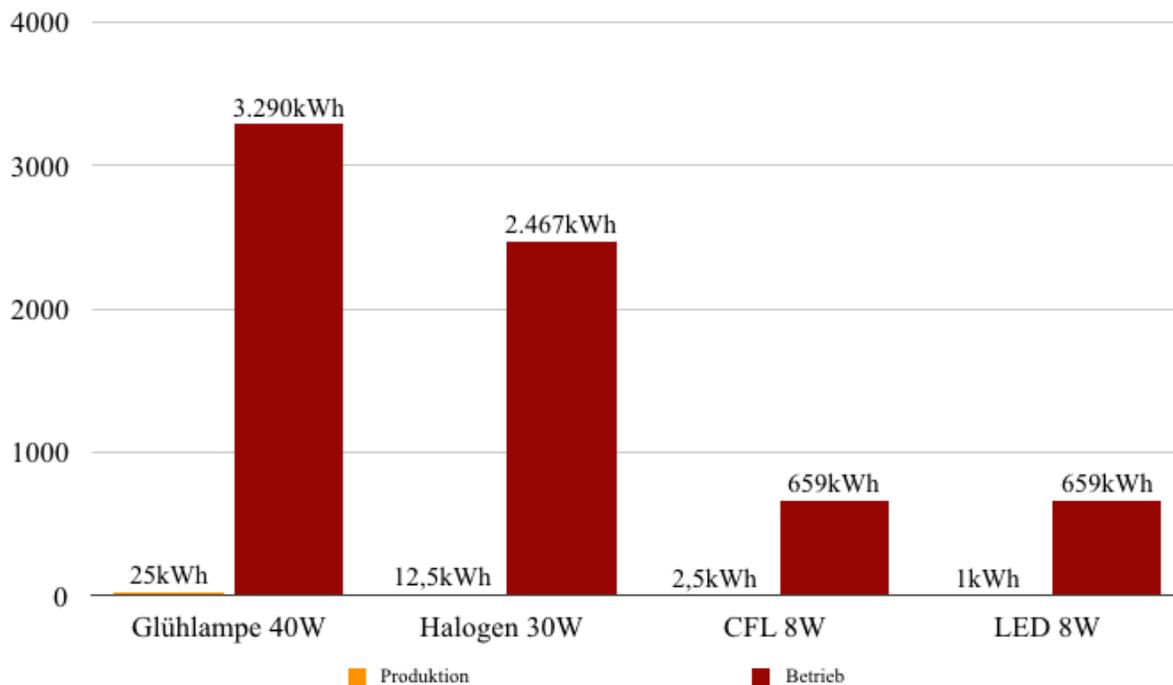


Abb.074

Wie in der oberen Grafik ersichtlich, entsteht durch den Einsatz von modernster Beleuchtungstechnik, ein sehr hohes Potential zur Einsparung von Primärenergie. Neben diesen Effekten bieten LED (lichtemittierende Dioden) noch folgende weitere Vorteile:<sup>130</sup>

- Energiesparend
- Hohe Lichtqualität
- Lange Lebensdauer
- Vermeidung von Lichtimmissionen
- Gute Ökobilanz (90% der CO<sub>2</sub> Emissionen entstehen erst im Betrieb, nur 2% für Produktion – siehe unten stehende Grafik)

<sup>130</sup> Vgl. Nachhaltige Beleuchtung, 20.10.2017.

Lichtmanagement ist neben dem Fachwissen der Elektro- bzw. Beleuchtungstechnik, auch auf die Kompetenzen der EMSR angewiesen und ermöglicht:<sup>131</sup>

- Vernetzung der unterschiedlichen Geräten
- Variable Lichtszenen
- Abstimmung auf das Tageslicht
- Präsenzkontrolle

Die Elektronische Steuerung bietet ein Einsparpotential des Energieverbrauchs von bis zu 70%. Professionelle Lichtplanung (bedarfsgerecht-Arbeitsstättenverordnung) ist im Entwurfsprozess notwendig.<sup>132</sup>

#### 4.6.3.3) Beleuchtungskonzept

Grundsätzlich gilt es bei jedem Baukörper, welcher energetisch optimiert errichtet werden soll, die Orientierung auf dem Grundstück bereits im Entwurfsprozess zu beachten, um unnötige bauliche Maßnahmen zu vermeiden. Im Industriebau hat sich eine Nord-Süd Ausrichtung bewährt, um das Tageslicht überwiegend über Norden ins Gebäudeinnere zu bringen und gleichzeitig das Blenden bzw. eine Überhitzung zu vermeiden. Erst nach der Ausrichtung am Grundstück sollte man über vernetzte und intelligente Bauteile nachdenken, welche den Baukörper zusätzlich über eine Regulierung zu einer optimalen Tageslichtausbeute führen. Im Projekt sollen durch die Form des Faltdachs, die nach Süden ausgerichteten und bei Bedarf zu öffnenden Flächen, auch solare Gewinne erzielen. Die nach Arbeitsstättenverordnung bzw. OIB-Richtlinie verordneten Helligkeiten der Arbeitsplätze, sollen mittels sensorgesteuerten Leuchten, automatisch an den natürlichen Lichteinfall angepasst werden. Zusätzlich sollen Präsenzmelder dafür sorgen, dass die künstliche Beleuchtung nur dann aktiviert sein soll, wenn sie tatsächlich benötigt wird. Dies führt zu einem hohen Nutzerkomfort bei einem minimalen Energieverbrauch. Eine Vernetzung mit der weiteren Technischen Gebäudeausrüstung, soll über eine gemeinsam genutzte Schnittstelle die Beleuchtung mit den Gewerken der HKLS (Heizung, Kühlung, Lüftung und Sanitär) zentral zusammenführen.<sup>133</sup>

---

<sup>131</sup> Vgl. Nachhaltige Beleuchtung, 20.10.2017.

<sup>132</sup> Ebda

<sup>133</sup> Ebda

## 5.) Gesamtdarstellung des Industriebau 4.0

In diesem Projektstadium werden nun alle fertig ausgearbeiteten Konzepte, welche über die synergetische Planung bereits miteinander vernetzt sind, vom Architekten in der Gesamtdatei koordiniert und für den Bauherrn zusammen dargestellt werden. Auf Grund der Nutzung von zeitgemäßen Planungswerkzeugen, wurde ein Gebäude entwickelt, dass für Architekten und Ingenieure gleichermaßen interessant ist und deren Know How nach außen hin sichtbar macht.

Stetige Optimierungen in der Planung, insbesondere durch das Nutzen von Synergien diverser Gewerke, schufen ein im Vergleich zum konventionellen Industriebau, energieeffizientes Gebäude. Es wurde ein rundum nachhaltiges Konzept entwickelt, welches bereits bei der Wahl des Standorts (kurze Transportwege), der Herkunft und Herstellung der Baumaterialien (Graue Energie) Rücksicht nahm und bis hin zur einer wandelbaren Gebäudestruktur (fünf Schlüsselfaktoren) führte.

Das Ergebnis zeigt ein Gebäude, welches als Prototyp für ein Gebäude der Industrie 4.0 stehen soll. Es spiegelt Megatrends der Digitalisierung und der Energiewende in seinem architektonischen Ausdruck wieder und ist repräsentativ für die fortschrittliche Zeit der Industrie 4.0.

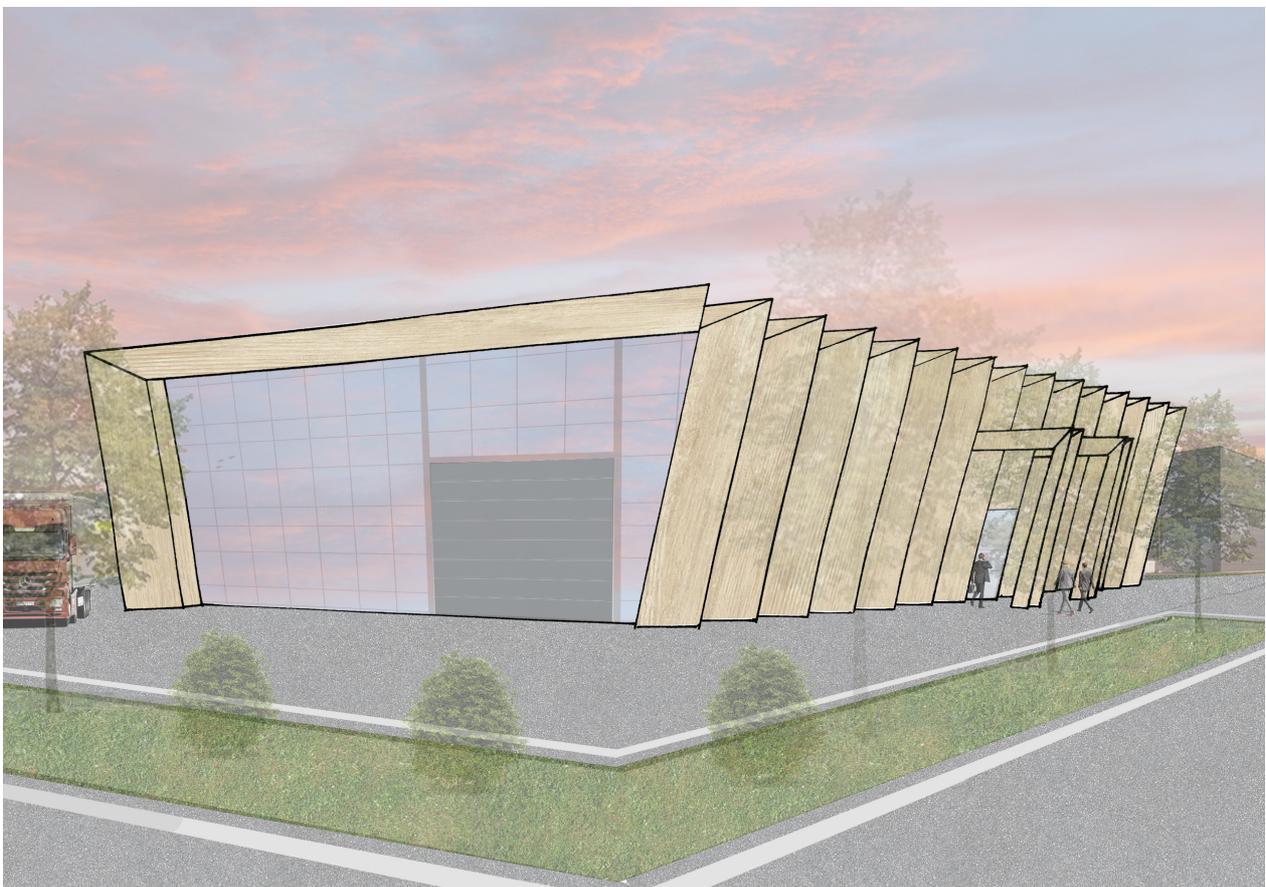


Abb.075

## 5.1) Synergie Produktion – Energie – Konstruktion – Design

Wie in den einzelnen Punkten zuvor beschrieben, hatte die Optimierung durch die Nutzung von Synergien eine sehr hohe Priorität, um einen zeitgemäßen Bau für die Industrie 4.0 zu konzipieren. Dies wirkt sich gleichermaßen auf die Produktion, die Energie, die Konstruktion und das Design des Gebäudes aus.

Nachdem der Standort für den Neubau fest stand, wurde die Planung der Produktion, welche durch individuelle Produkte einer hohen Anpassungsfähigkeit bedarf, detailliert und gesinnte sich wieder auf den Leitspruch der Lean Production: „Werte schaffen ohne Verschwendung“.

Nachdem die Anforderungen der Produktion definiert wurden (Materialflüsse, Maschinenaufstellungen, etc.), wurden diese Daten mittels Algorithmic Modeling digitalisiert und in den Entwurfsprozess des Architekten integriert. Es wurde die Produktion mit den Rahmenbedingungen des Standorts vernetzt und auf die individuelle Anforderungen des Grundstücks (baurechtlichen Parameter) angepasst.

Mit diesen Daten als Basis startete die integrale Planung, mit der Anwendung von Building Information Modeling und einem Datenaustausch über Server, zu einem gemeinsamen Modell. Durch diese eng vernetzte Zusammenarbeit und dem Miteinbeziehen, von unterschiedlichsten Fachplanern, in den Entwurfsprozess, entwickelte sich ein Industriebau, welcher seine Energieeffizienz, seine Konstruktion und sein Design durch das Nutzen von Synergieeffekten erreichte.

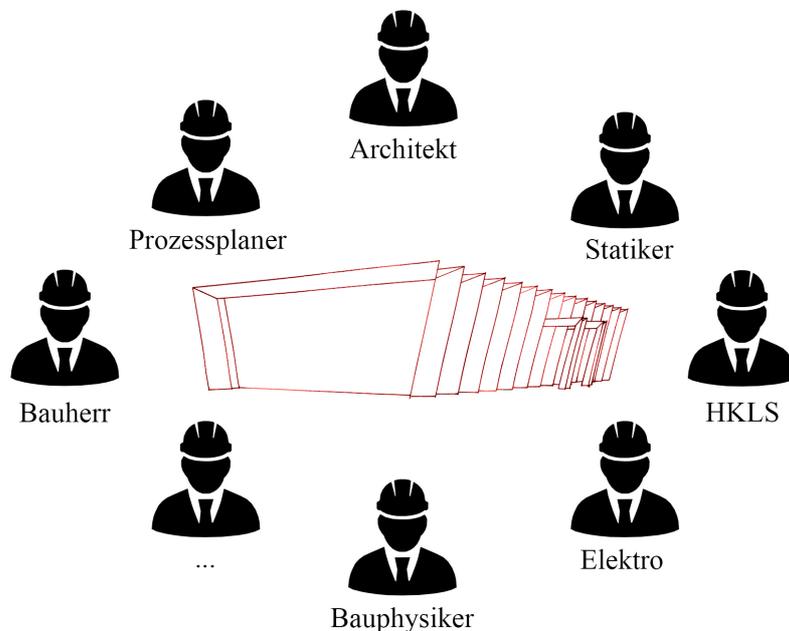


Abb.076

## 5.2) Wandelbare Fabrik

Das Gebäude reagiert auf die steigende Individualisierung und sich schnell verändernde Marktsituationen. Diese Anforderung wurde neben der smarten vollautomatischen Produktion, auch über einen freien Grundriss und leicht anpassbare Medienebenen erreicht. Des Weiteren lässt die Gebäudestruktur, auch eine Erweiterung in Längsrichtung zu, was bei einem Erweiterungsszenario, oder einer Sanierung des Bestandes, eine direkte Verbindung zulassen würde.

Die Büroebene für administrative Tätigkeiten, Besprechungen und Technikbereiche, wurde direkt in den Raum der Produktion integriert. Dies soll die fortschrittliche Entwicklung und den Kern des produzierenden Unternehmens für Mitarbeiter und Besucher spürbar machen.

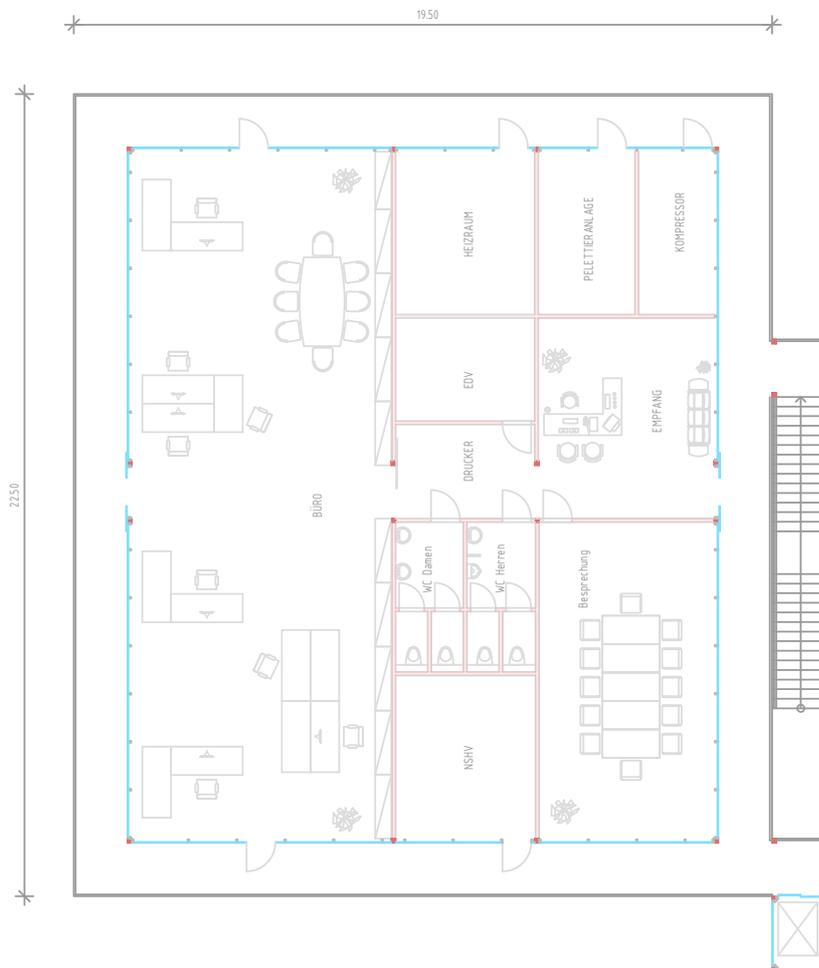


Abb.077



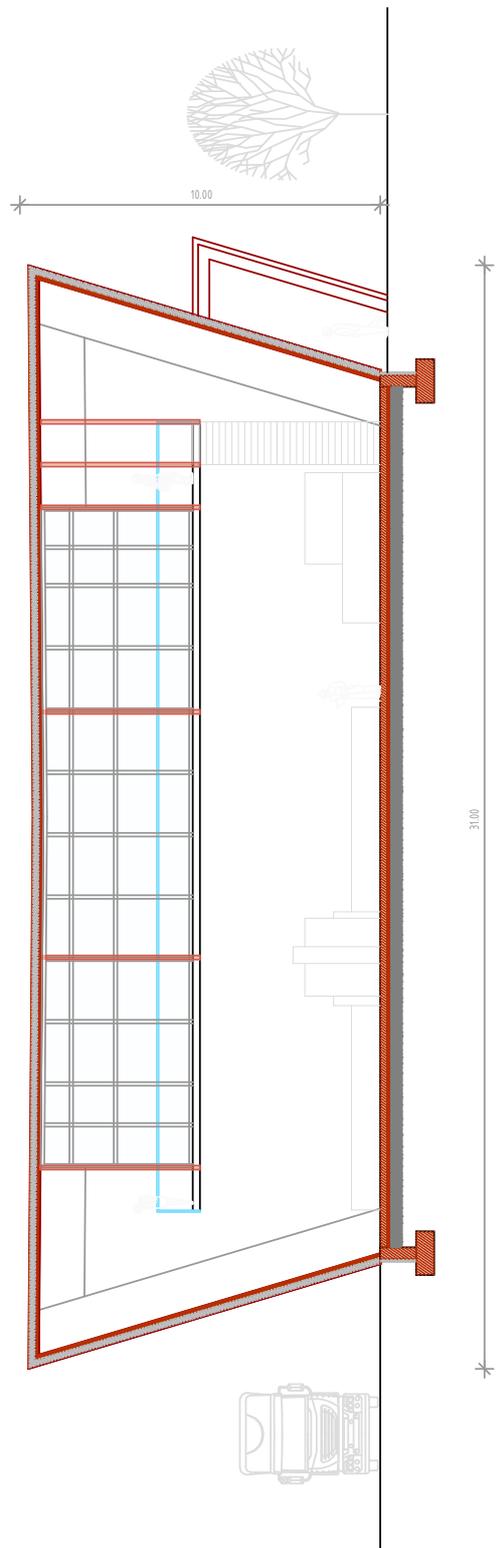
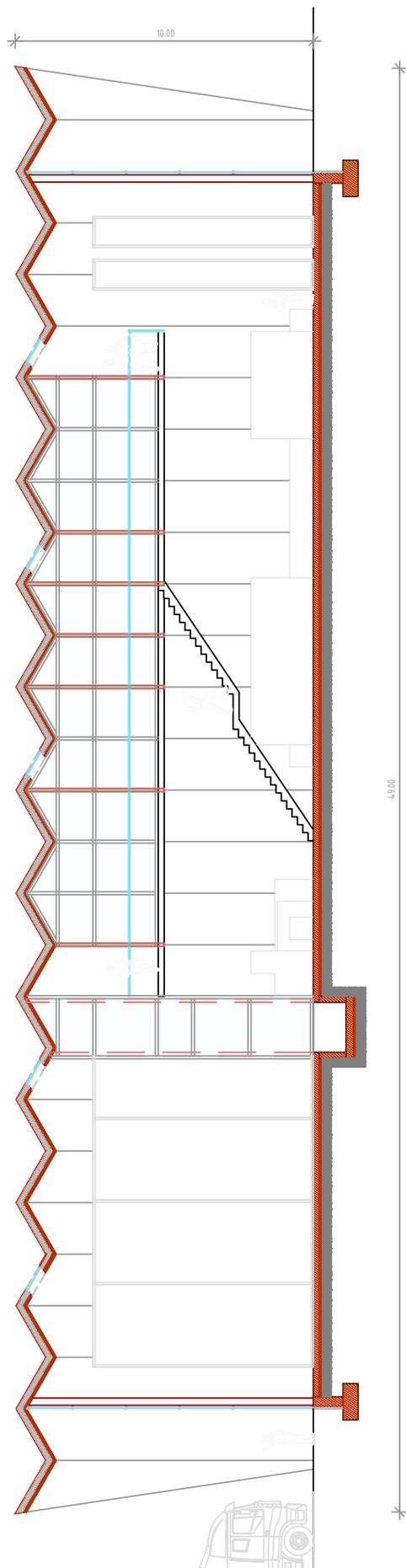


Abb.079

### 5.3) Energiebedarf

Durch die Orientierung, die Form und die Konstruktion des Gebäudes, sollen die baulichen Maßnahmen für die Technische Gebäudeausrüstung auf das Notwendigste reduziert werden. Hier muss man wieder auf den Grundsatz verweisen, dass die nicht verbrauchte Energie, die beste alternative Energiequelle darstellt. An all jenen Stellen wo Technische Anlagen notwendig sind, sollen bedarfsgerechte, über Sensoren intelligent vernetzte, Konstruktionen zur Anwendung kommen.

Die im konventionellen Industriebau bewährte Nord-Süd Ausrichtung, wird auch im Gebäude für die vierte industrielle Revolution, zur Anwendung kommen, jedoch neu interpretiert. Die natürliche Belichtung bzw. auch Belüftung wird über die nach Norden gerichteten Faltungen erfolgen um eine Überhitzung zu vermeiden. Die nach Süden ausgerichteten Flächen der Faltungen, werden mit PV-Modulen versehen, um den einzigen Energiebedarf der Produktion (Strom), mit einer Eigenproduktion zu unterstützen.

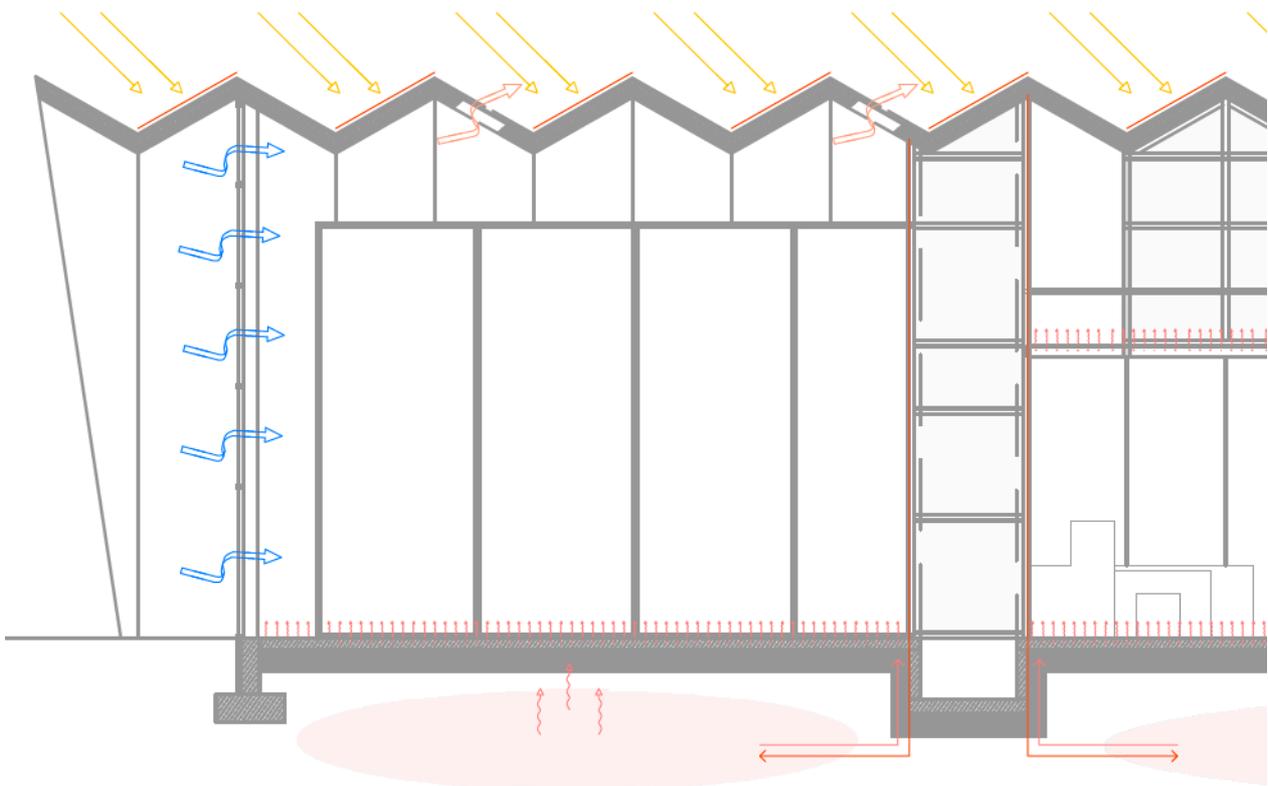


Abb.080

Der Strombedarf der Produktion wird in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Funktion	Anz.	Leistung	Ges.leistung	Volllaststunden	Verbrauch / a
Kappsäge	1	15 kW	15	900	3h/d - 300d/a 13500
Hobelmaschine	3	5,5 kW	16,5	2700	9h/d - 300d/a 44550
Lackieranlage	1	11 kW	11	2700	9h/d - 300d/a 29700
Verpackungsanl.	1	4,5 kW	4,5	2700	9h/d - 300d/a 12150
			58 kW		99900 kWh

Das Ergebnis zeigt einen Strombedarf von 99.900 kWh pro Jahr, welcher über die Gebäudeinterne Photovoltaik Anlage gedeckt sein soll. Die nach Süden ausgerichteten Flächen der Faltungen ergeben eine zur Verfügung stehende Fläche von 862 m<sup>2</sup>, von denen 703 m<sup>2</sup> für die PV-Module (lt. Daten des klimaaktiv Rechners <sup>134</sup>) der benötigt werden. Die gesamte Anlage, welche sich aus 429 Modulen mit einem Wirkungsgrad von rund 14 %, zusammensetzt, hat eine Leistung von 103kWp und führt zu einem Energieertrag von 99.793kWh/a. Dies bedeutet, dass der Energiebedarf der Produktion, vom Gebäude selbst gedeckt wird.

#### 5.4) Vergleich zur Konventionellen Bauweise

*„Hört endlich auf, weiterhin so zu bauen, wie Ihr baut!“ Frei Otto, 1977*  
<sup>135</sup>

Neben dem energieeffizienten Betrieb, welcher bautechnisch über gute U-Werte und gebäutechnisch über bedarfsorientierte Energieströme gewährleistet ist, gibt es einen weiteren Faktor für einen nachhaltigen Baukörper, welcher im konventionellen Industriebau stark vernachlässigt wird. Die graue Energie bezeichnet den Primärenergiegehalt, der für die Herstellung der Baumaterialien und Konstruktionen notwendig ist und dieser wird in den nachfolgenden Tabellen berechnet.

<sup>134</sup> Photovoltaik-Rechner, 21.05.2018.

<sup>135</sup> Vgl. Nachhaltigkeit, 02.11.2017.

Die Werte des Primärenergiebedarfs (PEI, kWh/m<sup>3</sup>) stammen aus den, in der Masterarbeit zuvor beschriebenen Tabellen, der Projektplattform Energie der TU München.<sup>136</sup>

Konventionelle Bauweise:



Abb.081

<b>Material</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>Material PEI kWh/m<sup>3</sup></b>	<b>Bauteil PEI kWh/m<sup>3</sup></b>
Sauberkeitsschicht	12,6	315	3969
Mono. Bodenplatte	379,75	315	119621,25
Fundamentbeton	63	315	19845
Köcher	24,2	315	7623
Stützen	50,4	315	15876
Träger	85,7	315	26995,5
Frostschürze	140	315	44100
Bewehrung	11,4	22192	252988,8
Paneel Dämmung	115,2	766	88243,2
Paneel Blech	2,3	64947	149378,1
Trapezblech	3,9	64947	253293,3
Flachdach Dämmung	303,8	510	154938
			<b>1136871,15</b>

<sup>136</sup> Vgl. Schneider/Pfoh/Grimm, Projektplattform Energie - Leitfaden 01, 09.11.2017.

## Industriebau 4.0:

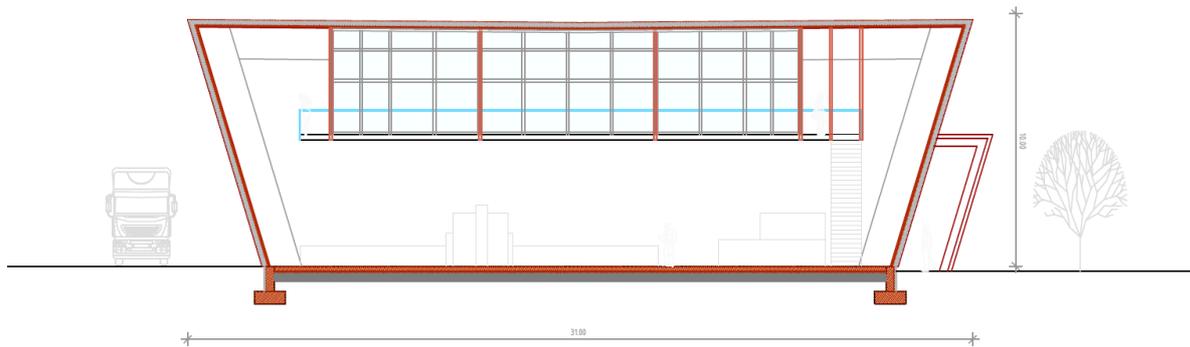


Abb.082

Material	m3	Material PEI kWh/m3	Bauteil PEI kWh/m3
Sauberkeitsschicht	12,6	315	3969
Streifenfundament	63	315	19845
Sockel	24,2	315	7623
Mono. Bodenplatte	154,8	315	48762
Bewehrung	13,1	22192	290715,2
Zellulosedämmung	154,8	41	6346,8
Brettschichtholz	154,8	1379	213469,2
			<b>590730,2</b>

Ob man den geforderten U-Wert mit einer Zellulosedämmung oder einem PU Dämmstoff erreicht, spielt in der Phase des Betriebs keine Rolle, da beide Dämmstoffe einen Lambda Wert von ca.  $0,04 \text{ W/mK}^{137}$  aufweisen. Wenn man jedoch den gesamten Lebenszyklus betrachtet, gibt es hier ein hohes Potential zur Optimierung, was in dem oben stehenden Vergleich des Bedarfs an Primärenergie in der Herstellung, zwischen der herkömmlichen Bauweise und dem Entwurf der Masterarbeit, verdeutlicht wird.

Die Tabellen zeigen eine Massenaufstellung der Tragstruktur und Hüllflächen, mit den dazugehörigen Materialeabhängigen Primärenergiebedarf der Herstellung, um diesen für die einzelnen Bauteile zu berechnen. Das Ergebnis zeigt eine Gegenüberstellung von  $1.136.871,15 \text{ kWh/m}^3$  (konventionelle Bauweise) zu  $590.730,2 \text{ kWh/m}^3$  (Industriebau 4.0), was einen beinahe zweifachen Primärenergiebedarf der herkömmlichen Bauweise ergibt.

<sup>137</sup> U-Wert Rechner, 21.05.2018.

Wenn man dieses Einsparpotential sieht, bekommt das oben stehende Zitat aus dem Jahr 1977 von Frei Otto, mit der Aussage, dass wir in unserer Bauweise etwas ändern müssen, erneut eine sehr hohe und aktuelle Bedeutung.

#### 5.5) Kosten & Bauzeit

Allen innovativen und energetisch wertvollen Konzepten zum Trotz, zählen für die tatsächliche Entscheidung ob ein Projekt realisiert werden soll, oftmals die Zahlen. Der in dieser Masterarbeit entwickelte Prototyp für einen Industriebau 4.0, muss also auch hinsichtlich der Baukosten und der Bauzeit Wettbewerbsfähig sein.

Das entwickelte Gebäude besticht durch seine, im Sinne der „Lean Production“, schlanken Bauweise und kann auch hinsichtlich Kosten und Bauzeit punkten. Die Ressourcensparende Konstruktion erfüllt nicht nur Kriterien eines niedrigen Primärenergiebedarfs, sondern macht sich auch durch geringere Massen bei den Baukosten bemerkbar. Der hohe Grad der Vorfertigung und der Einsparung einzelner Arbeitsschritte unterschiedlicher Gewerke, verkürzt auch die Bauzeit und vereinfacht die generelle Ausführung des Industriebaus.

## 5.6) Ausblick

### 5.6.1) Baustelle 4.0

Das BIM Modell soll die Basis eines miteinander vernetzten digitalen Prozesses darstellen, der auch auf der Baustelle zur Anwendung kommt. Wie bereits zuvor in der Masterthesis beschrieben wurde, können die digitalen Daten des Modells für den Herstellungsprozess in der Vorfertigung genutzt werden. Der nächste logische Schritt wäre es deshalb, das Modell des Architekten während des Bauzeitraums zu verwenden, mit dessen Hilfe man Mengen, Kosten, Ressourcen und die Bauzeit auswertet bzw. das Modell als Grundlage für eine gemeinsame Kommunikation mit allen Projektbeteiligten nutzt.

Da das Zentralmodell alle einzelnen Modelle der Fachplaner vernetzt, können zum Beispiel die Bauprozesse terminplangerecht visualisiert und für Optimierungen herangezogen werden. Ein solcher Prozess ist in der Fabrikationsplanung der Industrie fester Bestandteil und wird für das Aufdecken zeitlicher Kollisionen der unterschiedlichen Gewerke genutzt.

Wenn dies noch mit Daten von Baustoffen, Ressourcen und Maschinen ergänzt wird, so spricht man von 5D-BIM und man kann den gesamten Bauablauf vorab simulieren und Optimierungen z.B. bei der Logistik treffen. Wird dieser Prozess während der Realisierung von Bauvorhaben mit dem laufenden Baufortschritt aktualisiert, so können stets Daten der jeweiligen Projektphase generiert werden und den Baufortschritt hinsichtlich transparenten wirtschaftlichen und technischen Informationen erleichtern.<sup>138</sup>

### 5.6.2) Echtzeitdaten

Die Gebäudedatenmodelle, welche von Architekten und Ingenieuren im Zuge der Planung erstellt werden, sollen nicht nur für die Ausführung des Baus verwendet werden, sondern in weiterer Folge auch für den Betrieb. Das BIM Modell bietet also die Grundlage eines digitalen Abbilds der Realität, welches Informationen für den gesamten Lebenszyklus des Industriebaus liefert. Autodesk zeigt mit dem Research-Projekt "Project Dasher", wie das Modell für das Energiemonitoring während des Betriebs genutzt werden kann und wertvolle Echtzeit-Daten für das Facility Management generiert. Durch diese Informationen könnte der Industriebau während der Produktion weiter optimiert werden. Dies bedeutet, dass ein nachhaltiges Gebäude niemals über starre Werte ein Ideal erfüllen kann, sondern immer über einen dynamischen Prozess, in welchem die sich verändernden Daten des Betriebs, eine zentrale Rolle spielen.<sup>139</sup>

---

<sup>138</sup> Vgl. Behaneck, Baustelle 4.0: Erst digital, dann real bauen, 15.11.2017, 03.12.2017.

<sup>139</sup> Vgl. Mogk, What happens when BIM meets the IoT?, 17.09.2015, 10.12.2017

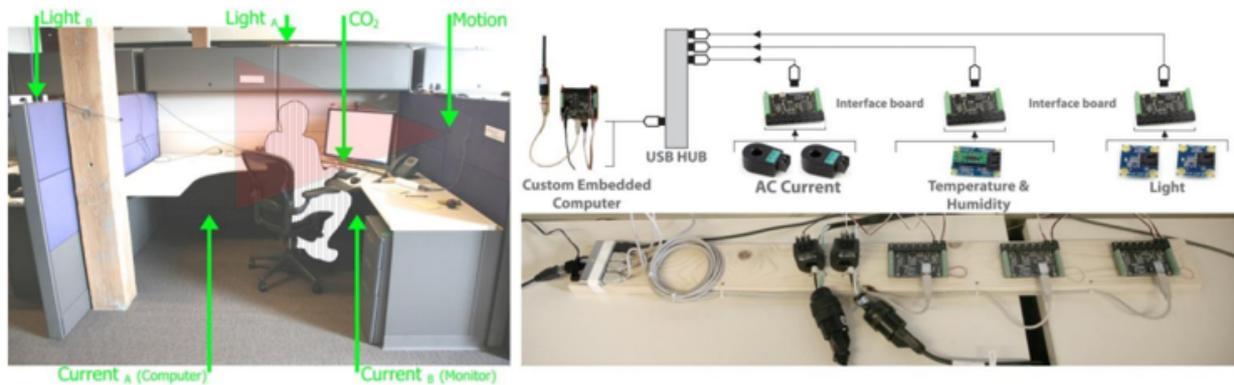


Abb.083

Traditioneller Weise wird der Energiebedarf über Simulationen bestimmt und nach diesen Ergebnissen optimiert. Ziel muss es sein, die Daten dieser Simulationen zwar als Basis zu verwenden, aber während des Betriebs bzw. der Produktion des Industriebaus mit Echtzeitdaten aus der Gebäudeleittechnik und deren Sensoren zu ergänzen, um weitere Maßnahmen zur Optimierung zu ermöglichen. So sollen z.B. Werte wie Temperatur, Druck, Feuchte und Energieverbrauch von Maschinen visualisiert werden, bzw. gemeinsam mit dem Nutzerverhalten (Sonnenschutz geschlossen, Fenster geöffnet, etc.) analysiert werden.<sup>140</sup>

Die Herausforderung ist es eine organisierte Auswertung und Kommunikation der Daten zu ermöglichen um die Energiebilanz eines Gebäudes nachhaltig zu verbessern. BIM-Plattformen wie, das auch in der Masterthesis verwendete Programm Revit, stellen laut dem “Project Dasher” die ideale Grundlage dafür her, da diese zentral gesammelt und unter anderem in 3d dargestellt werden können.<sup>141</sup>

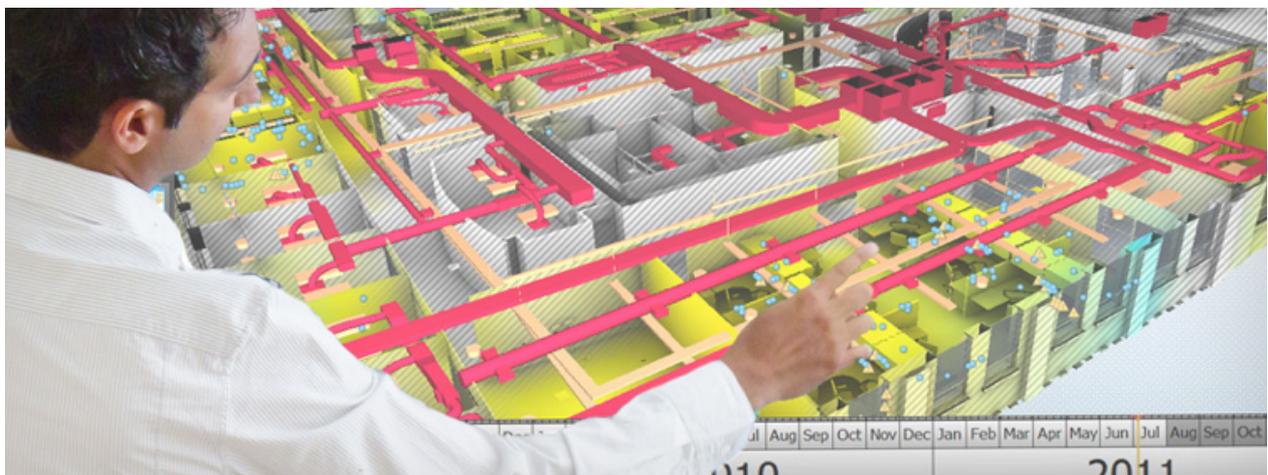


Abb.084

<sup>140</sup> Vgl. Mogk, What happens when BIM meets the IoT?, 17.09.2015, 10.12.2017

<sup>141</sup> Vgl. Walmsley, Project Dasher, 14.12.2017.

Dies führt auch dazu, dass die Verantwortung beim Architekten liegt eine Basis zu schaffen, um das Modell als digitalen Zwilling über den gesamten Lebenszyklus zu verwenden um das “Building Information Modeling (BIM)” mit dem “Internet of Things (IoT)” zu verbinden.

### 5.6.3) Augmented Reality

Augmented Reality (AR) ist eine neue Technologie, welche ein Verschmelzen von virtuellen Daten mit der realen Welt ermöglicht. Wenn man die Möglichkeiten eines BIM Modells über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes betrachtet, erkennt man schnell, dass die vom Architekten generierten Modelle für die Weiterverwendung im Facility Management hervorragend geeignet sind. Mit der Nutzung von mobilen Endgeräten wie Tablets oder Datenbrillen, wird die gebaute Realität, mit einer Visualisierung der gespeicherten Daten angereichert. Diese Daten können alphanumerische, grafische und multimediale Informationen beinhalten, welche als Anleitungen genutzt werden, Prozesse erleichtern können oder bei Entscheidungsfindungen helfen.

Bereits bei der Übergabe des Gebäudes an den Betreiber kann Augmented Reality genutzt werden, um Abweichungen mit der Planung zu überprüfen, indem man die gebaute Realität mit dem Digitalen Zwilling (BIM Modell) hinterlegt. In weiterer Folge können die Betreiber sämtliche Objektdaten abrufen und Informationen zu technischen Daten bzw. Instandhaltungshistorien anzeigen.<sup>142</sup>



Abb.085

---

<sup>142</sup> Vgl. Ellmer/Salzmann/May, Augmented Reality: Mehr sehen und verstehen, 11.12.2017

# Abbildungsverzeichnis

**Abb. 001:** Industrielle Revolutionen - Quelle:

<https://www.complan.de/index.php/home/best-practice-im-zeitalter-von-industrie-4-0>

**Abb. 002:** Statistik Treibhausgasemissionen - Eigene Darstellung, Quelle:

DETAIL Green Books - Lenz, Bernhard; Schreiber, Jürgen; Stark, Thomas | Nachhaltige Gebäudetechnik: Grundlagen, Systeme, Konzepte | Mai. 2010

**Abb. 003:** Intelligent ist alles und alles ist vernetzt - Eigene Darstellung

**Abb. 004:** Lean Production - Eigene Darstellung, Quelle:

Springer - Schuh, Günther | Lean Innovation | Okt. 2013

**Abb. 005:** Wachsende Komplexität - Eigene Darstellung, Quelle:

[https://www.researchgate.net/profile/Peter\\_Burggraef/publication/280573989\\_Fabrikplanung\\_-\\_Forschung\\_Innovative\\_Fabriken\\_interdisziplinar\\_planen/links/55bb43b208aed621de0afb8f/Fabrikplanung-Forschung-Innovative-Fabriken-interdisziplinaer-planen.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Peter_Burggraef/publication/280573989_Fabrikplanung_-_Forschung_Innovative_Fabriken_interdisziplinar_planen/links/55bb43b208aed621de0afb8f/Fabrikplanung-Forschung-Innovative-Fabriken-interdisziplinaer-planen.pdf)

**Abb. 006:** Deutschlands Endenergieverbrauch Gesamt & Industrie - Eigene Darstellung, Quelle:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/4\\_abb\\_eev-sektoren-et\\_2017-02-17.png](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/4_abb_eev-sektoren-et_2017-02-17.png)

**Abb. 007:** Stromerzeugung Erneuerbare Energie - Eigene Darstellung, Quelle:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/4\\_abb\\_stromerzeugung-ee\\_2017-09-29.png](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/4_abb_stromerzeugung-ee_2017-09-29.png)

**Abb. 008:** Building Information Modeling - Eigene Darstellung

**Abb. 009:** Bereiche Informations- / Datenaustausch - Eigene Darstellung, Quelle:

[https://www.rolandberger.com/de/Publications/pub\\_digitization\\_of\\_the\\_construction\\_industry.html](https://www.rolandberger.com/de/Publications/pub_digitization_of_the_construction_industry.html)

**Abb. 010:** BIM Struktur - Datenaustausch - Eigene Darstellung, Quelle:

[https://products.office.com/de-AT/compare-all-microsoft-office-products?tab=2&OCID=AID672706\\_SEM\\_pwAnUGbl&lnkd=Google\\_O365SMB\\_NI](https://products.office.com/de-AT/compare-all-microsoft-office-products?tab=2&OCID=AID672706_SEM_pwAnUGbl&lnkd=Google_O365SMB_NI)

<https://www.autodesk.com>

**Abb. 011:** LOI / LOD - Eigene Darstellung, Quelle:

<http://www.bim-blog.de/bim-praxisleitfaden-1-0/>

**Abb. 012:** Digitale Transformation - Eigene Darstellung, Quelle:  
<https://www.rolandberger.com/de/press/Digitalisierung-der-Baubranche.html>

**Abb. 013:** Simulationen über Algorithmic Modeling - Quelle:  
<http://www.ladybug.tools/index.html>

**Abb. 014:** Funktionen Ladybug - Eigene Darstellung, Quelle:  
<http://www.ladybug.tools/ladybug.html>

**Abb. 015:** Funktionen Honeybee - Eigene Darstellung, Quelle:  
<http://www.ladybug.tools/honeybee.html>

**Abb. 016:** Funktionen Butterfly - Eigene Darstellung, Quelle:  
<http://www.ladybug.tools/butterfly.html>

**Abb. 017:** Funktionen Dragonfly - Eigene Darstellung, Quelle:  
<http://www.ladybug.tools/dragonfly.html>

**Abb. 018:** Ablaufplan - Eigene Darstellung, Quelle:  
<https://www.autodesk.com>  
<https://www.ladybug.tools>

**Abb. 019:** Industriestandort Oberösterreich - Eigene Darstellung, Quelle:  
<http://www.ihrzubehoer.at/home/index.php/beratung-in-oesterreich/oberoesterreich>

**Abb. 020:** Lageplan - Eigene Darstellung, Quelle:

**Abb. 021:** Grasshopper Skript - Grundstück - Eigene Darstellung

**Abb. 022:** Grasshopper Skript - Grundgrenze - Eigene Darstellung

**Abb. 023:** Grasshopper Skript - Baurechtliche Parameter - Eigene Darstellung

**Abb. 024:** Grasshopper Skript - Mögliche Bebauung - Eigene Darstellung

**Abb. 025:** Klimadaten - Quelle:  
<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/klimaspiegel/jahr/linz/?jahr=2018>

**Abb. 026:** Industrieregionen - Eigene Darstellung, Quelle:  
<https://www.land-oberoesterreich.gv.at/Mediendateien/LK/PKStelzerStrugl2792017Internet.pdf>

**Abb. 027:** Bewaldung Oberösterreich - Eigene Darstellung, Quelle:

<https://www.land-oberoesterreich.gv.at/14885.htm>

**Abb. 028:** Infrastruktur - Eigene Darstellung, Quelle:

<https://www.land-oberoesterreich.gv.at/49303.htm#d53a5524-3f16-4295-9553-3cb8fd9d6c8b>

**Abb. 029:** Mensch & Maschine Interaktion - Eigene Darstellung, Quelle:

[http://diskurs.dradio.de/wp-content/uploads/2012/07/DISKURS@\\_mensch-maschine.png](http://diskurs.dradio.de/wp-content/uploads/2012/07/DISKURS@_mensch-maschine.png)

**Abb. 030:** Zulieferung - Eigene Darstellung, Quelle:

<http://www.fahrzeugbilder.de/name/galerie/kategorie/Neueste/hierarchie1/LKW/hierarchie2/Renault/digitalfotografie/312.html>

**Abb. 031:** Kappsäge - Eigene Darstellung, Quelle:

[http://www.holtec.de/de/produkte/paketkappsagen/modellreihe\\_vario\\_cut/paketwagen\\_shk.html](http://www.holtec.de/de/produkte/paketkappsagen/modellreihe_vario_cut/paketwagen_shk.html)

**Abb. 032:** Palettenager - Eigene Darstellung, Quelle:

<https://www.ssi-schaefer.com/de-de/produkte/lagern/palettenlagerung/palettenregale-9034>

**Abb. 033:** Hobelmaschine / Lackieranlage - Quelle:

<https://www.weinig.com/de/massivholz/hobelmaschinen-und-kehlmaschinen/powermat-serie.html>

<https://www.barberan.com/de/lackieranlagen/29-hochglanz-lackieranlage.html>

**Abb. 034:** Verpackungsanlage - Quelle:

<https://www.beck-packautomaten.com/en/maschinen/banderoliermaschinen.html?debug=1>

**Abb. 035:** Fahrerloses-Transport-System - Quelle:

<https://www.ssi-schaefer.com/de-at/produkte/foerdern-transportieren/fahrerlose-transportsysteme/fts-2store-48056>

**Abb. 036:** Grasshopper Skript - Maschinenaufstellung - Eigene Darstellung

**Abb. 037:** Prozess Linie Massivholz - Eigene Darstellung

**Abb. 038:** Prozess Linie MDF - Eigene Darstellung

**Abb. 039:** Grasshopper Skript - Materialfluss - Eigene Darstellung

**Abb. 040:** Raumorganisation - Eigene Darstellung

**Abb. 041:** Grasshopper - Produktionsprozess - Eigene Darstellung

**Abb. 042:** Grasshopper - Vernetzung Konstruktion & Produktion - Eigene Darstellung

**Abb. 043:** Grasshopper Skript - Anpassbare Produktion - Eigene Darstellung

**Abb. 044:** Grasshopper - Produktionsbedarf Szenario 1 - Eigene Darstellung

**Abb. 045:** Grasshopper - Produktionsbedarf Szenario 2 - Eigene Darstellung

**Abb. 046:** Grasshopper Skript - Referenz Bauwerk - Eigene Darstellung

**Abb. 047:** Fassadenschnitt Referenz Bauwerk - Eigene Darstellung

**Abb. 048:** PU-Paneel - Quelle:

[http://www.brucha.at/bilder/BRUCHAPaneel\\_FPP\\_S\\_6\\_2\\_6\\_2\\_9007.jpg](http://www.brucha.at/bilder/BRUCHAPaneel_FPP_S_6_2_6_2_9007.jpg)

**Abb. 049:** EPS-Dämmung - Quelle:

<https://www.energieheld.de/files/daemmung-styropor-polystrol-daemmstoff-neu.jpg>

**Abb. 050:** Stahlbeton - Quelle:

<https://civildigital.com/prefabricated-structures-prefabrication-concept-components-advantages-ppt/prefabricated-slab-to-beam-connection/>

**Abb. 051:** Stahlkonstruktionen - Quelle:

<https://www.bilka.ro/upload/images/tabla-cutata-t35-6551.jpg>

**Abb. 052:** Faltwerk Arten - Quelle:

[https://iam.tugraz.at/studio/w11\\_blog/wp-content/uploads/2011/11/faltwerke.pdf](https://iam.tugraz.at/studio/w11_blog/wp-content/uploads/2011/11/faltwerke.pdf)

**Abb. 053:** Grasshopper Skript - Faltwerk / Origami - Eigene Darstellung

[https://image.freepik.com/free-vector/origami-kissing-blue-orange-bird\\_254-2147486631.jpg](https://image.freepik.com/free-vector/origami-kissing-blue-orange-bird_254-2147486631.jpg)

**Abb. 054:** Faltwerk Konstruktion & Tragsystem - Eigene Darstellung

[https://iam.tugraz.at/studio/w11\\_blog/wp-content/uploads/2011/11/faltwerke.pdf](https://iam.tugraz.at/studio/w11_blog/wp-content/uploads/2011/11/faltwerke.pdf)

**Abb. 055:** Faltwerk statische Beanspruchungen - Eigene Darstellung

[https://iam.tugraz.at/studio/w11\\_blog/wp-content/uploads/2011/11/faltwerke.pdf](https://iam.tugraz.at/studio/w11_blog/wp-content/uploads/2011/11/faltwerke.pdf)

**Abb. 056:** Grasshopper Skript - Schneelasten - Eigene Darstellung

[http://www.ziegler-metall.at/.img/schneelast/schneelastzone\\_at.png](http://www.ziegler-metall.at/.img/schneelast/schneelastzone_at.png)

**Abb. 057:** CO2 Fußabdruck - Eigene Darstellung, Quelle:

<http://schwedenwand.de/massivholzhaus/wp-content/uploads/2017/03/co2-fussabdruck.jpg>

**Abb. 058:** Brettschichtholz - Quelle:

<http://www.proholz.at/forschung-technik/werkstoffportraits/die-holzmassivbauweise-am-beispiel-von-brettsperholz/>

**Abb. 059:** Detail Fußpunkt - Eigene Darstellung - Eigene Darstellung

**Abb. 060:** Industrieller Holzbau - Eigene Darstellung, Quelle:

[https://iam.tugraz.at/studio/w11\\_blog/wp-content/uploads/2011/11/faltwerke.pdf](https://iam.tugraz.at/studio/w11_blog/wp-content/uploads/2011/11/faltwerke.pdf)

**Abb. 061:** Schwalbenschwanz - Quelle:

<https://www.espazium.ch/uploads/55cc8f4d57241.pdf>

**Abb. 062:** Vorfertigung - Eigene Darstellung, Quelle:

<https://www.espazium.ch/uploads/55cc8f4d57241.pdf>

**Abb. 063:** Grasshopper Skript - Faltwerk Entwurf - Eigene Darstellung

**Abb. 064:** Grasshopper Skript - Faltwerk Entwurfszenarien - Eigene Darstellung

**Abb. 065:** Grasshopper Entwurfswerkzeug - Eigene Darstellung

**Abb. 066:** Referenzbau - Quelle:

<http://vidy.ch/en/le-theatre/nouveau-pavillon-en-bois>

**Abb. 067:** EMSR - Eigene Darstellung

**Abb. 068:** HKLS - Eigene Darstellung, Quelle:

<https://obo.ch/classification/de-ch/systeminformationen/systembeschreibung-kabelrinne-sks-mit-stiel-und-ausleger-3.html>

**Abb. 069:** Energiekonzept Winter / Sommer - Eigene Darstellung

**Abb. 070:** Pelletieranlage - Eigene Darstellung, Quelle:

[https://www.archweb.it/dwg/dwg\\_en.htm](https://www.archweb.it/dwg/dwg_en.htm)

**Abb. 071:** Grasshopper - Lüftungskonzept - Eigene Darstellung

**Abb. 072:** Energieverbrauch-Beleuchtung Lebenszyklus - Eigene Darstellung, Quelle:  
[http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen\\_Downloads/1506\\_1w20\\_Nachhaltigkeit\\_web.pdf](http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1506_1w20_Nachhaltigkeit_web.pdf)

**Abb. 073:** Grasshopper Sonnenenergie - Eigene Darstellung

**Abb. 074:** Lichtquellen Vergleich - Eigene Darstellung, Quelle:  
[http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen\\_Downloads/1506\\_1w20\\_Nachhaltigkeit\\_web.pdf](http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1506_1w20_Nachhaltigkeit_web.pdf)

**Abb. 075:** Schaubild Industriebau 4.0 - Eigene Darstellung

**Abb. 076:** Synergetische Planung - Eigene Darstellung, Quelle:  
<https://www.vectorstock.com/royalty-free-vector/engineer-icon-vector-13013375>

**Abb. 077:** Grundriss Büro - Eigene Darstellung

**Abb. 078:** Grundriss Produktion - Eigene Darstellung

**Abb. 079:** Längs- & Querschnitt - Eigene Darstellung

**Abb. 080:** Energiebedarf - Eigene Darstellung

**Abb. 081:** Graue Energie - Konventionelle Bauweise - Eigene Darstellung, Quelle:  
[https://www.archweb.it/dwg/dwg\\_en.htm](https://www.archweb.it/dwg/dwg_en.htm)

**Abb. 082:** Graue Energie - Industriebau 4.0 - Eigene Darstellung, Quelle:  
[https://www.archweb.it/dwg/dwg\\_en.htm](https://www.archweb.it/dwg/dwg_en.htm)

**Abb. 083:** Echtzeitdaten - Quelle:  
<http://autodeskresearch.typepad.com/.a/6a01630463a631970d01b7c7cfb822970b-pi>

**Abb. 084:** Monitoring - Quelle:  
<http://autodeskresearch.typepad.com/.a/6a01630463a631970d01b8d1570328970c-pi>

**Abb. 085:** Augmented Reality - Quelle:  
<https://www.autodesk.com/redshift/augmented-reality-in-construction/>

# Literaturverzeichnis

## Bücher:

DETAIL research - Westphal, Tim; Herrmann, Eva Maria | BIM Building Information Modeling: Methoden und Strategien für den Planungsprozess Beispiele aus der Praxis | Nov. 2015

DETAIL Green Books - Lenz, Bernhard; Schreiber, Jürgen; Stark, Thomas | Nachhaltige Gebäudetechnik: Grundlagen, Systeme, Konzepte | Mai. 2010

HAB - Kersten, Wolfgang; Koller, Hans; Lödding, Hermann | Industrie 4.0: Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern | Dez. 2014

Springer - Pehnt, Martin | Energieeffizienz: Ein Lehr- und Handbuch | Nov. 2010

Springer - Schuh, Günther | Lean Innovation | Okt. 2013

TU Graz - Heck, Detlef; Fellendorf, Martin | 1. Grazer BIM - Tagung: BIM - Werkzeug zur Optimierung der Planungs- und Bauprozesse | Sep. 2014

Ullmann - Tietz, Jürgen | Geschichte der modernen Architektur | Sep. 2013

## Berichte:

IPCC, 2013/2014: Klimaänderung 2013/2014: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger.

Beiträge der drei Arbeitsgruppen zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Deutsche Übersetzungen durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, ProClim, Bonn/Wien/Bern, 2016.

## Zeitschriften:

Altmannsdorfer/Hinderer/Kronthaler/Meinig: Ergebnisorientierung statt Präsenzkultur, in: IndustrieBAU | 05.2017

## Andere Quellen (z.B. Allgemeingut der Menschheit):

Vitruvius, Pollio: Die zehn Bücher der Architektur des Vitruv.

## Internetquellen:

Anwenderbericht Technische Universität München, [http://dynamobim.de/wp-content/uploads/2016/09/Dynamo\\_TUM\\_Bericht.pdf](http://dynamobim.de/wp-content/uploads/2016/09/Dynamo_TUM_Bericht.pdf), 13.07.2017.

Behaneck, Baustelle 4.0: Erst digital, dann real bauen, 15.11.2017 <http://www.architektur-online.com/kolumnen/edv/baustelle-4-0-erst-digital-dann-real-bauen>, 03.12.2017.

BIM Praxisleitfaden, <http://www.bim-blog.de/bim-praxisleitfaden-1-0/>, 12.07.2017.

Butterfly, <https://www.ladybug.tools/butterfly.html>, 26.10.2017.

Buri/Weinand, Origami-Faltwerke, <http://www.proholz.at/zuschnitt/38/origami-faltwerke/>, 14.09.2017.

Brandschutz, [http://www.derix.de/de/baustoff\\_holz/brandschutz](http://www.derix.de/de/baustoff_holz/brandschutz), 29.10.2017.

Brettschichtholz KVH, [https://www.binderholz.com/fileadmin/PDF/Services\\_Kontakt/Video-s\\_Download/Prospekte/Brettschichtholz\\_D\\_WEB.pdf](https://www.binderholz.com/fileadmin/PDF/Services_Kontakt/Video-s_Download/Prospekte/Brettschichtholz_D_WEB.pdf), 12.09.2017.

Brucha Paneel, <http://www.brucha.at/?kat=17&mkat=17&op=3&lang=de>, 30.10.2017.

Der Weltklimarat IPCC, <http://www.de-ipcc.de/de/119.php>, 12.07.2017.

Die DGNB, [http://www.dgnb.de/de/verein/die\\_dgnb/?pk\\_campaign=evbox\\_dgnb](http://www.dgnb.de/de/verein/die_dgnb/?pk_campaign=evbox_dgnb), 12.07.2017.

Dragonfly, <https://www.ladybug.tools/dragonfly.html>, 26.10.2017.

EnEV, <http://www.enev-online.de>, 12.07.2017.

Energieeffizienz bei Gebäuden, <https://www.bmwfw.gv.at/EnergieUndBergbau/Energieeffizienz/Seiten/Gebaeude.aspx>, 15.08.2017.

EnergyPlus, <https://energyplus.net>, 26.10.2017.

Ellmer/Salzmänn/May, Augmented Reality: Mehr sehen und verstehen, [http://www.facility-management.de/artikel/fm\\_Mehr\\_sehen\\_und\\_verstehen\\_2208933.html](http://www.facility-management.de/artikel/fm_Mehr_sehen_und_verstehen_2208933.html), 11.12.2017

Erfolgsfaktor digitale Transformation, <https://www.land-oberoesterreich.gv.at/Mediendateien/LK/PKStelzerStrugl2792017Internet.pdf>, 15.11.2017.

EU Gebäuderichtlinie, <http://www.enev-online.de/epbd/2010/>, 08.09.2017.

Expandierter Polystyrolschaum (EPS), <http://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/daemmstoffe/aus-synthetischen-rohstoffen/eps-link.html>, 10.11.2017.

Fertigteilbeton, <http://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/massivbaustoffe/beton/fertigteilbeton.html>, 10.11.2017.

Forstwirtschaft, <https://www.land-oberoesterreich.gv.at/607.htm>, 15.11.2017.

Heizen mit Pellets, [http://www.energiesparverband.at/fileadmin/redakteure/ESV/Info\\_und\\_Service/Publikationen/Heizen\\_mit\\_Pellets\\_Privathaushalte\\_WEB.pdf](http://www.energiesparverband.at/fileadmin/redakteure/ESV/Info_und_Service/Publikationen/Heizen_mit_Pellets_Privathaushalte_WEB.pdf), 20.05.2018.

Historic Paris Agreement on Climate Change, <http://newsroom.unfccc.int/unfccc-newsroom/final-cop21/>, 12.07.2017.

Hoffmann, Faltkonstruktionen und Origami-basierte Tragstrukturen, <http://trako.arch.rwth-aachen.de/cms/TRAKO/Forschung/Tragsysteme-Strukturformprinzipien/~isbg/Modulares-Origami/>, 14.09.2017.

Honeybee, <https://www.ladybug.tools/honeybee.html>, 26.10.2017.

Janiesch, Cyber-physische Systeme, <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/cyber-physische-systeme>, 10.07.2017.

Jos/Pansy, Faltwerk, [https://iam.tugraz.at/studio/w11\\_blog/wp-content/uploads/2011/11/faltwerke.pdf](https://iam.tugraz.at/studio/w11_blog/wp-content/uploads/2011/11/faltwerke.pdf), 13.09.2017.

Kampker/Osebold/Trautz/Burggräf/Krunke/Meckelnborg/Leufgens/Rogel, Innovative Fabriken interdisziplinär planen, [https://www.researchgate.net/publication/280573989\\_Fabrikplanung\\_-\\_Forschung\\_Innovative\\_Fabriken\\_interdisziplinär\\_planen](https://www.researchgate.net/publication/280573989_Fabrikplanung_-_Forschung_Innovative_Fabriken_interdisziplinär_planen), 12.07.2017.

Klima in Oberösterreich, <https://www.land-oberoesterreich.gv.at/18479.htm>, 15.11.2017.

Klimawandel, <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel>, 12.07.2017.

Lackes, Internet der Dinge, <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/internet-der-dinge.html>, 12.07.2017.

Ladybug Tools, <http://www.ladybug.tools>, 26.10.2017.

Ladybug, <https://www.ladybug.tools/ladybug.html>, 26.10.2017.

Limacher, Wandlungsfähige Fabrik, [http://www.ie-group.com/wp-content/uploads/2016/12/SMM\\_17\\_2016\\_Wandlungsf%C3%A4hige-Fabrik.pdf](http://www.ie-group.com/wp-content/uploads/2016/12/SMM_17_2016_Wandlungsf%C3%A4hige-Fabrik.pdf), 04.08.2017.

Melita Tuschinski: Neufassung der EU-Gebäuderichtlinie 2010, [http://www.enev-online.de/epbd/epbd\\_2010\\_tuschinski\\_novelle\\_eu\\_gebaeuderichtlinie.pdf](http://www.enev-online.de/epbd/epbd_2010_tuschinski_novelle_eu_gebaeuderichtlinie.pdf), 12.07.2017.

Mogk, What happens when BIM meets the IoT?, 17.09.2015, <https://www.autodeskresearch.com/blog/bim-and-iot>, 10.12.2017

Nachhaltige Beleuchtung, [http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen\\_Downloads/1506\\_1-w20\\_Nachhaltigkeit\\_web.pdf](http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1506_1-w20_Nachhaltigkeit_web.pdf), 20.10.2017.

Nachhaltigkeit, <http://www.goedde-beton.de/nachhaltigkeit>, 02.11.2017.

Nyhuis/Reinhart/Abele, Wandlungsfähige Produktionssysteme, [http://www.forschungsnetzwerk.at/downloadpub/Wandlungsfahige\\_Produktionssysteme.pdf](http://www.forschungsnetzwerk.at/downloadpub/Wandlungsfahige_Produktionssysteme.pdf), 16.07.2017.

Origami-Faltkunst für Tragwerke, <https://www.detail.de/artikel/origami-faltkunst-fuer-tragwerke-457/>, 03.09.2017.

Photovoltaik-Rechner, [https://www.klimaaktiv.at/service/tools/erneuerbare/pv\\_rechner.html](https://www.klimaaktiv.at/service/tools/erneuerbare/pv_rechner.html), 21.05.2018.

Robeller/Weinand, Standfest gefügt, [https://infoscience.epfl.ch/record/229133/files/2017\\_06\\_tec21\\_Heft22\\_Vidy\\_1.pdf?version=1](https://infoscience.epfl.ch/record/229133/files/2017_06_tec21_Heft22_Vidy_1.pdf?version=1), 29.09.2017.

Roy/Mittag/Baumeister: Industrie 4.0 - Einfluss der Digitalisierung auf die fünf Lean-Prinzipien - Schlank vs. Intelligent, <http://www.productivity.de/node/600>, 10.07.2017.

Savoyat, Origami aus gekrümmtem Holz, <https://www.espazium.ch/uploads/55cc8f4d57241.pdf>, 29.09.2017.

Schober, Digitization of the construction industry, [https://www.rolandberger.com/de/Publications/pub\\_digitization\\_of\\_the\\_construction\\_industry.html](https://www.rolandberger.com/de/Publications/pub_digitization_of_the_construction_industry.html), 21.08.2017.

Stahl, <http://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/grundstoffe-gs/metalle-gs/stahl-gs.html>, 10.11.2017.

Schneider/Pfoh/Grimm, Projektplattform Energie - Leitfaden 01, [https://www.ppe.tum.de/fileadmin/w00bqx/www/content\\_uploads/151016\\_Leitfaden\\_OEkologische\\_Kenndaten.pdf](https://www.ppe.tum.de/fileadmin/w00bqx/www/content_uploads/151016_Leitfaden_OEkologische_Kenndaten.pdf), 09.11.2017.

Schuler, Tragwerkslehre 3, <http://www.gbd.at/skripten/TWL3.pdf>, 23.10.2017.

Schickhofer, Die Holzmassivbauweise am Beispiel von Brettsperrholz, <http://www.proholz.at/forschung-technik/werkstoffportraits/die-holzmassivbauweise-am-beispiel-von-brettsperrholz/>, 21.10.2017.

Stephan, IFC, openBIM und die neue Art der Zusammenarbeit, <http://bimsource.de/ifc-openbim-und-die-neue-art-der-zusammenarbeit/>, 22.08.2017.

Strategische Zukunftsforschung, 22.01.2016, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/strategische-zukunftsforschung>, 05.08.2017.

Strom & Warmwasser mit einem System erzeugen, <https://www.photovoltaiik-web.de/photovoltaik/module/sondermodule/hybridmodule-kombimodule-hybrid-kollektor>, 30.11.2017.

Synergetische Planung wandlungsfähiger Fabriken, [https://www.iph-hannover.de/\\_media/files/downloads/Whitepaper\\_Fabrikplanung.pdf](https://www.iph-hannover.de/_media/files/downloads/Whitepaper_Fabrikplanung.pdf), 02.09.2017.

U-Wert Rechner, <https://www.ubakus.de/u-wert-rechner/>, 21.05.2018.

Was ist BIM?, <https://www.autodesk.de/solutions/bim/overview>, 13.07.2017.

Walmsley, Project Dasher, <https://www.autodeskresearch.com/projects/dasher>, 14.12.2017.

Wärmebedarfsrechner, <https://www.waermebedarfsrechner.de>, 20.05.2018.

Weinand, Origami: Faltwerke aus Holzwerkstoffplatten, <http://www.raumgestaltung.tugraz.at/img/Produktdesign%2005/BuriWeinand.pdf>, 14.09.2017.

Wirtschaftliche Nutzungsdauer von Gebäuden, <https://www.bauprofessor.de/Wirtschaftliche%20Nutzungsdauer%20von%20Geb%C3%A4uden/b39c91e1-140c-4f03-adf0-946c42d01cde>, 12.07.2017.

Wirtschaftsstandort Oberösterreich, <https://www.land-oberoesterreich.gv.at/49303.htm>, 06.11.2017.

WMO provisional Statement on the Status of the Global Climate in 2016, <https://public.wmo.int/en/media/press-release/provisional-wmo-statement-status-of-global-climate-2016>, 12.07.2017.

Zellulosedämmstoff, <http://www.dataholz.at/cgi-bin/WebObjects/dataholz.woa/wa/baustoff?baustoff=Zellulosed%C3%A4mmstoff&language=de>, 10.11.2017.