

# Digitalisierung für die Produktion

Fabian Scheurer  
Design-to-Production GmbH  
Erlenbach/Zürich, Schweiz



# Digitalisierung für die Produktion

## 1. Einleitung

Der neue Hauptsitz der Firma Swatch in der Schweizer Uhrenstadt Biel wurde vom japanischen Architekten und Pritzker-Preisträger Shigeru Ban entworfen und 2019 eröffnet. Der Kern des viergeschossigen Bürogebäudes besteht aus einem konventionellen Betonskelett, umhüllt von einer spektakulären Holzgitterschale, die gleichzeitig als Fassade und Dach wirkt.



Abbildung 1: Luftbild und Innenansicht des Swatch-Gebäudes (Bilder: Swatch)

Diese Gitterstruktur, die wie ein 240 Meter langes Fragezeichen dem Verlauf eines kleinen Flusses folgt, spannt in der Breite über rund 35 Meter und steigt von rund 8 Meter Höhe am hinteren Ende bis zu 26 Meter über der Frontfassade, bevor sie eine öffentliche Strasse überquert und sich als Dach über die Konferenzhalle des gegenüberliegenden Gebäudes «Cité du Temps» legt – ebenfalls ein Holzbau aus der Feder von Shigeru Ban. Die 11.000 qm grosse Holzkonstruktion besteht aus Brettschichtholzträgern, die ein Gitter von rund 2x2m grossen, viereckigen Feldern formen. In diesen Feldern sitzen 2.800 vorgefertigte Fassadenelemente verschiedener Typen (transluzente ETFE-Elemente, transparente Glas-Elemente, opake Elemente mit und ohne Photovoltaik, und eine Reihe von Subtypen) und bilden die Gebäudehülle. Aufgrund der freien Form des Gebäudes sind alle Fassadenelemente individuell geformt – und dasselbe gilt für die 4.600 Holzträgersegmente, aus denen die Gitterschale besteht.



Abbildung 2: Montage der Holzstruktur und fertige Fassade (Bilder: SJB, Swatch)

Swatch kann mit einiger Berechtigung als Höhepunkt einer Serie von Freiform-Holzbauprojekten von Shigeru Ban betrachtet werden:

- **Das Centre-Pompidou Metz**, Frankreich (eröffnet 2010) – ein 8.500 qm grosser «Hut», dessen Holzgeflecht die Betonstruktur des Museums beschirmt.
- **Der Nine Bridges Golf Club** in Yeosu, Südkorea (eröffnet 2009) – ein 3.200 qm grosser «Wald» aus schlanken Holzstützen, die sich zu einem Baldachin verflechten.
- **La Seine Musicale** in Paris, Frankreich (eröffnet 2017) – eine 30 m hohe «Perle» auf der Spitze der Seine-Insel Seguin, die eine Kammermusiksaal mit 1.500 Sitzplätzen umhüllt.

Genau wie Swatch wurden alle diese Projekte aus vorgefertigten, gekrümmten Brett-schichtholz-Trägern zusammengesetzt, präzise in Form gefräst durch digital gesteuerte (CNC) Maschinen in Deutschland, Frankreich und der Schweiz. Ihre Konstruktionen basieren auf Schweizer Holzbau-Ingenieurwissen von Hermann Blumer und SJB, und bei allen spielte Design-to-Production eine vitale Rolle in der digitalen Modellierung und schlussendlich dem Erstellen von Fertigungsdaten für die CNC-Produktion



Abbildung 3: Swatch Vorläufer: Centre Pompidou Metz, Nine Bridges Golf Club Yeoju, La Seine Musicale Paris (Bilder: SJB, Blumer-Lehmann, D2P)

Für Design-to-Production (D2P) war Swatch trotz aller Routine ein herausragendes Projekt: während wir bei den drei Vorgängerprojekten erst *nach* Ausschreibung und Vergabe auf Seiten des ausführenden Holzbauers mit der digitalen Modellierung begannen, wurden wir bei Swatch bereits *vor* der Ausschreibung von der Bauherrschaft beauftragt, das Planungsteam durch ein digitales Modell zu unterstützen. Das Ziel war, Planungsvorschläge so früh wie möglich gegen die tatsächliche Geometrie des Gebäudes zu prüfen und die resultierenden Entscheide in einem präzisen digitalen Modell für die spätere Umsetzung zu dokumentieren. Aufgrund unserer praktischen Erfahrung mit CNC-Produktionsmodellen wurde uns rasch bewusst, dass letzteres die bei weitem die grössere Herausforderung darstellt: **Wie erreicht man die Durchgängigkeit des Datenflusses von einer frühen Planungsphase bis hin zu Produktion und Montage?**

Digitale Fertigung ist im Holzbau praktisch zum Alltag geworden. Digitale Planung (nach der BIM-Methode) wird in der Architektur ebenfalls mehr und mehr zum Standard. Die digitalen Modelle der Planungsphase zu nutzen, um damit die digitale Produktion zu steuern, scheint eine logische Konsequenz dieser Entwicklung zu sein. Trotzdem stellt sich die Realität weitgehend anders dar. Viele der umfangreichen *3D-Planungsmodelle* werden bestenfalls als «informeller» Input für die Ausführung genutzt, während die eigentlichen *3D-Produktionsmodelle* nach der Vergabe von Grund auf neu erstellt werden.

Aus der Aufgabenstellung digitale Modelle durchgängig nutzbar zu machen hat Design-to-Production im Laufe der vergangenen 15 Jahre einen mehrphasigen, parametrischen Modellierungsprozess entwickelt, der im Folgenden beschrieben wird.

## 2. Pre-Tender: Planungsphase

Eine grosse Herausforderung beim Erstellen von Produktionsmodellen ist die notwendige Detailtiefe (**Level of Detail**): jedes Loch, das auf einer CNC-Maschine gebohrt werden soll, muss zuvor in einem digitalen Modell definiert werden. Beim Swatch-Holzbau summiert sich das zu rund 140.000 Befestigungsmitteln, die in der gekrümmten Struktur platziert werden müssen. Logischerweise kann das noch nicht in einer frühen Planungsphase geschehen, sondern erst in der Werk- und Montageplanung, wenn Typ, Dimension und Positionen jeder Schraube final geklärt sind. Trotzdem enthalten Planungsmodelle oft überraschend viele Details – von denen allerdings viele nur «gut geraten» und vorläufig sind, solange der Ausführende nicht bekannt, die Verfügbarkeit der Materialien nicht gesichert und die Detailstatik nicht geprüft ist. 3D-Modelle aus der Planungsphase können also oft gar keine verlässlichen Entscheidungen dokumentieren, sondern nur die ungefähre Projektion einer möglichen Zukunft des geplanten Gebäudes.

Selbst wenn Details schon frühzeitig bekannt sind, scheitert die direkte Weiterverwendung von Planungsmodellen für die digitale Fertigung regelmässig an mangelnder Präzision. Die typische Produktionstoleranz einer modernen CNC-Abbundmaschine liegt im Bereich eines

halben Millimeters – was keinesfalls eine Übertreibung sondern pure Notwendigkeit ist, sobald direkt statisch relevante Details produziert werden sollen. Dementsprechend wird eine solche Maschine aber jeden Modellierungsfehler, der grösser als 0.5 mm ist, mit unbittlicher Präzision in ein, dann ebenso fehlerhaftes, Bauteil «materialisiert». In der Regel erreichen die digitalen Modelle aus der Planungsphase nicht annähernd ein solches Präzisionsniveau (**Level of Accuracy**), daher können ohne Überarbeitung auch keine Produktionsdaten direkt aus ihnen abgeleitet werden.

Kurz: Aus dem Blickwinkel der digitalen Fertigung enthalten digitale Gebäudemodelle meist zu viel Information von zu geringer Qualität. Der Ausführende muss nun in der Regel die Verantwortung für das produzierte Ergebnis übernehmen, hat aber kaum Möglichkeiten sicher herauszufinden, welche Teile des empfangenen Modells auf harten Fakten beruhen, und welche bloss geraten sind. Daher ist es ein relativ pragmatischer Zug, das mit viel Aufwand erstellte 3D-Modell beiseitezulegen und selbst ein Produktionsmodell neu aufzubauen – genau so, wie schon immer neue, genauere und detailliertere 2D-Zeichnungen in jeder Phase eines analogen Planungsprojekts erstellt wurden.

Um durchgängig verwendbare, digitale 3D-Modelle von geometrisch komplexen Projekten zu erstellen, müssen wir uns also auf die Qualität konzentrieren, statt uns von der Quantität blenden zu lassen! Entweder, der Ersteller übernimmt die volle Verantwortung für die Korrektheit (Wahrheit), Konsistenz (Widerspruchsfreiheit) und Vollständigkeit seines Modells, oder der Empfänger benötigt effiziente Methoden, um diese Eigenschaften zu prüfen!

## 2.1. Gebäuderaster

Nachdem wir 2013 zum Planerteam des Swatch-Projekts gestossen waren, erstellten wir als erstes ein sauberes Modell des Gebäuderasters. Das mag trivial klingen, wird aber in frühen Projektphasen oft vernachlässigt und führt später zu mühsamen Korrekturen und sogar Planungsfehlern. Es erfordert – vor allem in geometrisch komplexen Projekten mit zahlreichen gekrümmten Bauachsen – eine klare Unterteilung in definierende und abhängige Dimensionen, um ein geometrisch korrektes und eindeutiges Set von Konstruktionsregeln für das grundlegende Referenzsystem des Gebäudes zu definieren. Sich hier auf den Austausch von (digitalen) Kurven oder (gerundeten) Koordinaten zu verlassen, würde das o.g. Qualitätsniveau bereits beim ersten Schritt des Planungsprozesses korrumpieren.

Diese Referenzachsen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** links) wurde allen Planern zur Verfügung gestellt und beim Austausch von 2D- und 3D-Daten konsequent verwendet und auch überprüft.

## 2.2. Master-Surface

In einem zweiten Schritt wurde die Globalform des Gebäudes – die bis dahin nur ungefähr für Zeichnungen und Renderings definiert war – in ein präzises, digitales NURBS-Modell<sup>1</sup> überführt. Nachdem man sich im Planerteam auf die Oberkante der Holzstruktur als Referenzebene geeinigt hatte (die virtuelle «Schnittstelle» zwischen Holzbau und Fassade), wurde aus den existierenden 3D-Modellen von Shigeru Ban Architects und einer Reihe von klar definierten geometrischen Randbedingungen eine glatte Referenzfläche in Produktionsqualität entwickelt – innerhalb der zu erwartenden Produktionstoleranz von 1/10 mm (siehe Abbildung 4. Mitte) Für diese ausgiebig optimierte «Master Surface» konnte im April 2014 ein «Design-Freeze» erreicht werden. Ab da diente sie unverändert als Startpunkt für die Konstruktion jedes einzelnen Bauteils in der Fassade.

<sup>1</sup> *Non-uniform rational Bezier-Splines* (NURBS) ist eine mathematische Methode zur Beschreibung kontinuierlich gekrümmter Kurven und Flächen, die in den 1960er Jahren in der französischen Automobilindustrie entwickelt wurden. Sie ist bis heute die Grundlage für praktisch alle digitalen Modelle sogenannter "Freiform-Geometrien". Im Unterschied zu NURBS-Modellen werden gekrümmte Flächen in "Mesh-Modellen" durch ein Netz drei- oder viereckiger Maschen angenähert – was sich perfekt für die Visualisierung eignet, aber nicht für die Erzeugung geometrisch präziser Produktionsdaten.

### 2.3. Träger-Achsen

Auf der gekrümmten Master-Surface wurden anschliessend die Achsen der Gitterträger als NURBS-Kurven definiert – beginnend bei einer Symmetrieachse an der Frontfassade, den Positionen der neun grossen Balkonöffnungen und unter Berücksichtigung einer Reihe von Optimierungskriterien, z.B. ein durchschnittlicher Kreuzungsabstand von 2.1 m, optimale Krümmungsstetigkeit und möglichst rechtwinkligen Kreuzungen. Dieses Achsraster wurde ebenfalls abgenommen und Anfang 2014 eingefroren (abgesehen von der minimalen Verschiebung einer der Balkonpositionen im Februar 2015)

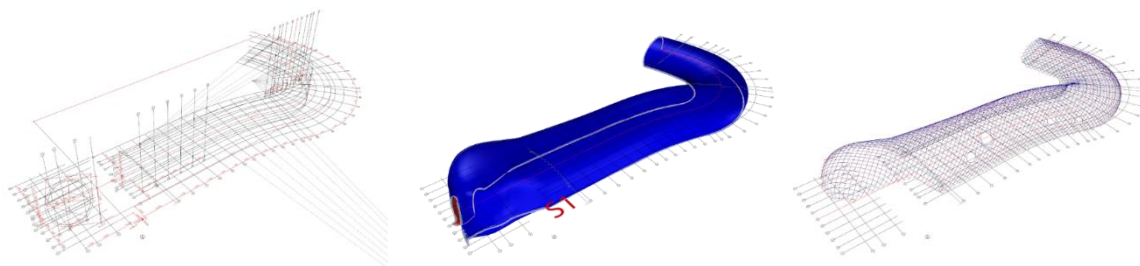


Abbildung 4: Swatch Referenz-Modell: Gebäuderaster, Master-Surface, Träger-Achsen

Zusammen mit dem Referenzmodell, bestehend aus Gebäuderaster, Master-Surface und Träger-Achsen, wurde ein robustes Nummerierungssystem für die Fassade entwickelt, das für die folgenden fünf Jahre bis zur Fertigstellung die eindeutige Identifikation und Lokalisierung sämtlicher Fassadenbauteile ermöglichte: Die Kurven des zweidimensionalen Träger-Rasters wurden fortlaufend durchnummeriert, beginnend an der Westspitze des Gebäudes. Die Knoten erhielten die Nummern der kreuzenden Achsen (analog einem kartesischen Koordinatensystem). Die viereckigen Fassadenfelder wurden gemäss ihrer westlichen Ecke benannt. Als besonders hilfreich erwies sich, dass dieses System auch die Nachbarschafts-Beziehungen zwischen Trägern, Knoten und Feldern beschreibt und so die Orientierung in dem riesigen Projekt vereinfachte.

### 2.4. Koordinations- und Analysemodelle

Ausgehend vom Referenzmodell konnte nun eine Vielzahl mehr und mehr detaillierter 3D-Modelle durch parametrische Modellierungswerkzeuge erstellt werden: Von den Volumen der räumlich gekrümmten Träger (deren Querschnitt überall rechtwinklig auf der Master-Surface steht), bis zu den gekrümmten Flächen der einzelnen Fassadenelemente. Aus diesen Modellen wurden den Planern auf Anfrage sowohl Teilmodelle als auch Mengenauszüge und andere Analysen zur Verfügung gestellt, z.B. zur Krümmung der äusseren Fassadenverglasung, der optimalen Orientierung der planaren inneren Verglasung, der Krümmung und Torsion der Träger und vieles mehr – bis hin zu besprinkelten Bodenfläche für jeden einzelnen Sprinklerkopf entlang der krummen Träger.

Da aufgrund der Gebäudeform aus keiner Blickrichtung alle Fassadenelemente sichtbar sind, wurde ausserdem ein «duales» 2D-Modell parallel zum geometrisch korrekten 3D-Modell entwickelt. Dieses zeige die «abgerollte» Fassade geometrisch verzerrt aber topologisch korrekt und konnte zu Koordination von Elementtypen, der Leitungsführung, der Platzierung von Heiz-Kühl-Paneelen und vieler anderer Themen verwendet werden (Abbildung 5.) Ein automatisiertes Update zwischen den beiden Modellen stellte sicher, dass Änderungen im 2D ins 3D übertragen wurden, und umgekehrt.

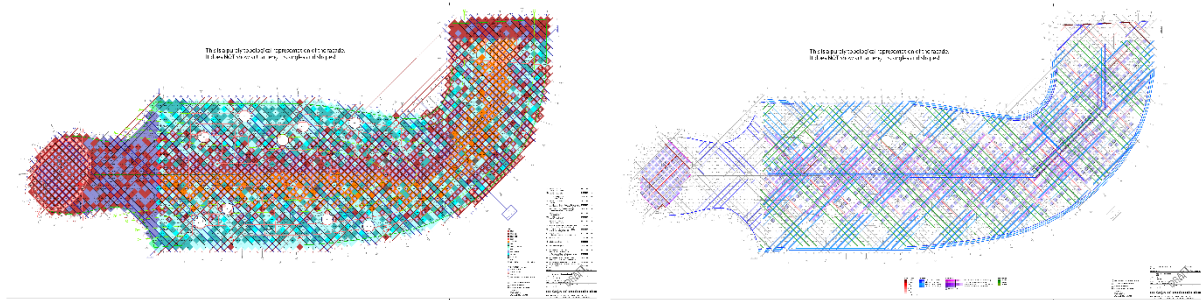


Abbildung 5: Abgerollte Koordinationsmodelle: Fassade (links), TGA (rechts)

Die Planungskoordination wurde speziell herausgefordert durch die späte Entscheidung eine separate Installationsebene zwischen Tragwerk und Fassade zugunsten einer reduzierten Bauhöhe des Gesamtsystems aufzugeben. Daraus resultierend mussten alle TGA-Installation entlang der Träger und durch die Knoten der Tragstruktur geführt werden. Die Erschliessung der Fassadenelemente mit Luft (ETFE- und Glas-Elemente), Strom (Beleuchtung, Gebäudeautomation, PV), Wasser (Heiz-Kühl-Paneele und Sprinkler) resultiert in über 5.000 Durchbrüchen in der Holzstruktur. Da deren strukturelle Auswirkungen durch die Ingenieure überprüft werden mussten, war eine frühe Definition im 3D-Modell unausweichlich (Abbildung 6).

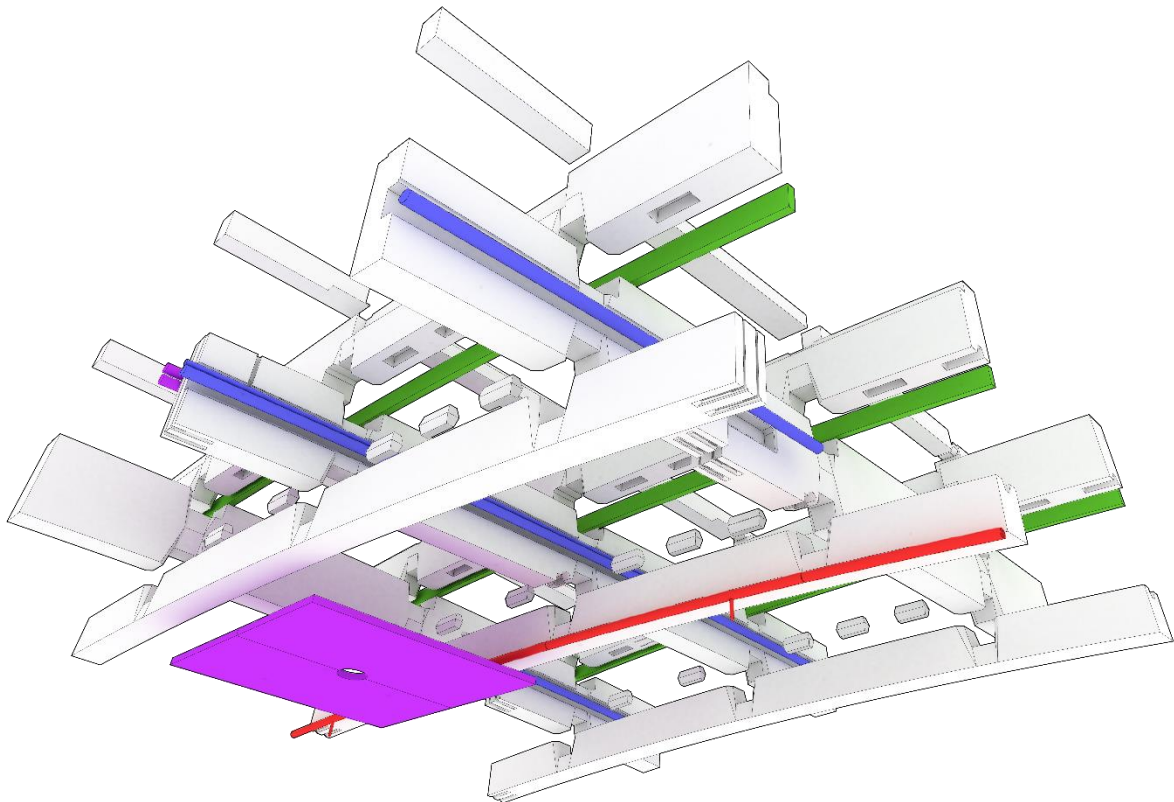


Abbildung 6: Explosionsdarstellung Holzbau + Installationen

## 2.5. Ausschreibungs-Modelle

Für die Ausschreibung wurden nicht nur Mengenauszüge aus den Modellen generiert, sondern das Referenzmodell und ein Ausschreibungsmodell wurden den Anbietern digital zur Verfügung gestellt. Im Ausschreibungsmodell wurde insbesondere die Schnittstelle zwischen Fassade und Holzbau sauber definiert – um die spätere Koordination der beiden Gewerke von Beginn an zu vereinfachen wurden die (undetaillierten) Hüllvolumen aller Fassadenelemente und Holzträger modelliert, um die jeweiligen Arbeitsbereiche sauber abzugrenzen.

Der Planungsauftrag für Design-to-Production endete an diesem Punkt. Dementsprechend war das Ziel, eine vollständige Beschreibung des Planungsstandes zu mit Hilfe eines sauberen und präzisen 3D-Modells zu definieren, das als Basis für die weitere Werk- und Montageplanung dienen konnte. Da keines der Standard-BIM-Formate den Austausch geometrisch präziser NURBS-Modelle erlaubte, geschah dies in der Form detailliert dokumentierter Rhino-3D-Modelle.

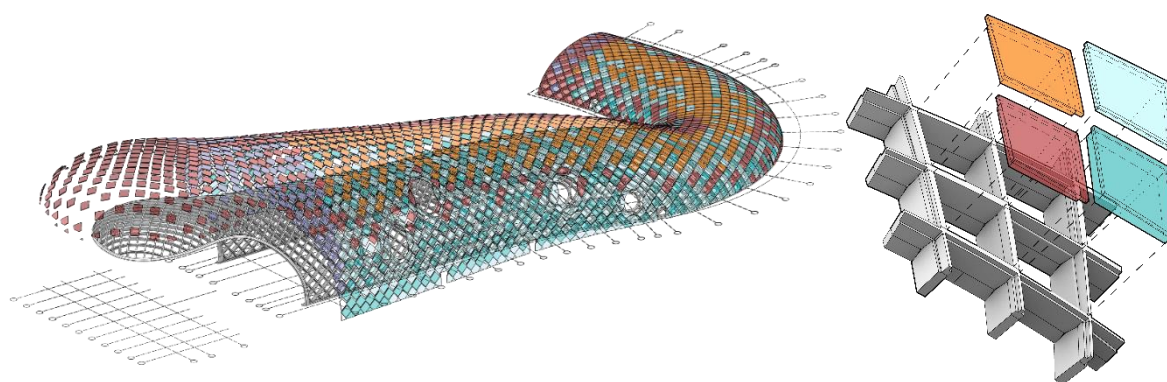


Abbildung 7: Ausschreibungs-Model: Hüllvolumen Holzbau und Fassade

## 3. Post-Tender: Ausführungsphase

Mehrere der durch Swatch beauftragten Ausführenden entschlossen sich, Design-to-Production als ihre 3D-Planer weiter zu verpflichten – was einen bruchlosen Übergang der digitalen Information weiter vereinfachte. Bis zur Fertigstellung des Gebäudes erstellte D2P digitale Produktionsmodelle für den Holzbau (Blumer-Lehmann), den Fassadenbau (Roschmann), die Heiz-Kühl-Paneele (ESG), Teile des Sprinklersystems (Oeschger Brandschutz) und des Innenausbau (Roethlisberger, Adunic) – teilweise bis hin zu CNC-Daten für die Produktion.

Insgesamt wurden mehr als 85.000 individuelle vorgefertigte Bauteile geplant und produziert: 65.000 für die Fassade (davon mehr als 20.000 aus Holz!), rund 20.000 für den Innenausbau und fast 5.000 – und darunter die bei weitem komplexesten – für den Holzbau.

### 3.1. Swatch-Knoten

Eine der Herausforderungen der Holzkonstruktion war die Konstruktion der Kreuzungsknoten. Aufgrund von Shigeru Bans Wunsch, keine sichtbaren Stahlteile in der Struktur zu haben, war die Grundidee, eine doppellagige Ausblattung zu verwenden: ein Mittelträger mit voller Höhe wird von zwei halbhohen Trägern in der anderen Richtung umschlossen. Die Ausblattungen erlauben es, Last in beide Trägerrichtungen durch den Knoten zu leiten, da jeweils die Hälfte des Trägerquerschnitts durchlaufend bleibt (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Nun kann eine traditionelle Kreuzblatt-Verbindung in genau einer Richtung zusammengefügt werden: senkrecht zu den beiden Trägerrichtungen (mathematisch bekannt als «Normalenvektor»). Sobald einer der Träger leicht verdreht oder nicht parallel zum Normalenvektor bewegt wird, «klemmt» die Montage. Schon bei geraden Trägern kann das problematisch werden, wenn mehrere solcher Verbindungen entlang eines steifen Trägers

gleichzeitig eingefahren werden müssen. Geometrisch unmöglich wird es, wenn die Normalenvektoren der einzelnen Verbindungen nicht parallel sind, wie im Fall von Swatch. Hier sind ALLE Träger gekrümmt und verdreht und an den längsten Trägersegmenten sitzen bis zu sechs Verbindungen, die alle in unterschiedliche Richtungen zeigen!

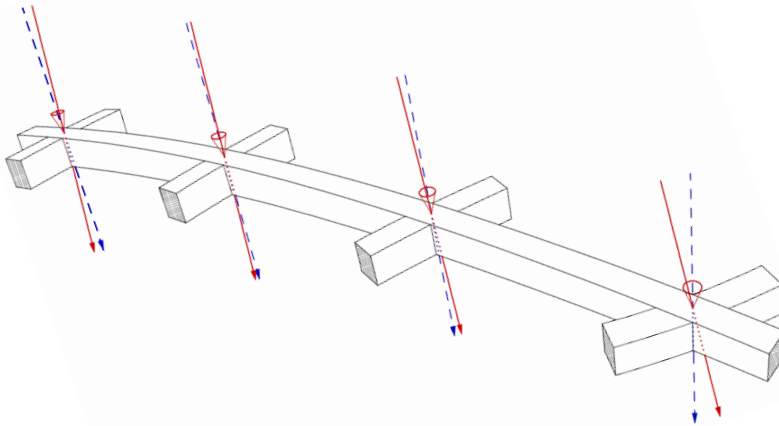


Abbildung 7: Vier Knoten an einem Trägersegment: Normalenrichtung (blau) und Montagerichtung (rot)

Um dieses Problem zu lösen hat Design-to-Production den «SkepLap-Joint» entwickelt, eine Version des Kreuzblatts («Cross-Lap») der leicht schräg eingefahren werden kann aber in der Endposition trotzdem auf satt sitzt. Dies wird ermöglicht indem die Seitenflächen der Ausblattung in einem definierten Winkel geneigt werden und sich so nach aussen öffnen. Um den nun lockeren Sitz der Verbindung zu kompensieren, werden die entsprechenden Flächen am anderen Träger ebenfalls geneigt, und es entstehen vier zusätzliche «diagonale» Flächen in den Ecken der Kreuzung. Im Gegensatz zur traditionellen Ausblattung bleiben diese fehlenden Ecken nach der Montage sichtbar – was natürlich zu Diskussionen mit dem Architekten führte, der aber schlussendlich überzeugt werden konnte, dass es sich hier nicht um einen «bug» sondern ein «design-feature» handelt.

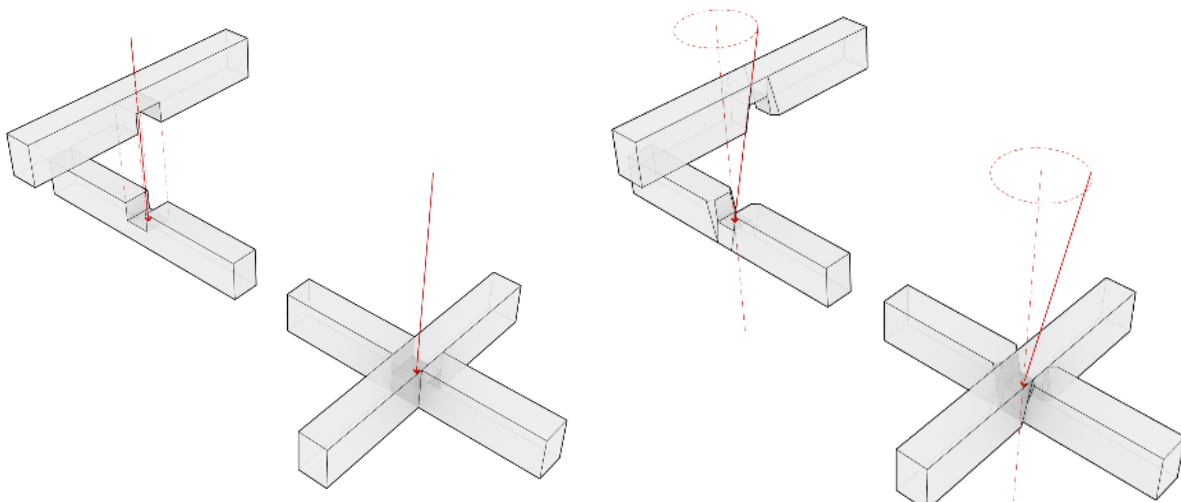


Abbildung 8: Traditionelles Kreuzblatt (links) und «SkewLap» Knoten (rechts)

Der Öffnungswinkel jedes einzelnen Knotens kann genau an die Erfordernisse angepasst werden, im Extremfall durch die Analyse des Winkelunterschieds zwischen Einfahrerichtung und Normalenvektor an jedem Knoten. Das würde allerdings dazu führen, dass die sichtbaren «fehlenden Ecken» sich von Knoten zu Knoten in der Grösse unterscheiden und ein unruhiges Gesamtbild erzeugen. Um eine homogene Erscheinung zu erreichen wurden bei Swatch nur drei unterschiedliche Öffnungswinkel verwendet – vermittelnd zwischen kleineren Winkeln mit grösserer statischer Kapazität und längeren Segmenten mit kürzeren Produktions- und Montagezeiten.



Abbildung 9: Detailansicht eines fertig montierten Knotens

### 3.2. Parametrische Modellierung

Um Freiform-Projekte wie Swatch effizient planen zu können, greift Design-to-Production konsequent auf die sog. «Parametrische Modellierung» zurück. Das bedeutet, dass Modellobjekte (Bauteile) nicht manuell erstellt und detailliert werden – was bei der immensen Zahl unterschiedlicher Teile und deren geometrischer Komplexität nicht realistisch wäre. Stattdessen werden detaillierte Modelle automatisch generiert auf der Grundlage von weniger detaillierten (abstrakteren) Modellen und parametrischen Regeln – auf Knopfdruck.

Anzahl, Form und Position der neu erstellten Bauteile oder Details beruhen dabei auf Eingangsparametern, die sich leicht ändern lassen – und das abstrakte «Referenzmodell» ist einer dieser Eingangsparameter. Auf diese Weise lassen sich 4.000 geometrisch einzigartige Kreuzungsknoten aus nur einer Master-Surface, einem Raster von gekrümmten Trägerachsen und ein paar Zeilen Programmcode erzeugen.

Durch Modularisierung und gekonnte Definition von Schnittstellen kann dieser Prozess als «digitale Kette» über mehrere Planungsphasen hinweg verknüpft werden. Im Fall von Swatch waren das:

- Ein **Referenz-Modell**, das nur die grundlegende Form (Master-Surface), die Trägerachsen und – daraus entstehend – die Positionen der Kreuzungsknoten enthält. Dies ist das einzige Modell, das teilweise manuell erstellt und optimiert wurde!
- Ein **Koordinations-Modell**, in dem Träger und Fassadenelemente als undetaillierte «Hüllvolumen» definiert sind, die parametrisch aus dem Referenz-Modell und einigen Eingangsparametern (z.B. Höhe und Breite des Trägerquerschnitts) erzeugt werden.
- Ein **Detail-Modell**, das alle Teile der Fassade als produktionsreif detaillierte Objekte enthält, jedes davon parametrisch generiert auf der Basis der Hüllvolumen des Koordinations-Modells und weiterer Parameter und Regeln

Da die meisten verfügbaren CAD- und BIM-Programme noch nicht mit den kombinierten Anforderungen aus Freiform (NURBS) Geometrie und Parametrik zurechtkommen, baut D2P eigene, digitale Planungswerkzeuge auf der Basis simpler aber robuster Standardsoftware (z.B. Rhinoceros), um diese Planungsphilosophie in die Tat umzusetzen.

Die Hauptaufgabe dabei liegt insgesamt weniger in der Tool-Entwicklung als im Entwickeln bzw. Aufdecken der zugrundeliegenden Systematik eines Bauprojekts aus dem Input des Planungsteams und der Fertiger und der präzisen Umsetzung in parametrische Regeln. Diese müssen so einfach wie möglich sein, um eindeutig und handhabbar zu bleiben. Auf der anderen Seite müssen sie alle auftretenden Spezialfälle innerhalb des Projekts abdecken – wie zum Beispiel die sehr «flachen» Kreuzungsknoten an den Swatch-Balkonen.

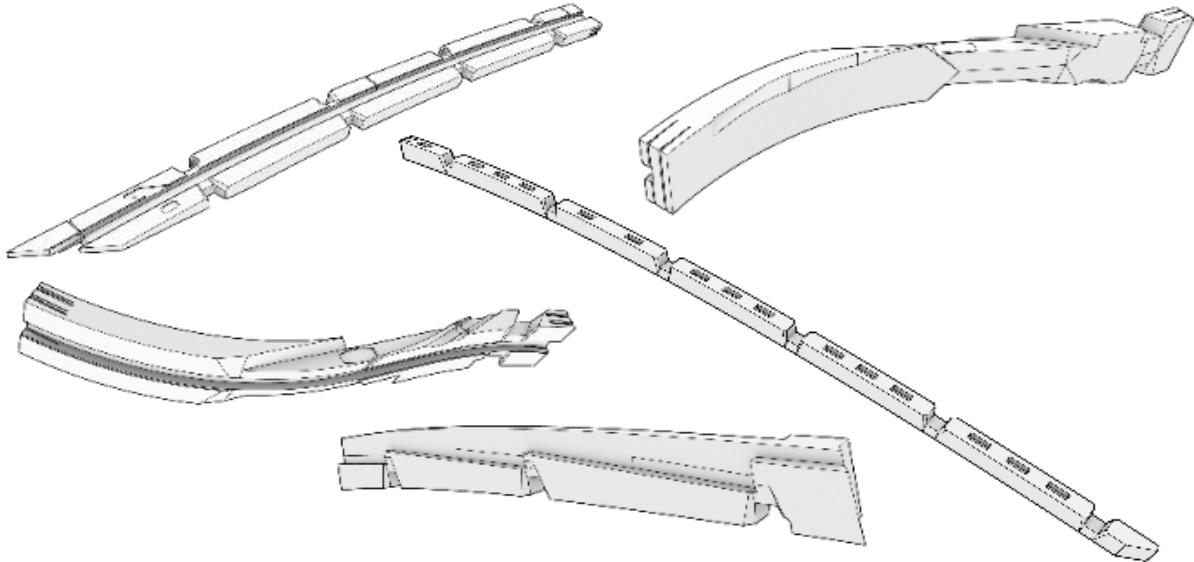


Abbildung 10: Parametrische Modellierung: Wenige Regeln, tausende Details.

Die Komplexität eines Projekts wird dementsprechend nicht an der geometrischen Differenziertheit seiner Bauelemente gemessen, sondern an der Anzahl der unterschiedlichen Regeln und Parameter, die zu seiner eindeutigen Beschreibung notwendig sind. Das Hauptziel bei «Losgröße Eins»-Projekten ist stets, ein systematisches «Bausystem» zu entwickeln und die Anzahl der Sonderfälle ausserhalb dieses Systems zu minimieren.

### 3.3. Digitale Fabrikation

Die *Planung* von geometrisch komplexen «Losgröße-Eins» Projekten lässt sich mit den Mitteln der parametrischen Modellierung sehr gut beherrschen. Spannend wird es wieder am Übergang vom Planen zum *Bauen* – wo statt Bits nun Atome bewegt werden müssen. Digital gesteuerte (CNC) Fertigungsverfahren ermöglichen diesen Übergang. Für die Swatch-Fassade wurden eine ganze Reihe solcher Verfahren eingesetzt:

- 5-Achs CNC-Fräsen von BSH-Trägern und Fensterrahmen
- Robotisches Mehrachs-Fräsen von Isolierkernen für opake Fassadenelemente
- 3-Achs CNC-Fräsen von 3-Schichtplatten für opake Fassadenelemente
- CNC Laserschneiden von Blechen, OSB- und MDF-Platten für opake Fassadenelemente
- CNC Schneiden von FPO- und ETFE-Folien
- CNC Wasserstrahlschneiden von Glasscheiben
- U.v.m.

Eine Vielzahl von Zulieferern musste mit den entsprechenden Daten für ihre Produktionsprozesse versorgt werden, um einen optimalen Informationsfluss zu erreichen. Das reichte von herkömmlichen Einzelstückzeichnungen (z.B. für Glasscheiben) bis zu voll detaillierten 3D-Modellen mit zusätzlicher Bearbeitungsgeometrie für Bohrachsen oder 5-Achs-Pfaden.

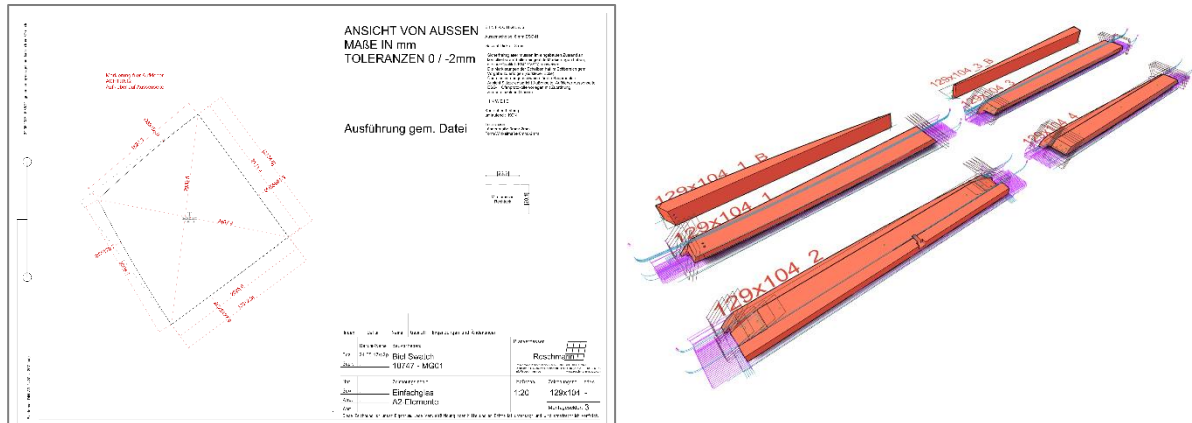


Abbildung 11: Fertigungsdaten: 2D-Zeichnungen oder 3D-Fertigungsmodelle

Am Ende ist es einer CNC-Maschine egal, ob sie 1000 gleiche oder 1000 unterschiedliche Teile produziert, solange sie den richtigen Input bekommt – und das beinhaltet sowohl das notwendige (physische) Rohmaterial als auch die korrekten (digitalen) Fertigungsdaten. Beides bringt gewisse Anforderungen mit sich.

### 3.4. Planungsqualität

Grosse Mengen korrekter Produktionsdaten für individuelle CNC-Fertigung können nur effizient erstellt werden, wenn sie direkt und automatisiert aus Planungsdaten abgeleitet werden. Eine industrialisierte Produktion benötigt eine entsprechend industrialisierte Planung. Wie gezeigt wurde, kann das mit Hilfe von parametrischer Modellierung erreicht werden, aber am Ende müssen die Qualitätsanforderungen der Fertigung – oft im Sub-Millimeter-Bereich – erreicht werden. Wenn nun detaillierte Produktionsdaten parametrisch über mehrere Stufen aus abstrakteren Modellen abgeleitet werden, dann «klappern» diese Qualitätsanforderungen im Prozess «nach vorne» bis zur grundlegenden Geometriedefinition im Referenzmodell – was erklärt, warum die Master-Surface am Beginn des Swatch-Projekts so peinlich genau und langwierig optimiert wurde, um dann über fünf Jahre als Input für alle folgenden Modelle zu dienen.

## 4. Neue digitale Planungsprozesse

15 Jahre Erfahrung mit komplexen digitalen Produktionsprojekten haben unser Team zu der Erkenntnis geführt, dass eine bloße Digitalisierung der Planungs- und Produktionswerkzeuge nicht zu signifikanten Produktivitätsgewinnen führt, solange wir an traditionellen Prozessen festhalten. Wir müssen neue Prozessmodelle und Arbeitsabläufe entwickeln!

### 4.1. Wasserfall Prozess

Planungs- und Ausführungsprozesse im Bau folgen noch viel zu häufig dem sogenannten «Wasserfall Modell».

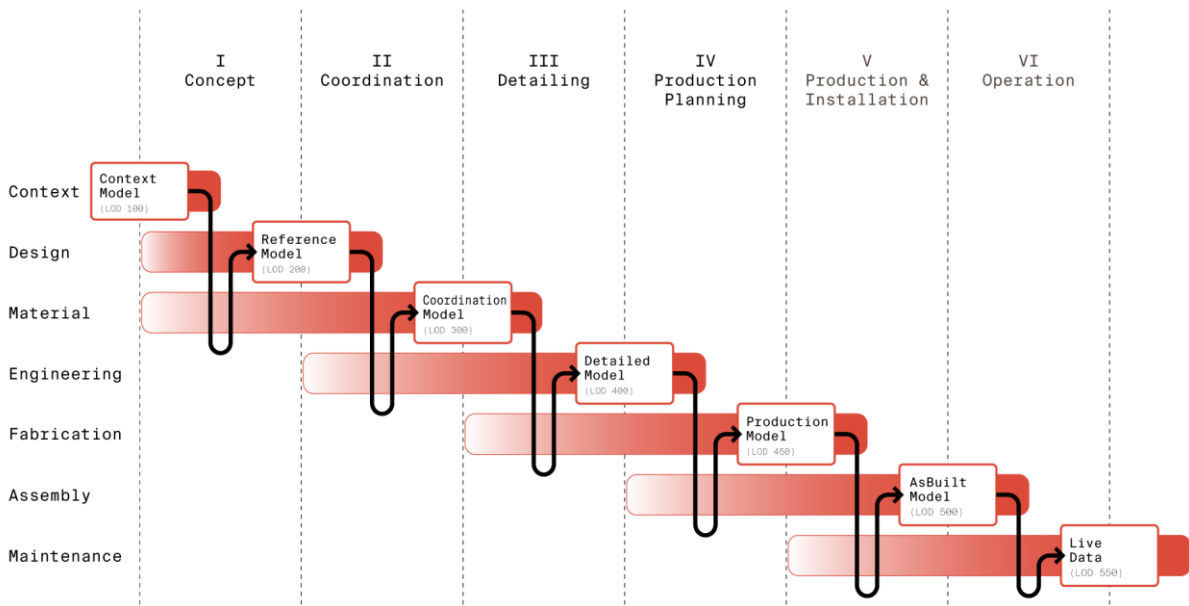


Abbildung 12: Wasserfall-Prozess

Von Projektphase zu Projektphase (von links nach rechts) steigt die Betrachtungstiefe in immer relevantere Themen (von oben nach unten). Scheinbar «späte» Themen wie Fertigung und Montage werden oft erst in der Detaillierungsphase diskutiert und entschieden. Das führt in Projekten, die auf Vorfertigung setzen, offensichtlich zu Problemen: Man braucht nicht zu produzieren, was man nicht montieren kann und man braucht nicht zu planen, was man nicht produzieren kann!

- Am Ende jeder Phase wird ein Modell zu nächsten Phase übergeben, wo es dann überarbeitet und schliesslich durch eine detailliertere und präzisere Version ersetzt wird. Das führt zu kontinuierlichem Anwachsen der Datenmengen (bis sie zu gross und zu unhandlich werden um konsistent zu bleiben) und verhindert das «zurückspringen» zu weniger detaillierten Ständen (im Fall konzeptioneller Änderungen).

## 4.2. D2P-Prozess

Der Design-to-Production Prozess unterscheidet sich in wichtigen Aspekten:

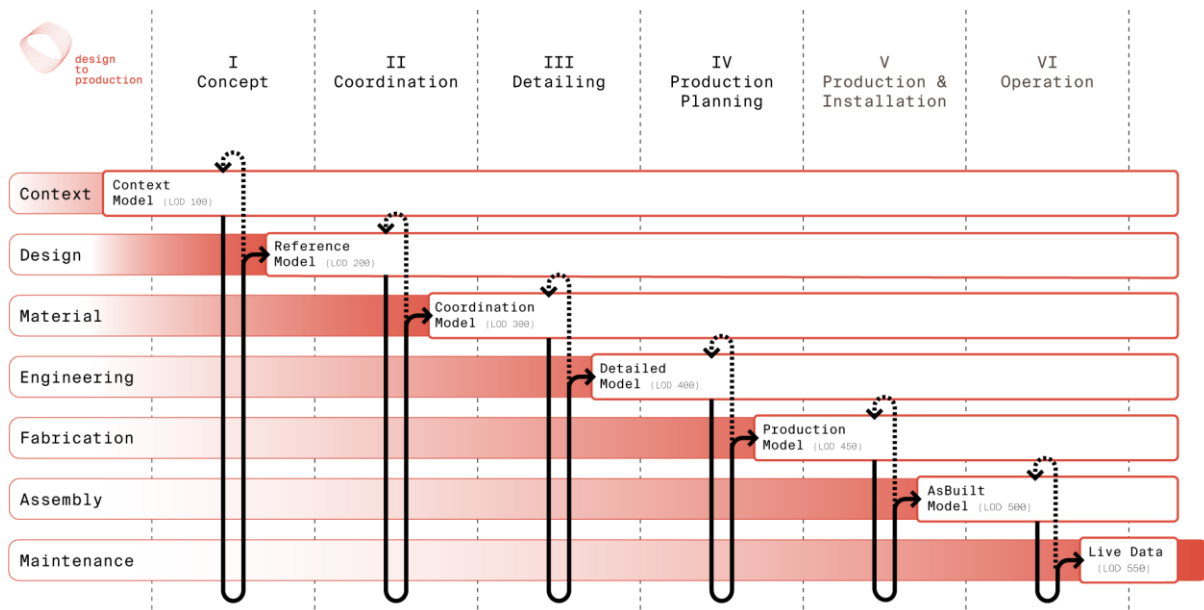


Abbildung 13: D2P-Prozess

- **Agil + Präzise:** Wir betrachten die gesamte Tiefe des Projekts schon vom Beginn an – bis hinab zu Produktion, Montage und Betrieb – um zu jedem Zeitpunkt ein sicher umsetzbares Projekt zu planen. Der kritische Punkt ist das «Auftauchen» bis zu einem adäquaten Abstraktionsniveau am Ende einer jeden Planungsphase, so dass nur in das digitale Modell eingebaut wird, was auch tatsächlich entschieden wurde – so wenig wie nötig, so abstrakt wie möglich, aber bereits in Produktionsqualität.
- **Multiskalar + Parametrisch:** Wir wollen unsere digitalen Modelle durchgängig bis zur Produktion verwenden und generieren detaillierte Modelle parametrisch aus abstrakten Modellen. Das erfordert, dass die abstrakten Modelle aus früheren Phasen nicht ersetzt werden – sonst könnten wir sie nur genau ein einziges Mal als Input verwenden! Stattdessen bauen wir einen Stapel aus mehr und mehr detaillierten Modellen. Und da der Inhalt automatisch generiert wurde, können wir ein detailliertes Modell jederzeit wegwerfen und mit veränderten Eingangsparametern neu erzeugen!

Basierend auf diesem Schema haben wir seit 2007 zahlreiche Projekte in die Produktion gebracht – einschliesslich der oben genannten Holzbauten von Shigeru Ban.

Interessanterweise funktioniert diese Methode unabhängig von unserem Einstiegspunkt in das Projekt, sei es vor oder nach der Vergabe. Jedes Freiform-Projekt beginnt mit einer präzisen Definition der Form in der Konzeptphase – im schlimmsten Fall durch Re-Engineering eines ungenauen Design-Modells unter Zeitdruck und in der Ausführungsphase, nur wenige Wochen vor dem Produktionstermin.

Wesentlich sicherer, verlässlicher und komfortabler für alle Beteiligten geschieht das allerdings, – wie im Falle von Swatch – zu Beginn des Planungsprozesses, spätestens nach dem Vorprojekt. Das erfordert allerdings oft ein Umdenken und einen Umbau der tradierten Abläufe. Kurz: Neue, digitale Prozesse!