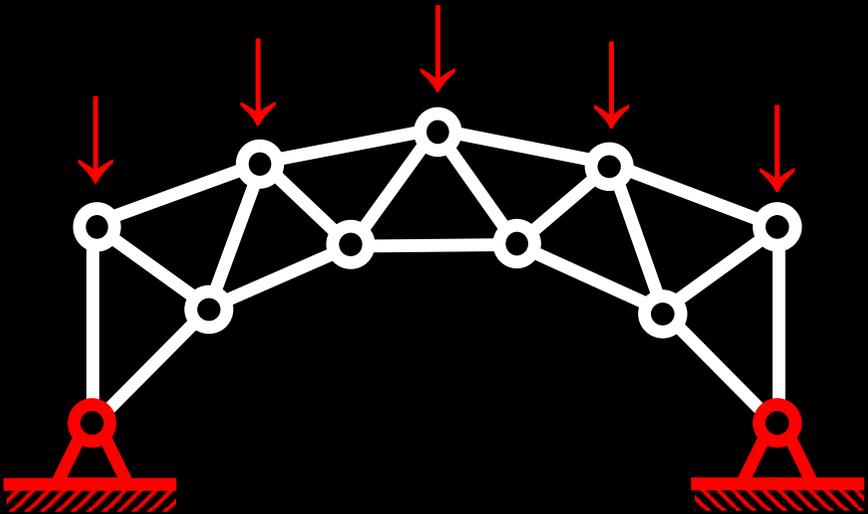


Alexander Brunner

# Topologisches Design!



Wie Sie das Skelett  
der Konstruktion entwerfen



# Topologisches Design!

Wie Sie das Skelett  
der Konstruktion entwerfen

Copyright © 2018 Alexander Brunner

1. Auflage (Januar 2018)

ISBN: 978-3-9818764-2-0

## Prolog: Die drei Probleme

Wer lasttragende Konstruktionen konzipiert, konstruiert und berechnet, wird früher oder später folgende Erfahrung machen: Ganz am Anfang des Entstehungsprozesses haben Sie die große Chance, in wenigen Minuten oder Stunden das Skelett Ihrer Konstruktion zu erschaffen. Sie können mit nur wenigen Strichen das Grundgerüst der Struktur skizzieren und damit 70–80 % der Bauteilperformance erreichen. Dies ist aber nur eine Seite der Medaille. Leider ist die Kehrseite nicht so schön: Durch eine kleine konstruktive Fehlentscheidung kann es schnell passieren, dass Sie kilometerweit am Optimum vorbeischießen. Oft sind es scheinbar unbedeutende „Kleinigkeiten“, die Ihre Konstruktion vom strukturmechanischen Ideal wegkatapultieren. Solche Fehlentscheidungen haben dann drei Konsequenzen.

**Erste Konsequenz: mangelnde Bauteilqualität.** Die anfänglichen Fehlentscheidungen führen dazu, dass die Konstruktion die Tragfunktion nicht erfüllt. Sie bricht unter der Last (Festigkeitsproblem). Sie knickt bzw. beult unter der Last aus (Stabilitätsproblem). Sie gibt zu stark unter der Last nach (Verformungsproblem). Die Eigenfrequenzen liegen im Bereich der Erregerfrequenzen (Resonanzproblem).

**Zweite Konsequenz: hohe Bauteilkosten.** Die anfänglichen Fehlentscheidungen führen dazu, dass die Konstruktion einigen Ballast mitschleppen muss. Um die geforderte Tragfunktion dennoch zu erfüllen, wird dann mehr und/oder besserer Werkstoff eingesetzt. So wird die Konstruktion zu schwer und als Folge zu teuer. Denn die Materialkosten machen rund 50–70 % der gesamten Bauteilkosten aus.

**Dritte Konsequenz: lange Entwicklungszeit.** Die anfänglichen Fehlentscheidungen führen dazu, dass viele zeitraubende Berechnungen (FEM-Analysen) durchgeführt werden müssen. Denn die Konstruktion ist aus technischer und/oder wirtschaftlicher Sicht nicht in Ordnung. So geht viel Zeit für unnötige Variantenberechnungen verloren.

Nun kommt die Topologieoptimierung ins Spiel: Die Topologieoptimierung gibt Ihnen eine Orientierung im schier unendlichen Ozean der Designmöglichkeiten. Sie hilft Ihnen, tausende konstruktive Möglichkeiten auf eine Handvoll sinnvolle Alternativen einzuschränken. Sie zeigt Ihnen den Königsweg zum strukturmechanischen Optimum.

Genau darum geht es in diesem Ratgeber: Sie bekommen praxisrelevante Tipps an die Hand, lernen einige Prinzipien der Topologieoptimierung kennen, können selbst einige Topologieentwürfe erschaffen (testen Sie sich!) und diese mit den vorgeschlagenen Lösungen abgleichen. So bekommen Sie einen Vorgeschmack auf eine Optimierungsmethode, die Ihnen hilft, Ihre Konstruktion auf eine höhere Stufe der Effektivität zu heben.

Mit diesem Ratgeber verfolge ich ein einziges Ziel: einen Beitrag dazu zu leisten, die Topologieoptimierung in der Konstruktion zu etablieren. Gelingt es mir, einige Konstrukteure mit dem „Topologievirus“ zu infizieren oder zumindest Interesse am Thema zu wecken, so habe ich mein Ziel erreicht.

**Alexander Brunner**

**Januar 2018**

## **Praxistipp #1: Begreifen Sie den Sinn der Topologieoptimierung!**

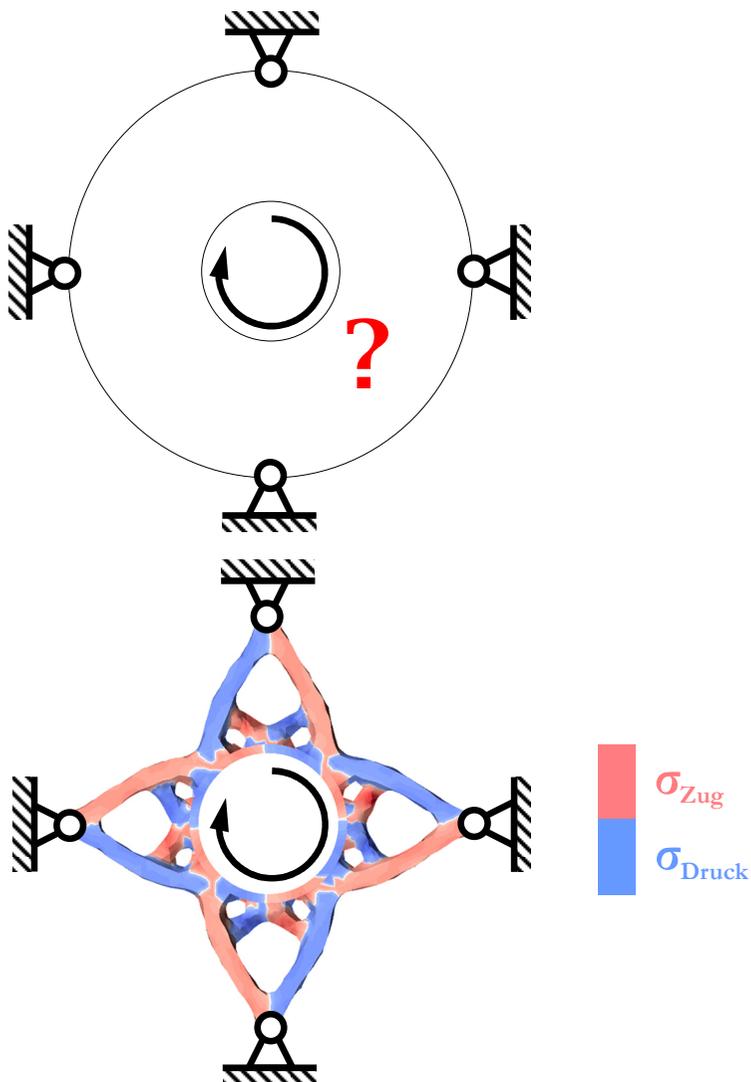
Zunächst wollen wir den Begriff „Topologieoptimierung“ mit Inhalt füllen. Der Begriff besteht aus zwei Teilen: Topologie und Optimierung. Was heißt Topologie? In unserem Kontext heißt es: Die Topologie einer Struktur wird durch die An-ZAHL und An-ORDNUNG der Elemente charakterisiert. Was heißt Optimierung? Optimierung heißt, einen Konflikt zwischen gegenläufigen Zielen lösen. Und was bedeutet dann Topologieoptimierung? Topologieoptimierung ist eine Methode, die uns hilft, im verfügbaren Designraum (Kontinuum) die wesentlichen Elemente einer lastragenden Struktur (Diskretum) zu identifizieren und damit den Konflikt zwischen technischen und wirtschaftlichen Zielen zu lösen.

Das klingt zu theoretisch? Dann betrachten wir die Topologieoptimierung durch die Konstruktionsbrille und klären die Nutzenfrage: Was haben wir davon, wenn wir diese Methode in unserem Konstruktionsalltag etablieren? Hier sind die wichtigsten Vorteile: Die Topologieoptimierung hilft uns, eine versagenskritische (brüchige) Konstruktion in eine feste zu verwandeln. Sie hilft uns, eine weiche (nachgiebige) Konstruktion in eine steife zu verwandeln. Sie hilft uns, eine instabile Konstruktion in eine stabile zu verwandeln. Sie hilft uns, eine zu schwere (übergewichtige) Konstruktion in eine leichte zu verwandeln. Und letztendlich hilft sie uns, eine teure Konstruktion in eine kostenoptimierte (materialsparende) zu verwandeln. Kurz gesagt: Die Topologieoptimierung hilft uns, den Spagat zwischen strukturmechanischen Anforderungen und ökonomischen Zielen bestmöglich zu bewältigen.

Diese Methode ist wie ein Kompass, der dem Konstrukteur den Weg zum strukturmechanischen Optimum weist. Sie gibt ihm eine Orientierung im Ozean der Designmöglichkeiten. Sie hilft ihm, unter den tausenden konstruktiven Möglichkeiten die wenigen effektiven Lösungsansätze zu finden. Somit hilft sie ihm, den Konstruktionsprozess zu beschleunigen.

Nun haben Sie eine (vage) Vorstellung davon, was Topologieoptimierung bedeutet und wofür sie gut ist. Aber genauso wichtig ist es, zu begreifen, was Topologieoptimierung *nicht* ist: Sie ist keine Feintuningmethode. Mit der Topologieoptimierung betreiben Sie keine Feinauslegung, um z. B. lokale Schwachstellen zu beseitigen (dafür gibt es die Formoptimierung). Sie ist auch keine Verifikationsmethode. Mit der Topologieoptimierung

erbringen Sie keinen Festigkeits- oder Steifigkeitsnachweis (dafür gibt es die Finite-Elemente-Methode, kurz FEM). Und schlussendlich ist sie keine Allheilmedizin. Mit der Topologieoptimierung werden Sie keine fix und fertige Lösung bekommen, die Sie 1:1 übernehmen können. Das Analysieren, Abstrahieren und Kreieren technisch umsetzbar und wirtschaftlich akzeptabler Lösungen ist und bleibt Ihre Aufgabe.



## Praxistipp #2: Machen Sie den Körper frei!

Jeder Topologieentwurf beginnt mit dem gleichen ersten Schritt: dem Skizzieren des Freikörperbildes. Dabei geht es zunächst darum, die optimierungsbedürftige Struktur von seiner Umgebung freizuschneiden, um die Aktions- und Reaktionsbelastungen zu bestimmen. Genau für diese Belastungen – und das ist wichtig – entwerfen wir die kraftflussgerechte Topologie. So entsteht (meistens) eine fachwerkähnliche Struktur, die fest, steif und leicht zugleich ist.

Vereinfacht formuliert: Topologieoptimierung ist ein Frage-und-Antwort-Spiel. Die Frage lautet: Wie schafft man eine sichere *und* ökonomische Verbindung zwischen der Lasteinleitung (Actio) und der Lastaufnahme (Reactio)? Um die Frage beantworten zu können, müssen wir also die Aktionen und die Reaktionen kennen. Der Topologieentwurf ist dann die Antwort auf diese Belastungsfrage.

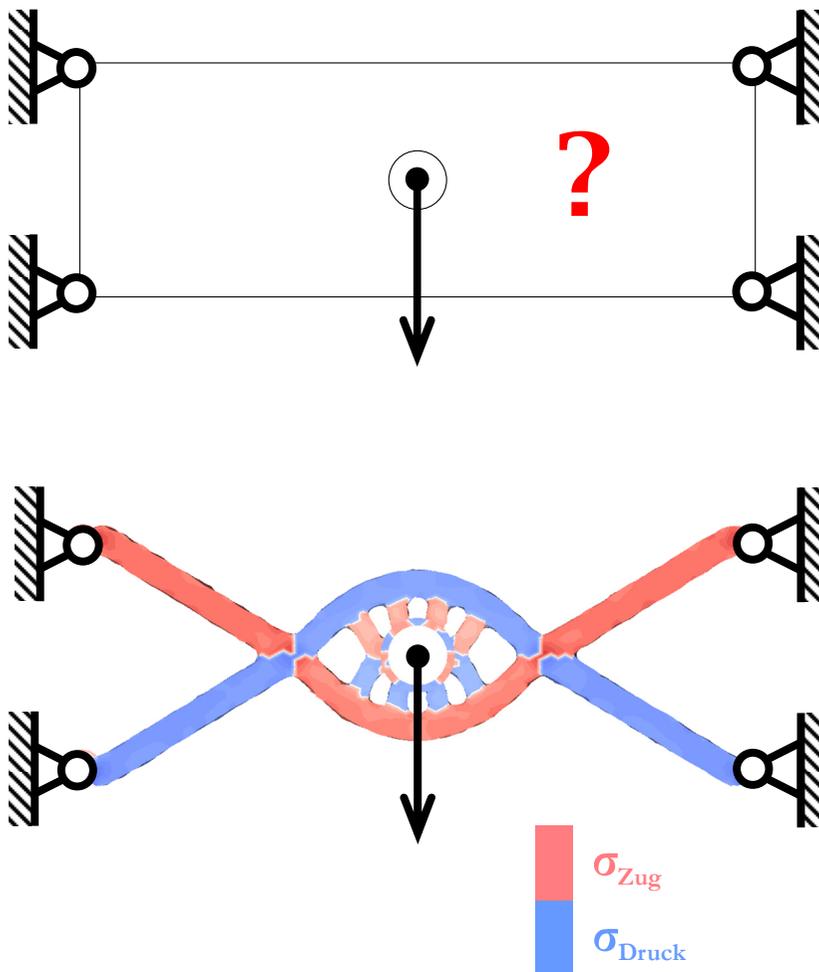
Beim Freischneiden einer Struktur sind zwei Prinzipien wichtig. Diese müssen wir uns zu eigen machen.

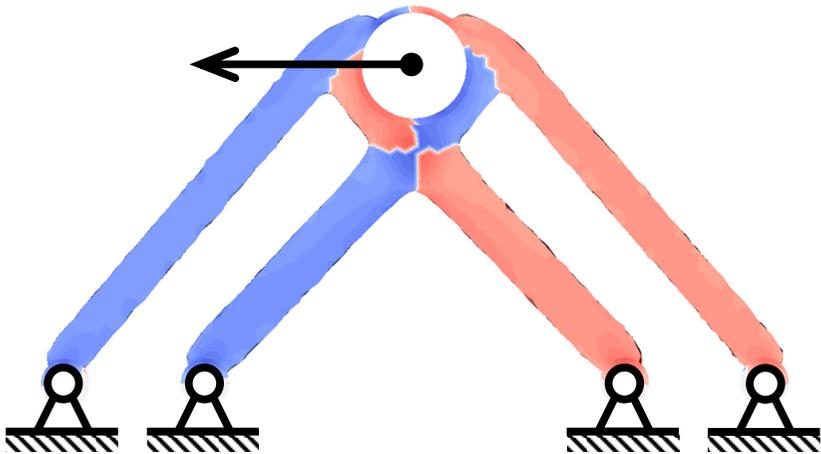
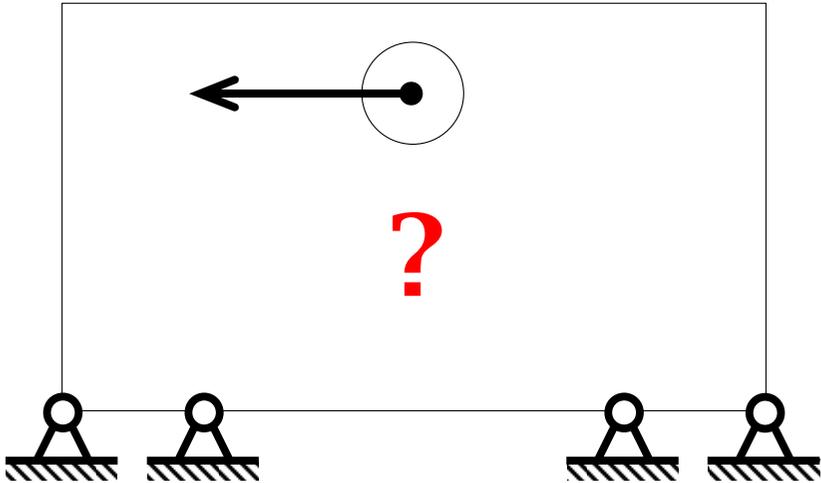
**Erstes Prinzip: Actio = Reactio.** Der Vorgang des Freimachens der Struktur beginnt mit dem dritten newtonschen Axiom, dem Prinzip von Actio und Reactio. Um Ihren Blick für die Aktionen und Reaktionen zu schärfen, nehmen Sie ein Statikbuch (z. B. *Technische Mechanik 1 – Statik* von Russell C. Hibbeler) zur Hand und machen Sie 50, 100 oder 200 Strukturen frei. An dieser Stelle ist Ihre Fähigkeit zu abstrahieren gefragt. Dies erfordert am Anfang etwas Übung.

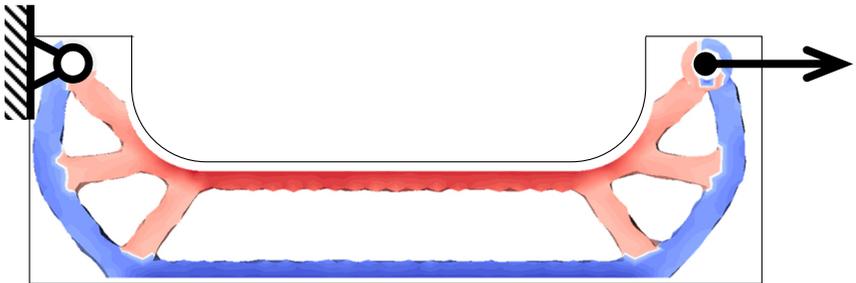
**Zweites Prinzip: Zug- und Druckfelder.** Wenn Sie das Freikörperbild skizziert haben, so kommt der zweite Schritt: die Zug- und Druckbereiche identifizieren. Das Prinzip dahinter ist einfach: Jede Kraft teilt das Spannungsfeld in den Zugbereich (hinter der Kraft) und den Druckbereich (vor der Kraft) auf. Ich verzichte auf eine ausführliche Erklärung und verweise auf das Buch von Claus Mattheck *Denkwerkzeuge nach der Natur*. Darin finden Sie eine leicht verständliche Beschreibung der Zug- und Druckfelder (Kraftkegelmethode).

Der Weg zu einer kraftflussgerechten Topologie führt über die Mechanik. Daher sollten wir die fundamentalen Prinzipien der Mechanik begreifen, um prinzipienorientiert zu optimieren. Natürlich könnte man einwenden, dass die heutigen Optimierungsprogramme uns diese Arbeit abnehmen.

Zum großen Teil ist das auch richtig. Doch die Rollenverteilung ist (noch) klar: Die Rechner sind unsere Diener, wir sind die Herren! Die Berechnungsmodelle aufzubauen, die Berechnungsergebnisse auf Plausibilität zu prüfen und letztendlich die konstruktiven Entscheidungen zu treffen ist und bleibt (noch) unsere Aufgabe. Fassen wir es mit den Worten von Helmut Heugl zusammen: „Der Computer rechnet vor allem damit, dass der Mensch denkt.“







### **Praxistipp #3: Streben Sie ökonomische Lösungen an!**

Wenn Sie eine lasttragende Konstruktion entwerfen, dann sind die Anforderungen hinsichtlich Festigkeits-, Stabilitäts- und Steifigkeitsverhalten (meistens) vorgegeben. Die strukturmechanischen Anforderungen stehen nicht zur Debatte. Völlig offen sind dagegen die Umsetzungsmöglichkeiten, d. h., wie Sie die geforderte Tragfunktion erfüllen. Es gibt hunderte oder gar tausende konstruktive Möglichkeiten, das gewünschte Strukturverhalten zu erreichen. Aber nur wenige dieser Möglichkeiten sind auch ökonomisch. Diese wenigen effizienten Lösungsansätze zu finden ist die Aufgabe der Topologieoptimierung. Merken Sie sich:

#### **Materialeffizienz ist die oberste Maxime der Topologieoptimierung!**

Dies können wir uns wie folgt vorstellen: Fließt die Kraft von der Lasteinleitung (Actio) durch die Struktur zur Lastaufnahme (Reactio), so gibt es immer hoch- und minderbeanspruchte Bereiche. Die hochbeanspruchten Bereiche sind die Kraftpfade maximaler Dehnung (= Hauptzugspannungen) und maximaler Stauchung (= Hauptdruckspannungen). Auf diesen Kraftpfaden muss der Werkstoff angeordnet werden. Warum? Aus einem pragmatischen Grund: Wird jedes Gramm eingesetzten Materials in die Lastübertragung einbezogen, so kann mit minimalem Materialeinsatz ein maximales Tragvermögen erreicht werden. Salopp formuliert: Wenn alle arbeiten, braucht man nur wenige Arbeiter, um die nötige Arbeit zu verrichten.

Um das Gesagte zu verdeutlichen, können Sie einen Streichholztest machen. Nehmen Sie dazu vier Streichhölzer und versuchen Sie, diese durch Zugkraft, Druckkraft, Torsions- und Biegemoment kaputt zu machen. Folgendes wird passieren: Bei reiner Zugbeanspruchung schaffen Sie es nicht, das Streichholz zu zerbrechen. Bei Druckbeanspruchung gelingt Ihnen dies mit relativ hohem Krafteinsatz – und bei Biege- und Torsionsbeanspruchung zerbrechen die Streichhölzer schon mit minimalem Krafteinsatz. Welche Lehre ziehen wir daraus? Bei gleichem Werkstoffeinsatz – in diesem Fall ca. 1 g Holz – erreichen Sie ein maximales Tragniveau bei rein axialer Beanspruchung – Zug und Druck. Und dies gilt nicht nur für Streichhölzer, sondern entsprechend für alle lasttragenden Konstruktionen.

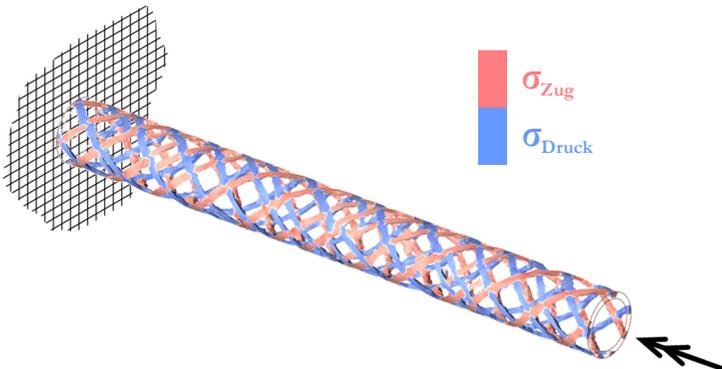
Nun bleibt die Frage zu klären: Wie können wir für beliebige Belastungssituationen die Hauptzug- und Hauptdruckspannungen identifizieren? Betrachten wir dazu drei Möglichkeiten.

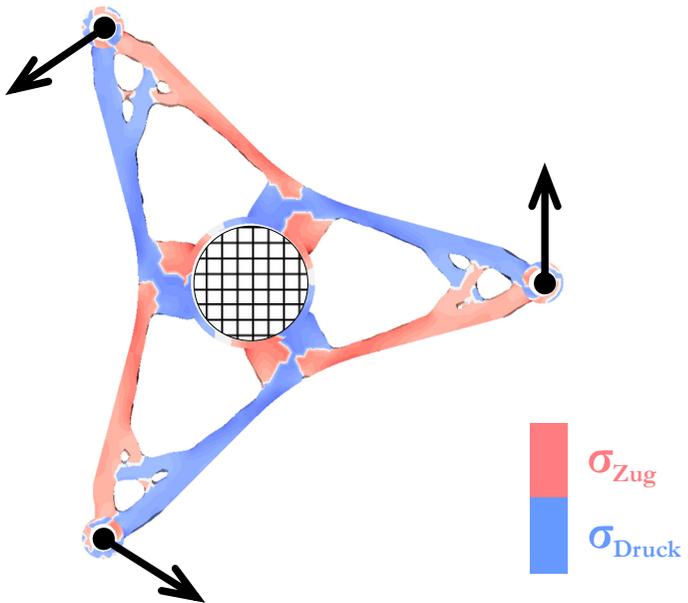
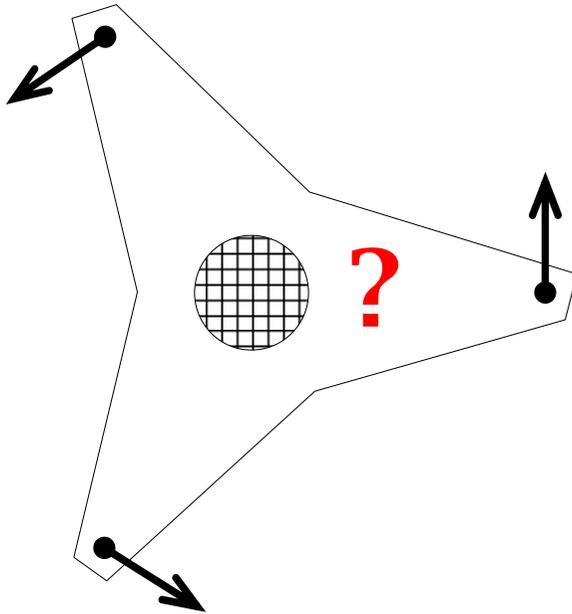
**Erste Möglichkeit: mechanische Prinzipien.** Zuallererst sollten wir uns die Prinzipien des Zusammenwirkens von äußeren Belastungen und inneren Spannungen, von Aktions- und Reaktionsbelastungen, von Schub- und Normalspannungen zu eigen machen. So werden wir in kürzester Zeit die Kernelemente der Struktur erkennen. Dieser Ansatz erfordert zwar am Anfang mehr Einsatz in Form von Zeit und Energie, wird aber dann Ihre beste Versicherung gegen grobe konstruktive Fehler sein.

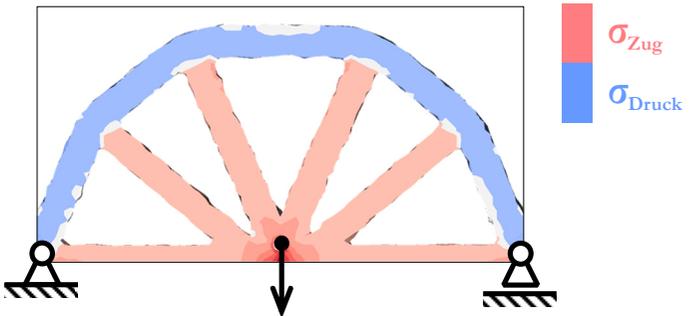
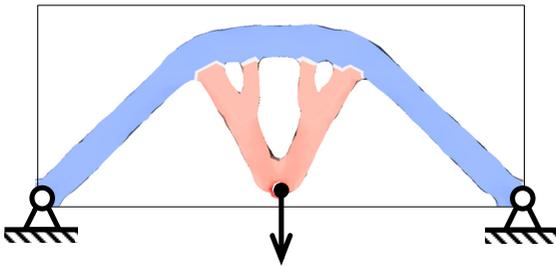
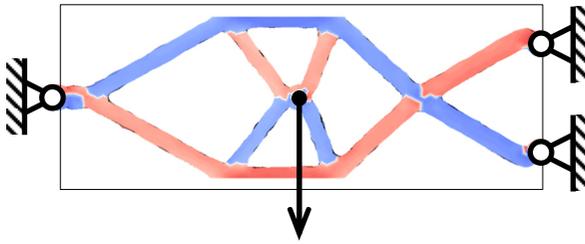
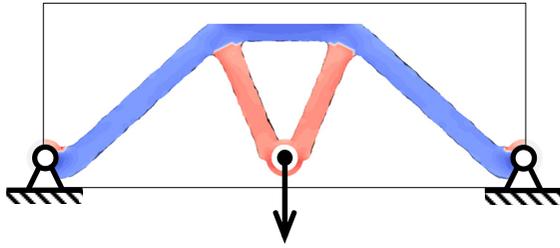
**Zweite Möglichkeit: FEM-Analyse.** Wenn Sie mit Hilfe der FEM Ihre Konstruktion analysieren, so haben Sie die Möglichkeit, sich die Hauptzug- und Hauptdruckspannungen anzuzeigen. Die Höhe der Hauptspannungen ist dann ein Indikator dafür, an welchen Stellen mehr Material benötigt wird und in welchen Bereichen das Material eliminiert werden kann.

**Dritte Möglichkeit: Optimierungsprogramm.** Der Einsatz von Topologieoptimierungsprogrammen ist eine elegante Möglichkeit, die für die Bauteilauslegung relevanten Kraftpfade zu identifizieren. Vor allem bei komplexeren Last-Lagerungs-Bedingungen helfen solche Optimierungswerkzeuge enorm. Dafür wurden diese Programme auch entwickelt.

Je mehr Möglichkeiten Sie beherrschen, desto differenzierter können Sie beim Entwerfen der Bauteiltopologie vorgehen. Noch mehr: Durch die Kombination der Methoden werden Sie in der Lage sein, Ihre Struktur ganzheitlicher zu analysieren und dadurch bessere konstruktive Entscheidungen zu treffen.







■  $\sigma_{Zug}$   
■  $\sigma_{Druck}$

## **Praxistipp #4: Vergessen Sie das Niveau, denken Sie an die Verteilung!**

Der Schaffensprozess einer Konstruktion kann in zwei Phasen unterteilt werden: Zuerst geht es um qualitative Strukturmerkmale – eine harmonische Lastverteilung im Inneren der Struktur. Erst dann konzentrieren wir uns auf die quantitativen Strukturmerkmale – ein ausreichendes Tragniveau der Struktur. Die Frage, die sich sofort stellt, lautet: Wann findet die Topologieoptimierung statt? Die Antwort: ganz am Anfang. Bei der Topologieoptimierung identifizieren wir die Kraftpfade, um darauf den Werkstoff anzuordnen und damit eine kraftflussgerechte Lastverteilung zu erreichen. Einfach gesagt: Im ersten Schritt geht es nur um das Bessermachen, nicht aber schon darum, ob die Struktur für die vorgesehenen Belastungen gut genug ist.

Was bedeutet das für Sie? Das heißt, Sie können vorerst alle Fragen über das Festigkeits- und Spannungsniveau ignorieren und sich ausschließlich auf die kraftflussgerechte Materialverteilung, auf die Qualität konzentrieren. Zwei Aspekte sind dabei wichtig.

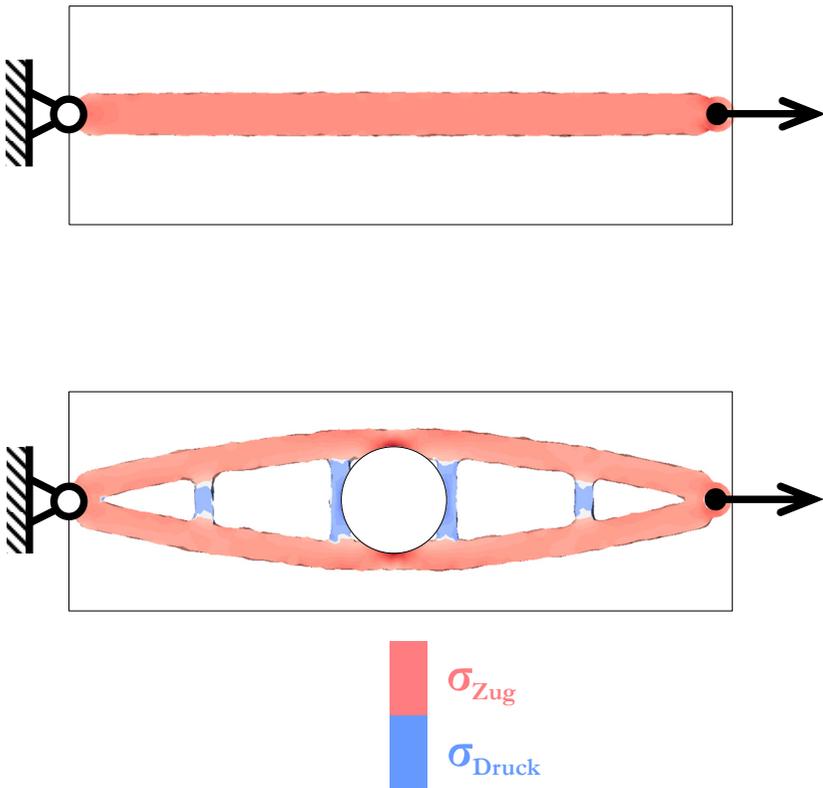
**Erster Aspekt: Das Belastungsniveau spielt keine Rolle.** Kräfte und Momente sind vektorielle Größen und können durch den Angriffsort, die Richtung bzw. den Richtungssinn und den Betrag beschrieben werden. Die ersten beiden Angaben (Ort und Richtung) sind für die Topologiefindung entscheidend. Noch mehr: Ohne diese Angaben ist keine Topologieoptimierung möglich. Die dritte Angabe (Betrag) ist für die Bestimmung der Kraftpfade irrelevant. Ob wir die Struktur mit 1 N, 100 N oder 1000 N belasten, hat keinerlei Auswirkung auf den Topologieentwurf.

Warum ist das so? Ein Beispiel kann dies verdeutlichen: Wenn Sie ein Blatt Papier nehmen, es auf der einen Seite festhalten und auf der gegenüberliegenden Seite mit einer Kraft belasten, so können Sie den Kraftpfad (stramm gezogener Bereich) visuell erkennen. Ob Sie es mit einer hohen oder einer geringen Kraft belasten, ändert nichts am Ergebnis. Das Blatt Papier steht symbolisch für irgendeine lasttragende Struktur. Sinngemäß können Sie dieses Prinzip auf jede lasttragende Konstruktion übertragen.

**Zweiter Aspekt: Die Werkstoffauswahl spielt keine Rolle.** Wenn wir für unsere Konstruktion eine Topologie entwerfen wollen, um mit minimalem Materialaufwand die Last von A (Actio) nach R (Reactio) zu über-

tragen, so spielt für diese Fragestellung das Material keine Rolle. Für den Topologieentwurf macht es keinen Unterschied aus, ob wir Stahl ( $E = 210 \text{ GPa}$ ), Aluminium ( $70 \text{ GPa}$ ), Holz ( $10 \text{ GPa}$ ) oder Kunststoff ( $5\text{--}15 \text{ GPa}$ ) einsetzen. Warum? Der Grund ist einfach: Das Material muss – unabhängig von seinen Eigenschaften – im Spannungsfeld zwischen der Lasteinleitung und der Lastaufnahme angeordnet werden. Nur wenn das Material in die Lastübertragung involviert ist, erfüllt es seinen Zweck – es arbeitet. Das außerhalb der Spannungsfelder angeordnete Material leistet keinen Beitrag zur Lastübertragung, ist also unnötiger Ballast.

**Merken Sie sich:** Der Topologieentwurf ist unabhängig vom Belastungsniveau und der Werkstoffauswahl.



## Praxistipp #5: Achten Sie auf die (A)Symmetrie!

Jeder kraftflussgerechte Topologieentwurf spiegelt die Last- und Lagerungssituation wider. Aus diesem Grundsatz können wir ein einfaches Kriterium für die (A)Symmetrie der Topologie ableiten: Äußere (A)Symmetrie ergibt innere (A)Symmetrie. Bei symmetrischen Last-Lagerungs-Bedingungen sollten wir eine symmetrische Konstruktion anstreben. Dies ist eine logische – im Sinne der Mechanik topologische – Antwort auf die symmetrische Belastungskonstellation. Auch das Gegenteil gilt: Bei asymmetrischen Last-Lagerungs-Bedingungen sollten wir eine asymmetrische Topologie anstreben. Auch in diesem Fall spiegelt die Topologie die äußeren Belastungen wider.

Wodurch kann die Symmetrie gestört werden? Im Wesentlichen gibt es vier Bedingungen, die zur Asymmetrie führen.

**Erste Bedingung: Belastungen.** Symmetrie kann durch äußere Belastungen (Kräfte/Momente/Drücke) gebrochen werden. Die Belastungen können sich im Hinblick auf den Angriffsort, die Wirkrichtung oder den Betrag unterscheiden.

**Zweite Bedingung: Lagerungen.** Symmetrie kann durch Lagerung (Fest- oder Loslager) gebrochen werden. Zwei Fälle sind denkbar. Erster Fall: Die Lagerung ist asymmetrisch. Zweiter Fall: Trotz symmetrischer Lagerung sind die Lagerwertigkeiten unterschiedlich. Das bedeutet, dass sich die Anzahl der Freiheitsgrade (translatorische/rotatorische) in den Lagerstellen und damit die Reaktionslasten unterscheiden. Und dies wirkt sich natürlich auf die Bauteiltopologie aus.

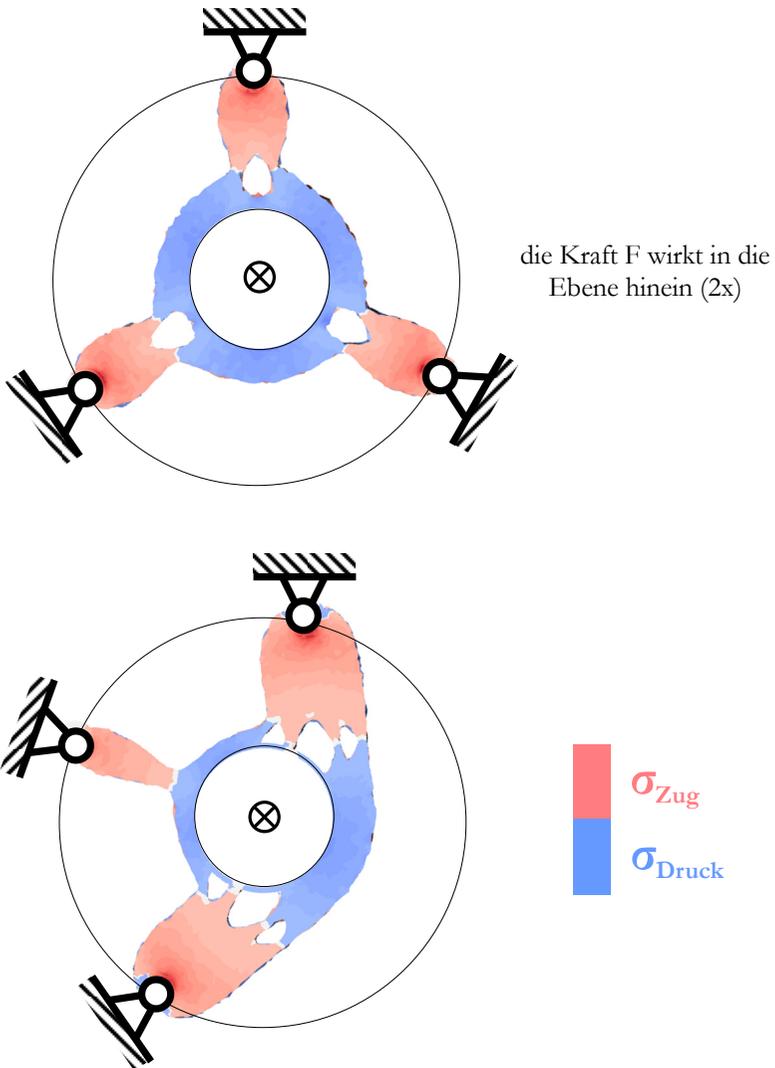
**Dritte Bedingung: Designräume.** Symmetrie kann durch Designräume gebrochen werden. Bei ungünstigen Bauraumverhältnissen (Bauteilfunktion, Freigänge) kommt es oft vor, dass die natürlichen Kraftpfade unterbrochen werden.

**Vierte Bedingung: Fertigungsrestriktionen.** Symmetrie kann durch Fertigungseinschränkungen gebrochen werden. Vorgaben hinsichtlich der Entformungsrichtung führen oft zu einer unerwünschten Asymmetrie.

Bewerten Sie die Topologieentwürfe auf der nächsten Seite und fragen Sie sich: Wodurch wird im zweiten Fall die Symmetrie gebrochen? Welche

Konsequenzen hat dies auf die Topologie, den Materialeinsatz und das Steifigkeitsverhalten der Struktur?

Noch einmal: **Achten Sie auf die (A)Symmetrie!** Und vielleicht klingt dieser Tipp in Ihren Ohren banal, doch aus eigener Praxis weiß ich, dass dieses Prinzip oft genug verletzt wird.



## Praxistipp #6: Achten Sie auf die Nuancen!

Die Anfangsphase der Konstruktion zeichnet sich durch zweierlei Besonderheiten aus: Chancen und Risiken. Einerseits haben wir die Chance, mit minimalem Materialeinsatz das gewünschte Strukturverhalten zu erreichen. Andererseits besteht das Risiko, durch „kleine“ konstruktive Fehlentscheidungen großes Potenzial zu verschenken. Und ob wir das strukturelle Optimum erreichen oder kilometerweit daran vorbeischießen, hängt oft von Nuancen ab. Diese auf den ersten Blick unbedeutenden „Kleinigkeiten“ machen letztendlich den ganzen Unterschied aus.

Sie wissen bereits: Der Topologieentwurf hängt von mehreren Faktoren ab: den Fertigungsrestriktionen, den Symmetriebedingungen und dem zur Verfügung stehenden Designraum. Doch all diese Faktoren sind sekundär. Von primärer Bedeutung für die Topologiefindung sind die äußeren Belastungen – Aktionen und Reaktionen. Denn die Topologie ist die Antwort auf die Belastungsfrage. Ändern sich die äußeren Belastungen (Ort, Richtung), so muss sich das von den Belastungen abgeleitete topologische Design ebenfalls ändern.

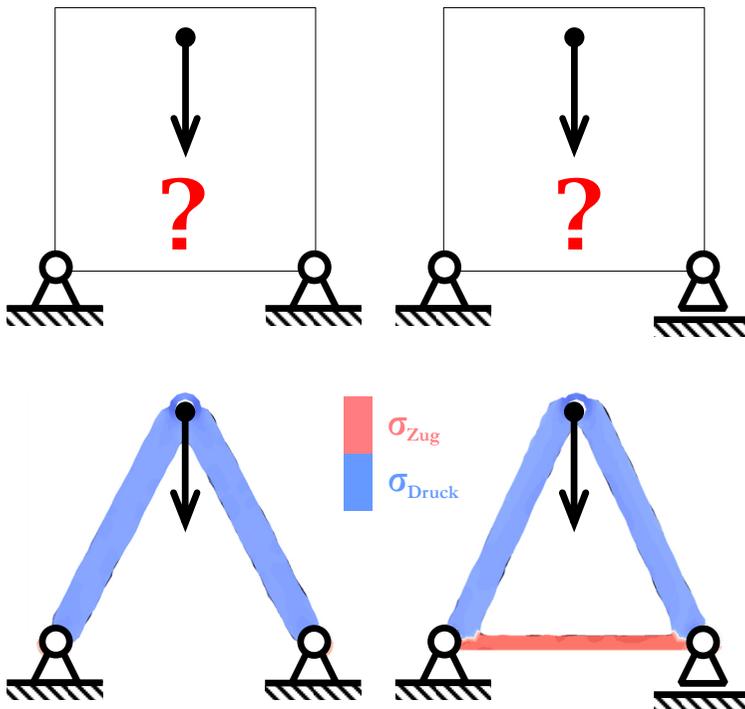
Mit zwei Beispielen möchte ich das Gesagte verdeutlichen.

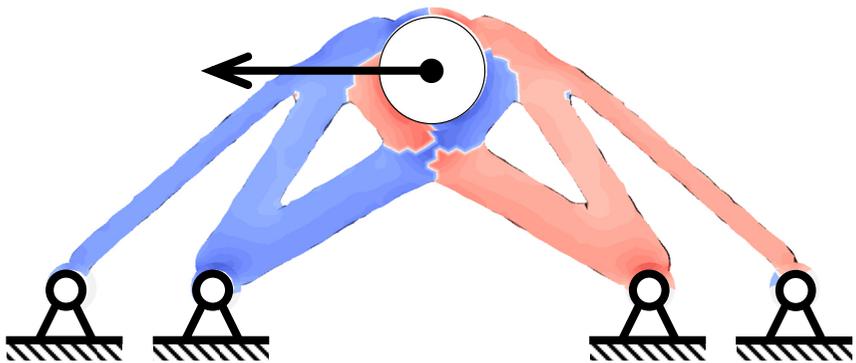
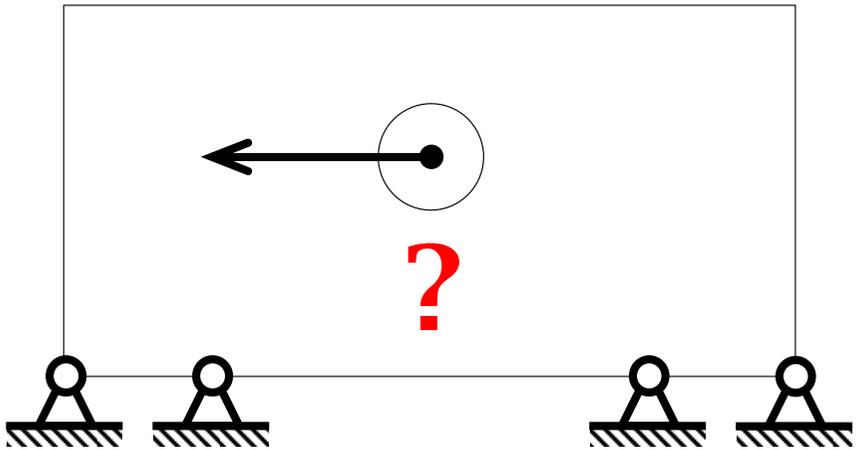
**Erstes Beispiel: Lagerwertigkeit.** Betrachten Sie dazu das Beispiel auf der nächsten Seite. Die Last- und Lagerungsbedingungen sind ähnlich, doch nicht gleich. Im ersten Fall wird die Struktur durch zwei Gelenke gelagert. Jedes Lager verhindert zwei translatorische Bewegungen, ist also ein zweiwertiges Lager. Daraus ergibt sich eine einfache Topologie, die aus zwei unter  $\pm 45^\circ$  angeordneten Druckelementen besteht. Im zweiten Fall wird ein Gelenk durch ein Rollenlager ersetzt, d. h., das Lager verhindert die horizontale Bewegung nicht (einwertiges Lager). In diesem Fall sollte ein Zugelement hinzugefügt werden, um den „schmerzvollen Spagat“ der Struktur zu verhindern. Das Beispiel zeigt deutlich: Je mehr Bewegung in den Lagerstellen (geringe Wertigkeit) möglich ist, desto großvolumiger muss die Konstruktion werden, um die gewünschte Steifigkeit/Festigkeit zu erzielen.

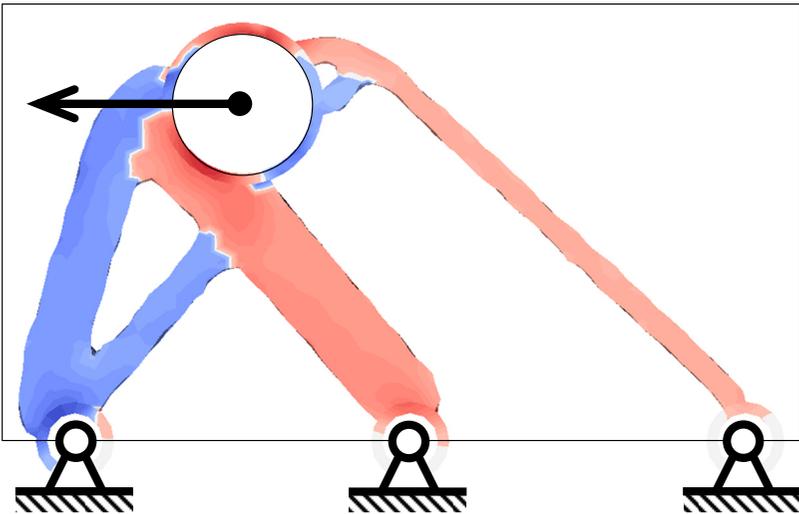
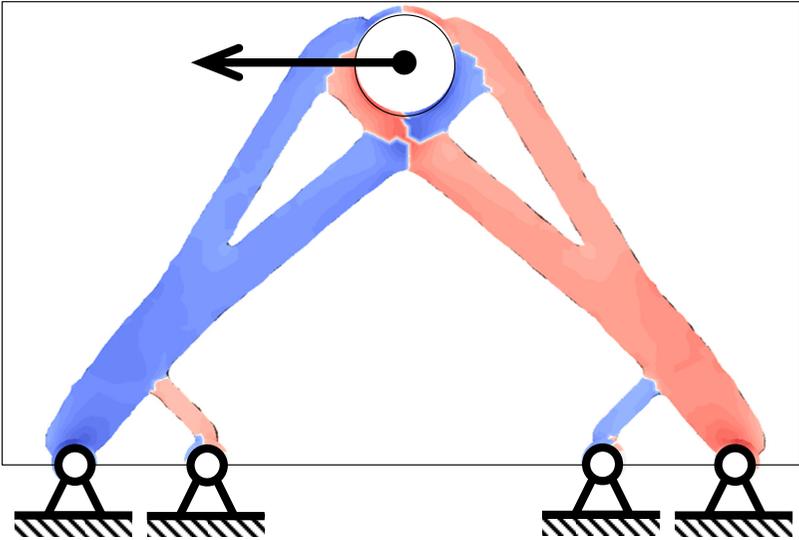
**Zweites Beispiel: Kraftvektor.** Eine auf die Struktur wirkende Kraft wird durch drei Größen beschrieben: Angriffsort, Richtung und Betrag. Der Betrag der Kraft spielt bei der Topologiefindung keine Rolle (siehe Praxistipp #4). Die Richtung der Kraft ist für den Topologieentwurf absolut

entscheidend. Warum dies so ist, erfahren Sie im Praxistipp #9. Als Letztes bleibt der Angriffsort der Kraft.

Zum Angriffsort der Kraft ist einiges zu sagen: **Erstens:** Bei rein axialer Belastung (Zug/Druck) sucht sich die Kraft die nächstliegende Lagerung. Dies ist auch plausibel, denn je kleiner die Entfernung zwischen der Lasteinleitung und der Lastaufnahme ist, desto geringer ist die innere Arbeit und umso kleiner der Materialaufwand. Dies ist der erstrebenswerte Zustand. **Zweitens:** Greift eine Querkraft die Struktur an, so bestimmt der Kraftort die Höhe des Biegemomentes. In diesem Fall wäre die ideale Position der Lagerstellen eine Anordnung der Zug-Druck-Elemente unter  $\pm 45^\circ$  zur Kraftrichtung. Je mehr die Lagerstellen von dieser Position abweichen, desto höher ist der Materialbedarf, um die geforderte Festigkeit/Steifigkeit zu erreichen. **Drittens:** Wandert die Kraft in Richtung einer Lagerstelle, so wird die naheliegende Lagerstelle mehr belastet und die fernliegende Lagerstelle entlastet. Diese neue Belastungskonstellation ergibt eine völlig neue Topologie.







## Praxistipp #7: Beachten Sie: Biegung „liebt“ Höhe!

Bei lasttragenden Konstruktionen ist die Art der Beanspruchung das erste – und wahrscheinlich das Wichtigste – Unterscheidungsmerkmal. Es ist ein himmelweiter Unterschied, ob die Struktur auf Zug, Druck, Schub, Torsion oder Biegung beansprucht wird. Denn jede Beanspruchung hat ihre Eigenart, die bei der Topologiefindung unbedingt beachtet werden muss: Zugstrukturen sind besonders kerbempfindlich. Druckstrukturen sind vor allem stabilitätsgefährdet. Bei Torsionsstrukturen ist entscheidend, ob sie offen oder geschlossen sind. Und was ist mit Biegung?

Drei Aspekte zeichnen biegebeanspruchte Strukturen aus. Erstens: Biegespannungen haben die größte Zerstörungswut – sind Bauteilkiller! Zweitens: Auf Biegung beanspruchte Strukturen erfordern maximalen Materialaufwand. Drittens: Biegestrukturen kommen in der Natur und Technik am häufigsten vor. Aus diesen Gründen sollten wir der Biegebeanspruchung die größte Aufmerksamkeit schenken.

Was sollten wir tun, um eine biegegerechte Bauteiltopologie zu entwerfen? Die wichtigsten konstruktiven Möglichkeiten werden mit einer Größe beschrieben: dem axialen Flächenmoment. Und das Flächenmoment hängt in erster Linie von der Höhe des Trägers ab. Dabei muss das Flächenmoment – wie auch die Höhe – dem Biegemoment folgen. Grundsätzlich sind hierbei drei Szenarien denkbar.

**Erstes Szenario: Das Biegemoment nimmt zu.** Wenn das Biegemoment von der Lasteinleitung zur Lastaufnahme größer wird (linear/parabolisch), sollte das axiale Flächenmoment entsprechend zunehmen.

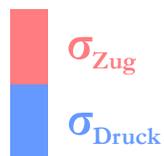
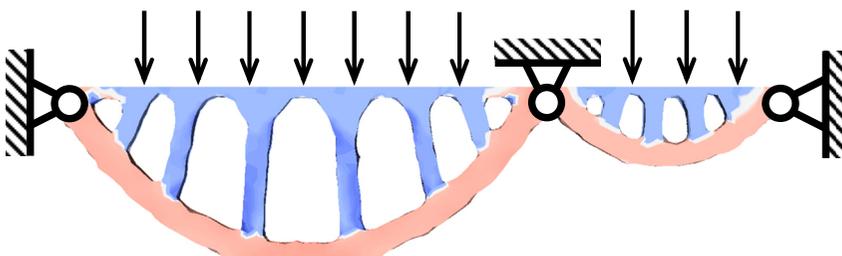
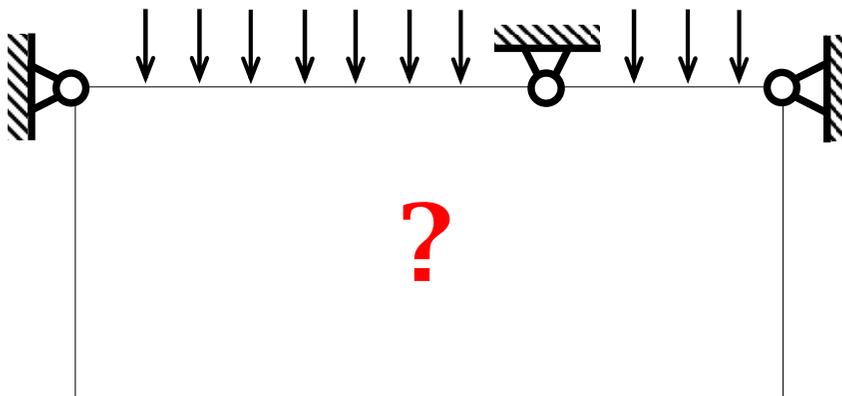
**Zweites Szenario: Das Biegemoment nimmt ab.** Wenn das Biegemoment von der Lasteinleitung zur Lastaufnahme kleiner wird, sollte das axiale Flächenmoment entsprechend abnehmen.

**Drittes Szenario: Das Biegemoment bleibt konstant.** Wenn das Biegemoment von der Lasteinleitung zur Lastaufnahme auf einem Niveau bleibt, sollte das axiale Flächenmoment konstant bleiben.

Merken Sie sich:

**Das Flächenmoment folgt dem Biegemoment!**

Aus dem Topologieentwurf auf der nächsten Seite wird der Zusammenhang zwischen der Länge des Biegeträgers und der daraus resultierenden Höhe deutlich: Je länger der Parabelträger wird, desto höher muss er sein, um die geforderte Festigkeit/Steifigkeit bei minimalem Ressourceneinsatz zu erzielen. Wenn Sie diese Abhängigkeit verinnerlicht haben, können Sie für jeden Biegeträger binnen kurzer Zeit die äußeren Konturen, den Trägerumriss entwerfen.



## **Praxistipp #8: Konstruieren Sie kraftflussgerechte Kragarme!**

Zunächst die Definition: Ein Kragarm ist ein aus einer festen Basis herausragender Träger, der durch Kräfte, Momente oder Drücke belastet wird. Wenn Ihnen diese Beschreibung zu fade vorkommt, gebe ich Ihnen einige Beispiele zu Kragarmen aus der Natur und Technik: Arme, Beine, Finger, Zähne, Hörner, Bäume, Äste, Gräser, Fahrradlenker, Pedale, Hebel, Träger sind im Sinne der Konstruktion einfache Kragarme. Was ist das gemeinsame Merkmal all dieser Strukturen? Sie sind an einem Ende fest verankert und werden am anderen Ende belastet. Wenn Sie an die von Ihnen geschaffenen Konstruktionen denken, so werden Sie sich sicherlich auch an einige Kragarme erinnern.

Da Kragarme hohe Praxisrelevanz haben, sollten wir sie hinsichtlich der Lastverteilung im Inneren analysieren. Die Analyse hilft Ihnen, kraftflussgerechte Topologien zu entwerfen. Jeder Kragarm kann entsprechend der Spannungsverteilung in drei Bereiche aufgeteilt werden.

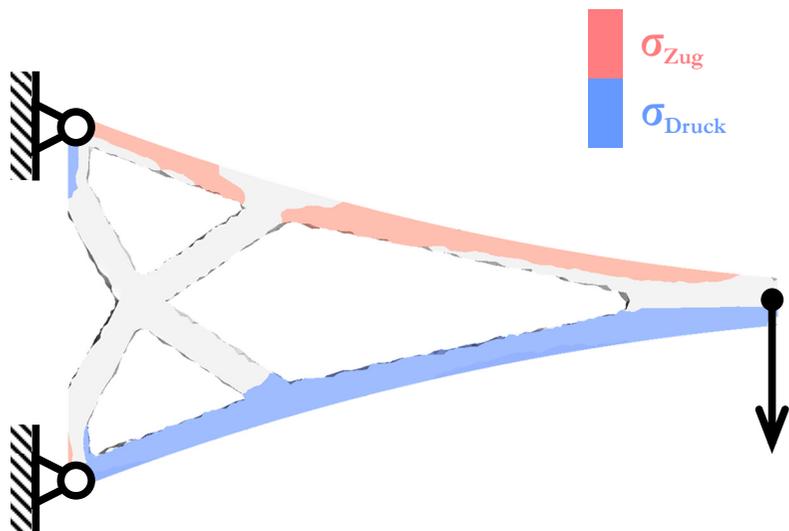
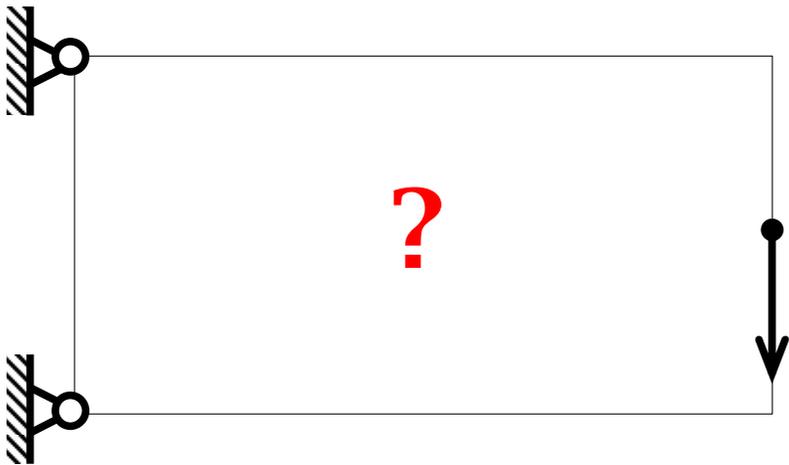
**Randbereich #1: Zug.** Der eine äußere Gurt übernimmt die Zugspannungen. Die Zugspannungen nehmen über dem Querschnitt von außen nach innen in Richtung der neutralen Faser ab und entlang des Kragarms von der Lasteinleitung zur Lastaufnahme zu. Bei der Gestaltung des Zuggurtes sollten die Besonderheiten der Zugbeanspruchung beachtet werden – vor allem die Kerbempfindlichkeit.

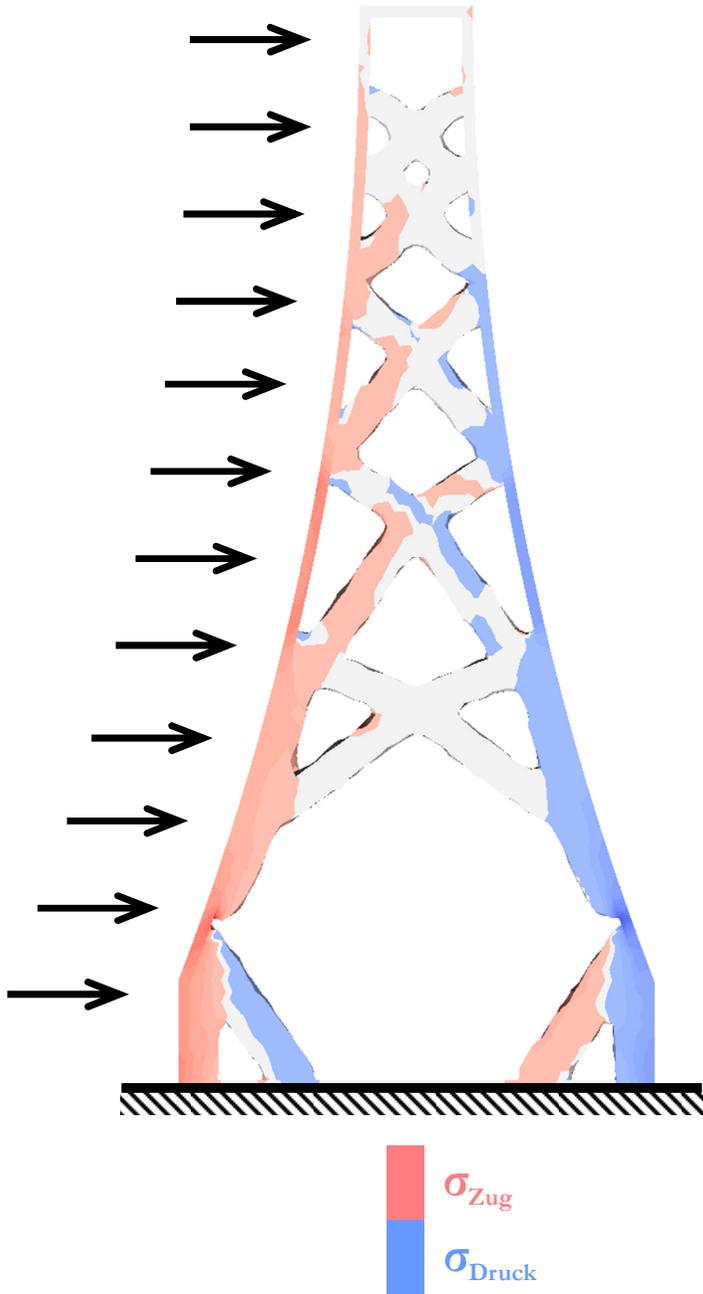
**Randbereich #2: Druck.** Der Druckgurt ist das Pendant zum Zuggurt. Beide Bereiche – Zug und Druck – arbeiten im Tandem. Auch für den Druckgurt gilt: Die Druckspannungen nehmen von außen nach innen in Richtung der neutralen Faser ab und entlang des Trägers von der Lasteinleitung zur Lastaufnahme zu. Bei der Gestaltung des Druckgurtes sollten die Besonderheiten der Druckbeanspruchung beachtet werden – vor allem die Knick- und Beulgefahr.

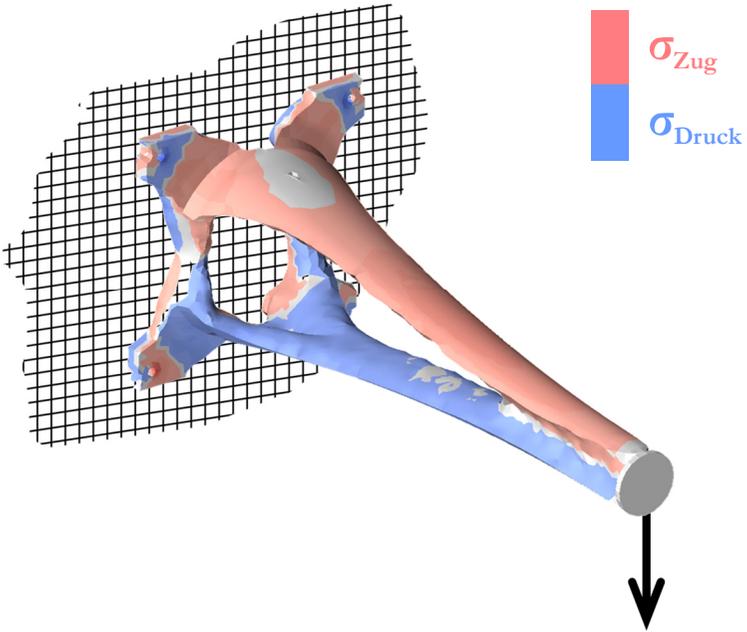
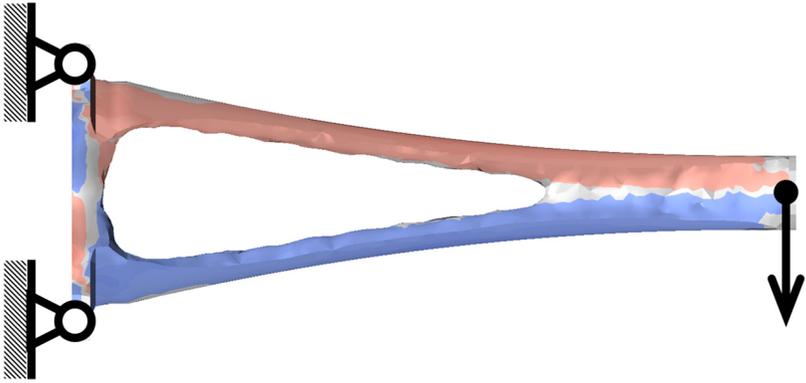
**Mittelbereich: Schub.** Der Mittelbereich verbindet die beiden Randschichten. Die Schubspannungen betragen in den Randschichten 0 MPa, nehmen von außen nach innen zu und erreichen in der Mitte die maximalen Werte. In diesem Sinne sollte der mittlere Bereich auch gestaltet werden. Welche Möglichkeiten gibt es? Die Verbindung zwischen dem Zug- und Druckgurt kann erstens durch einen vertikalen Steg erfolgen; in diesem Fall entsteht ein Doppel-T-Träger. Die Verbindung zwischen den beiden Randbereichen – Zug und Druck – kann zweitens durch V- oder

X-Rippen erfolgen, die unter  $\pm 45^\circ$  zur Biegeachse angeordnet werden. Die Verbindung zwischen den beiden Randbereichen – Zug und Druck – kann drittens durch ein beliebiges Dreiecksmuster erfolgen.

Analysieren Sie die auf der nächsten Seite dargestellten Kragarme. Sie werden feststellen, dass eine 3-Punkt-Biegestruktur als eine Kombination aus zwei Kragarmen betrachtet werden kann. Die Last-Lagerungs-Bedingungen entscheiden darüber, wie die Kragarme anzuordnen sind.







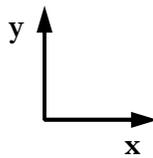
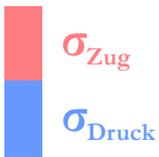
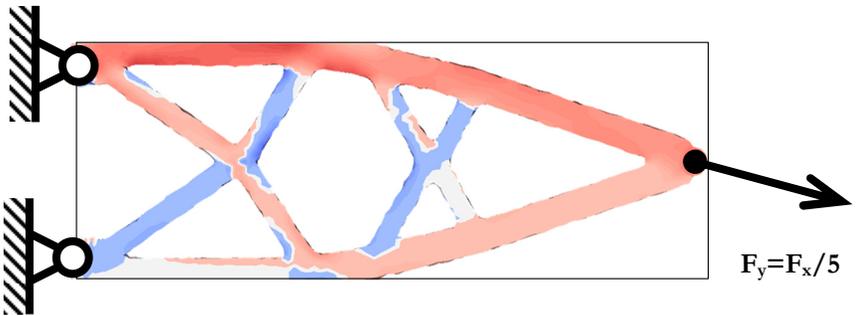
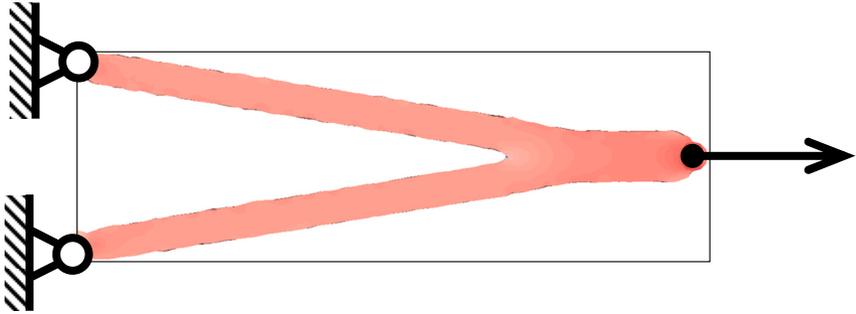
## **Praxistipp #9: Finden Sie die designbestimmenden Belastungen!**

Bewerten Sie bitte die beiden Topologieentwürfe auf der Seite 31. Sehen diese ähnlich aus? Nein. Warum nicht? Zwischen beiden Entwürfen gibt einen kleinen, aber entscheidenden Unterschied: die Krafrichtung. Im ersten Fall wirkt eine rein axiale Kraftkomponente. Die sich aus den Last-Lagerungs-Bedingungen ergebende Topologie ist trivial. Im zweiten Fall gibt es eine Querkraftkomponente, die nur  $1/5$  der Axialkraft beträgt. Und diese kleine Querkraft macht den ganzen Unterschied zwischen den beiden so unterschiedlichen Topologieentwürfen aus.

Vereinfacht gesagt, können wir zwischen gefährlichen (designbestimmenden) und harmlosen Belastungen unterscheiden. Das Kriterium dafür, ob die Belastung gefährlich oder harmlos ist, ist weniger die Höhe der Belastung, sondern mehr die Art der Beanspruchung, die sich aus der Belastung ergibt. Das bedeutet: Harmlose Belastungen sind diejenigen, die reine Zug- oder Druckbeanspruchungen verursachen. In diesen Fällen erreichen wir maximales Tragvermögen bei minimalem Werkstoffeinsatz. Gefährliche Kraftkomponenten hingegen sind diejenigen, die zur Biege- oder Torsionsbeanspruchung führen, d. h., wo Momente im Spiel sind. In solchen Fällen müssen wir mehr bzw. besseren Werkstoff einsetzen, um die geforderte Tragfunktion zu erfüllen.

Genau das ist das Tückische: Es ist im ersten Moment kontraintuitiv, eine betragsmäßig hohe Kraft zu ignorieren und sich auf eine verhältnismäßig kleine Kraftkomponente zu konzentrieren. Damit wir nicht in diese Falle tappen, sollten wir unsere Aufmerksamkeit vorrangig auf die Beanspruchungsart (Zug, Druck, Torsion, Biegung) richten, nicht auf die Belastungshöhe.

Hier noch einige Hinweise dazu: Eine Querkraft bestimmt die Topologie (meistens) mehr als eine Axialkraft. Der Grund: Eine Querkraft verursacht Biegespannungen, die großen Schaden anrichten können. Eine weit von der Lagerstelle entfernte Kraft bestimmt die Topologie (meistens) mehr als eine in der Nähe der Lagerstelle angreifende Kraft. Der Grund: größere Entfernung, größerer Hebel, höhere Biegespannungen, mehr Stress, höherer Materialbedarf. Ein Biegemoment bestimmt die Topologie (meistens) mehr als ein Torsionsmoment. Der Grund: Die Spannungen sind bei Biegestrukturen inhomogener verteilt als bei Torsionsstrukturen.



## Praxistipp #10: Favorisieren Sie Dreiecke!

Im Alltagsgebrauch wird Dreiecksbeziehung oft mit Spannung assoziiert. Ganz anders ist es bei der Topologieoptimierung: Eine Dreiecksbeziehung führt zur Spannungsreduzierung. Eine aus Dreiecken zusammengesetzte Topologie ergibt – verglichen z. B. mit Rechtecken – eine robuste und spannungsarme Konstruktion. Werfen wir einen Blick in die Architektur und nehmen als Beispiel ein Fachwerk. Dabei müssen wir gar nicht so lange suchen, da wir von Fachwerkkonstruktionen umgeben sind: Brücken, Strommasten, Dachkonstruktionen, Fachwerkhäuser, Träger, Kräne, Türme (z. B. der Eiffelturm) ... Was haben all diese Bauwerke aus struktureller Sicht gemeinsam? Sie setzen sich aus einfachen Dreiecken zusammen.

Das sollten Sie verinnerlichen: Ein Dreieck ist die kleinste stabile Einheit einer ebenen (kraftflussoptimierten) Struktur (2D). Ein Tetraeder – ein aus vier Dreiecken bestehendes Gebilde – ist die kleinste Einheit einer räumlichen Struktur (3D). Das Entwerfen einer kraftflussgerechten Topologie kann somit auf eine geschickte Aneinanderreihung von Dreiecken reduziert werden. Es bleibt nur noch die Frage: Wie gehen wir dabei vor?

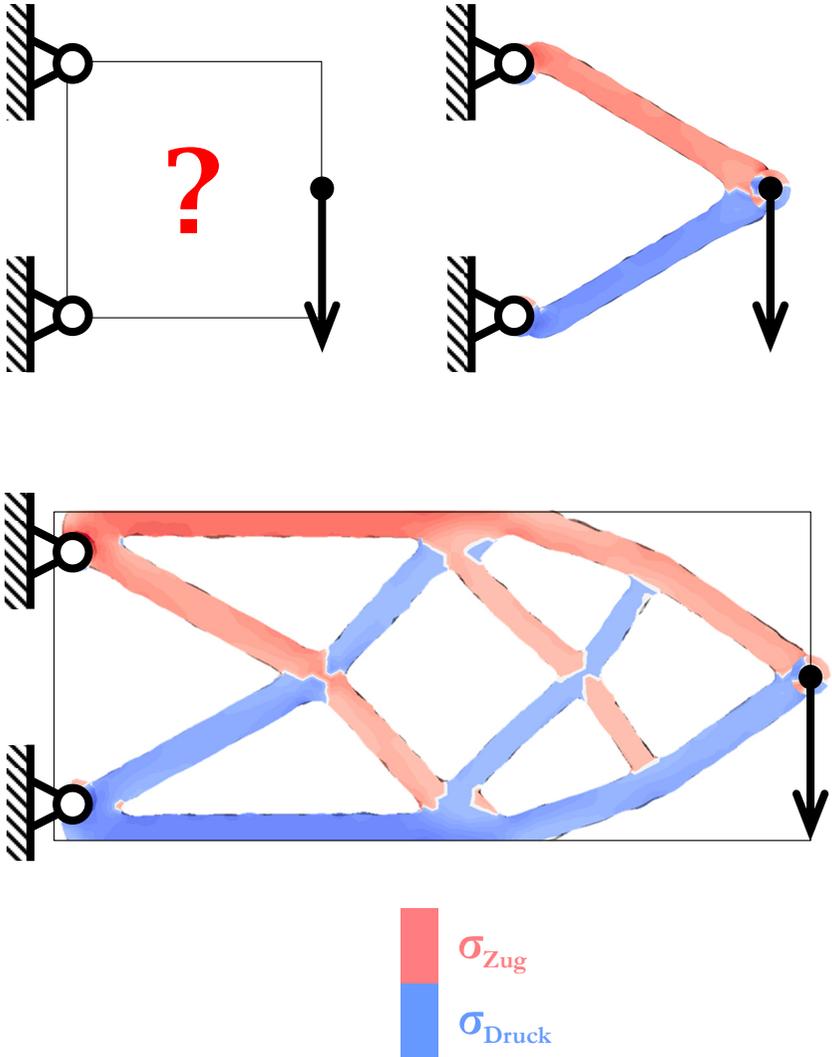
Der Entstehungsprozess erfolgt gemäß der Devise „von außen nach innen“ und kann in zwei Schritte aufgeteilt werden.

**Erster Schritt: äußere Konturen.** Zuerst zeichnen wir den Umriss der Konstruktion, die Silhouetten der Struktur. Die äußeren Belastungen (von Actio nach Reactio) werden durch ein Polygon verbunden. Das wichtigste Kriterium für das Auffinden der optimalen Kontur ist der Biegemomentenverlauf: Mit zunehmendem Biegemoment nimmt die Trägerhöhe (und damit auch das Flächenmoment) zu. Dabei ergeben sich oft Parabel-, Trapez-, Dreieck- oder Rechteckkonturen.

**Zweiter Schritt: innere Struktur.** Sobald der Trägerumriss festgelegt ist, gestalten wir das Innere der Struktur. Hier gibt es eine einfache Regel: Verbinden Sie die Umrisslinien mit Dreiecken. Die Dreiecke sollten möglichst gleichseitig sein, also keine spitzen Winkel haben. So ergeben sich aus vertikalen, horizontalen und diagonalen Elementen unterschiedliche Dreiecksmuster.

Analysieren Sie die beiden Topologien auf der nächsten Seite. Der erste Topologieentwurf ist ganz einfach: Mit zwei Elementen unter  $\pm 45^\circ$  ver-

binden wir Aktionen und Reaktionen. Es ergibt sich ein Dreieck. Der zweite Topologieentwurf ist auch einfach, nur etwas umfangreicher. Die Topologie ist eine Zusammensetzung aus mehreren Dreiecken.



## Praxistipp #11: Betreiben Sie legale Spionage!

Zunächst die gute Nachricht: Wir sind umgeben von topologisch optimalen Konstruktionen. Die Natur ist ein riesiges Reservoir an optimalen strukturmechanischen Lösungen. Es gibt tausende von Menschenhand geschaffene Konstruktionen, die aus mechanischer Sicht eine Vorbildfunktion übernehmen können. Und natürlich gibt es Literatur, die mit dem Thema *Topologieoptimierung* verwandt ist. Wir müssen „nur“ lernen, das Richtige zu sehen, zu abstrahieren, um die zugrundeliegenden Prinzipien zu erkennen und anzuwenden. An dieser Stelle möchte ich Ihnen dazu einige Anregungen geben.

**Erste Inspirationsquelle: Brücken.** Im Grunde ist jede lasttragende Konstruktion eine Brücke zwischen der Lasteinleitung (Actio) und der Lastaufnahme (Reactio). Die strukturmechanischen Anforderungen sind immer ähnlich: die Tragfunktion zuverlässig, resonanzfrei und materialsparend zu erfüllen. Daher können viele Prinzipien des Brückenbaus sinngemäß auf Ihre Konstruktion übertragen werden. Nun bleibt die Frage: Wie kommen wir an die Geheimnisse der Brückenkonstruktion? Hier sind drei pragmatische Möglichkeiten. Erstens: Spielen Sie das Konstruktionspiel *Bridge Constructor*. Sie werden zum Brückenbauer und sammeln Ihre eigenen Erfahrungen durch Tun. Zweitens: Schauen Sie sich reale Brücken an und fragen Sie sich: Welche Aufgabe hat jedes einzelne Element? So gewinnen Sie ein tieferes Verständnis vom funktionalen Aufbau der Brücken. Drittens: Lesen Sie Bücher über Brücken. Ein schönes Buch ist z. B. *Die 75 beeindruckendsten Brücken der Welt* von Ian Penberthy.

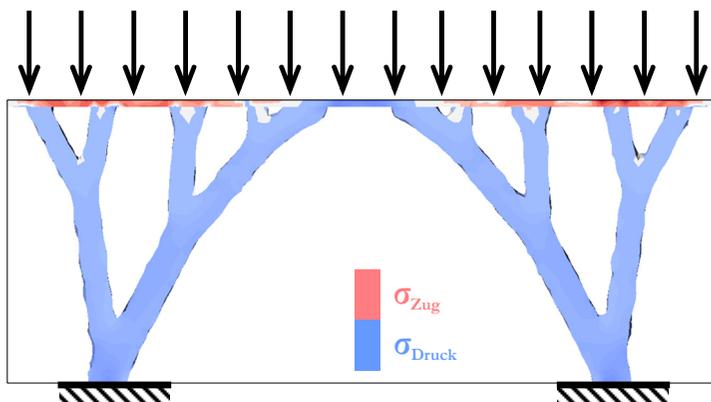
**Zweite Inspirationsquelle: Fachwerke.** Fachwerke sind in vieler Hinsicht strukturmechanische Vorbilder. Sie ermöglichen es, hohe Kräfte über große Entfernungen zu übertragen, und dies bei minimalem Materialaufwand. Das Gute ist: Es gibt zahlreiche „nackte“ Fachwerke, die uns ihren raffinierten Aufbau freiwillig zeigen. Hier einige Beispiele. Der Eiffelturm ist wahrscheinlich die prominenteste Fachwerkkonstruktion der Welt, ein Paradebeispiel für höhere Ingenieurkunst. Oder: Kräne verraten uns, wie sicherheitsanspruchsvolle Fachwerkstrukturen aufgebaut werden müssen. Ein weiteres Beispiel: Strommasten. Es gibt Fanklubs – haben Sie das gewusst? –, die die Schönheit der Strommasten bewundern. So weit müssen Sie natürlich nicht gehen. Doch Sie können, wenn Sie wollen, von diesen Bauwerken im Hinblick auf topologischen Aufbau einiges lernen.

**Dritte Inspirationsquelle: Skelette.** Nehmen wir als Beispiel das menschliche Skelett. Die 206 Knochen des Skeletts betragen gerade mal 12 % des Körpergewichts und bilden eine stabile Stützstruktur für unseren Körper. Unser Skelett ist ein mechanisches Vorbild, von dem wir viel lernen können. Wie gehen wir dabei vor? Besorgen Sie sich ein Buch über Sportanatomie, z. B. *Sportanatomie* von Thorsten Gehrke. Wenn Sie das in diesem Buch vorgestellte Wissen durch Ihre Topologiebrille betrachten, so gewinnen Sie wertvolle Erkenntnisse, angefangen vom Faserverlauf der Bauchmuskeln über die Querschnittstopologie der Röhrenknochen bis hin zu beanspruchungsgerechten Zug- und Drucktrajektorien der Knochenbälkchen.

Wichtig ist: Es geht nicht darum, diese biologischen und technischen Konstruktionen 1:1 nachzuahmen. Es geht vielmehr darum, diese topologisch optimierten Konstruktionen zu abstrahieren und die Aufbauprinzipien zu erkennen. Diese können Sie dann auf Ihre Konstruktionen anwenden, um prinzipienorientiert zu konstruieren.

Und noch ein Tipp: Bleiben Sie geduldig. Sagen wir es mit den Worten von Tschaikowski: „Die Inspiration ist ein solcher Besucher, der nicht immer bei der ersten Einladung erscheint.“

Eine Übung: Vergleichen Sie die in Ihrem Konstruktionsalltag vorkommenden Strukturbauteile mit uns umgebenden Fachwerkstrukturen (Türme, Strommasten, Dächer, Kräne). Welche Ähnlichkeiten und Unterschiede gibt es zwischen diesen? Ziel ist es, durch Kombination bestehender Elemente neue Ideen zu generieren.



## Praxistipp #12: Unterscheiden Sie zwischen Zug und Druck!

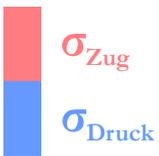
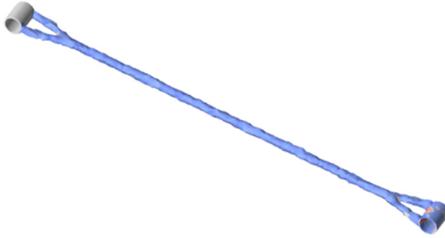
Vergleichen Sie einmal die beiden Topologieentwürfe auf der nächsten Seite. Sehen diese ähnlich aus? Ja! Können wir die beiden Vorschläge so in die Konstruktion übernehmen? Nein! Es wäre ein grober konstruktiver Fehler, Zug- und Druckelemente gleich zu behandeln. Im Gegenteil: Wir sollten scharf zwischen Zug und Druck unterscheiden. Warum? Weil beide Beanspruchungen – trotz einiger Gemeinsamkeiten – grundlegend verschieden sind.

Hier eine kurze Gegenüberstellung der Zug- und Druckelemente.

**Zugelemente: Saint-Venant'sches Prinzip.** Bei einer Zugbeanspruchung sind vor allem die Bereiche der Lasteinleitung versagensgefährdet. Die mechanische Begründung für dieses Verhalten liefert das Saint-Venant'sche Prinzip. Zugelemente sind besonders kerbempfindlich. Sie sind prädestiniert für die Lastübertragung über große Entfernungen. Grundsätzlich gilt: Zug ist die ökonomischste Beanspruchungsart. Seile sind die idealen Zugelemente.

**Druckelemente: Euler'sche Knickung.** Bei einer Druckbeanspruchung sind die Verhältnisse ganz anders: Druckelemente sind vor allem stabilitätsgefährdet. Die design- und werkstoffbedingten Einflussgrößen auf das Stabilitätsverhalten werden mit der Euler'schen Knickformel beschrieben. Da Druckelemente gegen Instabilwerden ausgelegt werden müssen, ist der Materialaufwand im Vergleich zu reinen Zugelementen wesentlich höher. Rohre sind die idealen Druckelemente.

Nehmen wir den praxisrelevanten Fall an, dass Sie die Topologieberechnung mit einem Optimierungsprogramm machen. Sie bekommen vom Programm eine wilde Fachwerkstruktur präsentiert und müssen daraus konkrete Maßnahmen für Ihre Konstruktion ableiten. Sie sollten auf keinen Fall den Vorschlag 1:1 ohne gründliche Prüfung übernehmen; dies ist nur in seltenen Fällen möglich. Vielmehr müssen Sie zwischen Zug- und Druckelementen unterscheiden, um beanspruchungsgerechte Optimierungsmaßnahmen einzuleiten. Das Optimierungsprogramm tut dies für Sie nicht, da es diese Feinheiten nicht „sieht“.



## **Praxistipp #13: Gestalten Sie kraftflussoptimierte Rippenfelder!**

Eine in der Alltagspraxis des Konstrukteurs oft vorkommende Frage lautet: Wie muss die Gusskonstruktion verrippt werden? Die Gestaltung der Rippenfelder entscheidet in hohem Maß über den mechanischen Wirkungsgrad Ihrer Konstruktion. Einige filigrane, in Kraftrichtung orientierte Rippen leisten einen enormen Beitrag zur Festigkeit/Steifigkeit der Struktur. Dagegen sind viele massive, nicht im Kraftfluss liegende Rippen praktisch nutzlos. Zwischen diesen beiden Extremen bewegen wir uns.

Doch zurück zur Kernfrage: Wie gestalten wir die Rippenfelder? Dazu sollten wir folgenden Grundsatz beherzigen: Eine Rippe kann in Bezug auf das eingesetzte Eigengewicht extrem hohe Zugkräfte übertragen. Bei Druckbelastungen ist das Tragniveau wesentlich geringer, da Druckrippen knickgefährdet sind und nur über kurze Entfernung wirkungsvoll sind. Wird dagegen eine Rippe auf Biegung oder Torsion belastet, so ist sie praktisch wirkungslos. Daraus resultiert eine einfache Regel: Rippen müssen auf den Pfaden der Hauptzug- und Hauptdruckspannungen angeordnet werden.

Betrachten wir dazu die fünf in der Praxis am häufigsten vorkommenden Rippenanordnungen.

**Erste Rippenanordnung: axial.** Im zugbeanspruchten Bereich sollten die Rippen axial – in Richtung der Hauptzugspannungen – angeordnet werden.

**Zweite Rippenanordnung: orthogonal.** Im druckbeanspruchten Bereich sollten die Rippen orthogonal zur Belastungsrichtung angeordnet werden, um die Länge der Druckelemente zu reduzieren (Segmentierung) und damit die Stabilität der Druckstruktur zu erhöhen.

**Dritte Rippenanordnung: radial.** Die in den Lagerstellen wirkenden radialen Kräfte müssen in die umgebende Struktur weitergeleitet werden. Zu diesem Zweck sollten die Rippen radial zur Lagerstelle angeordnet werden.

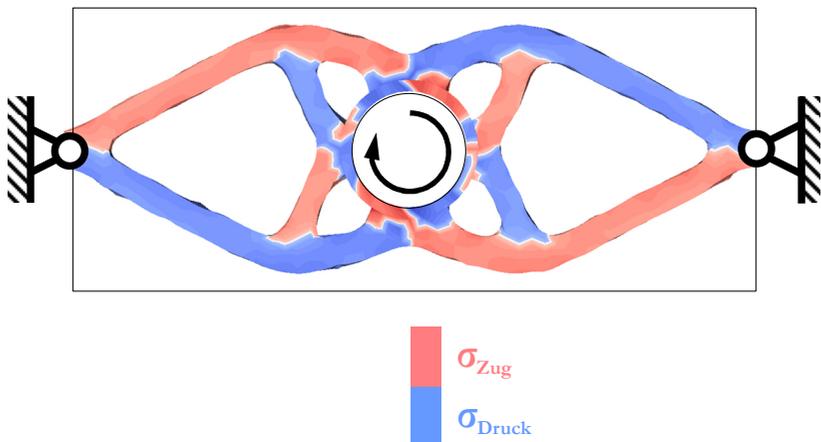
**Vierte Rippenanordnung: tangential.** Werden in das Bauteil Momente eingeleitet und müssen diese in die benachbarte Struktur weitergeleitet

werden (siehe unten), so sollten die Rippen in Bezug auf die Lasteinleitung tangential angeordnet werden.

**Fünfte Rippenanordnung: diagonal.** Wird die Struktur auf Biegung und/oder Torsion belastet, so sollten die Rippen diagonal – unter  $\pm 45^\circ$  zur Biege- bzw. Drehachse – angeordnet werden. Diese Rippenanordnung kommt in der Praxis mit Abstand am häufigsten vor.

Stellen Sie sich die in diesem Ratgeber vorgestellten Topologieentwürfe als Gusskonstruktionen und die Zug-Druck-Elemente als Rippen vor. Fragen Sie sich: Welche der fünf vorgestellten Rippenanordnungen trifft auf den konkreten Fall zu?

Zum Schluss betrachten wir kurz die prominenteste Rippenstruktur: die Bienenwabe. Wabenstrukturen werden gern bei der Auslegung von Leichtbaukonstruktionen eingesetzt. Ein Grund dafür ist sicherlich die Ästhetik: Wabenstrukturen sehen harmonisch, durchdacht und einfach ansprechend aus. Es gibt aber auch einen pragmatischen Grund: die Materialökonomie. Eine wabenartige Struktur hilft uns, den Konflikt zwischen maximaler Tragfähigkeit und minimalem Materialeinsatz bestmöglich zu lösen. Die Erklärung hierfür ist die günstige Geometrie: Geometrisch gesehen ist eine Wabenstruktur eine periodische Aneinanderreihung von Sechsecken. Und ein Sechseck erfordert – verglichen mit einem Dreieck oder einem Viereck – nur einen minimalen Materialbedarf (kleinster Umfang) bei gleichem Volumeneinsatz.



## **Praxistipp #14: Lernen Sie, das Unsichtbare zu sehen!**

In dem Moment, wo wir einen Stift in die Hand nehmen und auf einem Blatt Papier einen Topologievorschlag zeichnen, visualisieren wir unser Denken. Wir machen unsere Gedanken sichtbar und geben oft mehr preis, als uns bewusst ist. Und an jeder noch so kleinen konstruktiven Mini-Entscheidung lässt sich ablesen, auf welchem Level wir derzeit sind. Dies ist die Verbindung zwischen dem Unsichtbaren (unserem Verständnis der abstrakten Prinzipien) und dem Sichtbaren (unserem konkreten Entwurf).

Diese Überlegung führt uns zu einer einfachen Schlussfolgerung: Um die gewünschte Wirkung zu erzielen (eine kraftflussgerechte Topologie), sollten wir uns auf die unsichtbaren Ursachen (äußere und innere Kräfte) konzentrieren. Was bedeutet das konkret für uns? Wir sollten uns vier Fertigkeiten antrainieren.

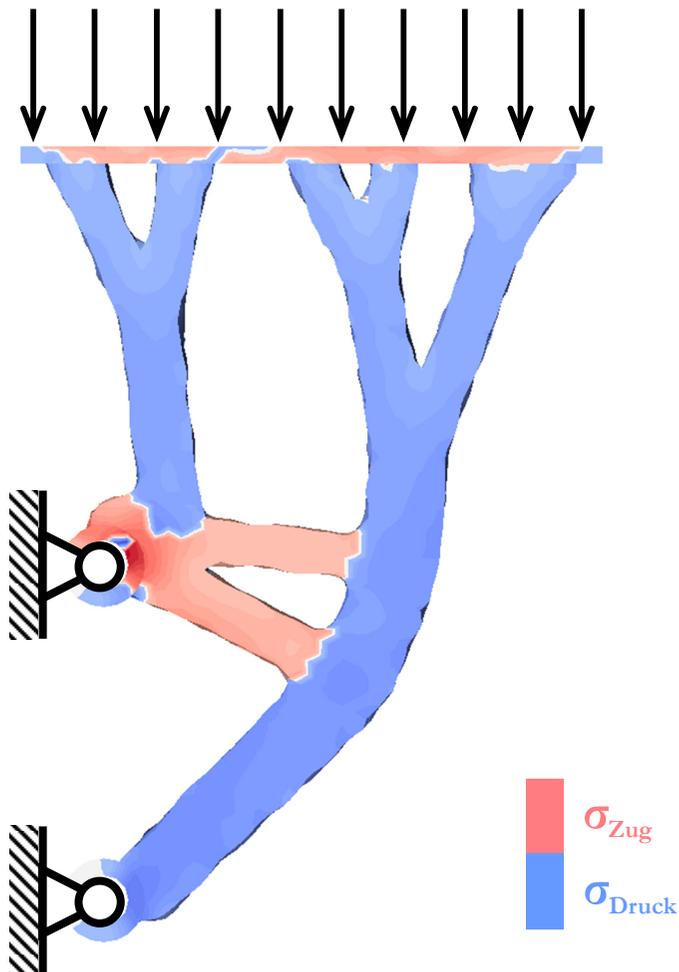
**Erste Fertigkeit: Kräfte und Momente sehen.** Die äußeren Belastungen (Kräfte und Momente) zu sehen erfordert etwas Übung. Die beste Möglichkeit, dies zu lernen, ist das Zeichnen von Freikörperbildern. Wenn Sie 50, 100, 200 Strukturen von ihrer Umgebung freigeschnitten haben, können Sie das!

**Zweite Fertigkeit: Zug- und Druckfelder sehen.** Zug- und Druckfelder zu sehen ist einfach. Sie müssen nur Folgendes wissen: Jede in der Ebene wirkende Kraft teilt das Spannungsfeld in zwei Bereiche – in den Zug- und den Druckbereich. Das Feld oberhalb einer Kraft wird auf Druck beansprucht, das Feld unterhalb der Kraft auf Zug. Dies ist trivial und bedarf keiner weiteren Erklärung

**Dritte Fertigkeit: Schubspannungen sehen.** Sobald zwei Kräfte, z. B. Aktions- und Reaktionskraft, einen Abstand zueinander haben, entstehen Schubspannungen. Dabei unterscheidet man Längs- und Querschub; beide treten immer paarweise und parallel zueinander auf (Boltzmann-Axiom).

**Vierte Fertigkeit: Normalspannungen sehen.** Unter  $\pm 45^\circ$  zu den Schubspannungen wirken die Hauptzug- und Hauptdruckspannungen. Die Zug- und Druckspannungen wirken orthogonal zueinander. In erster Linie geht es bei der Topologieoptimierung um diese Spannungen, denn auf diesen Kraftpfaden – maximale Dehnung und maximale Stauchung – wird das Material am meisten gebraucht.

Wenn Sie mit Hilfe Ihrer Vorstellungskraft eine kraftflussgerechte Topologie entwerfen, werden Sie diese „Stationen“ immer wieder durchlaufen: von äußeren Belastungen über die inneren Spannungen bis hin zu den Kraftpfaden der maximalen Hauptzug- und Hauptdruckspannungen. Auf diesen Kraftpfaden ordnen Sie das Material an und erschaffen so eine kraftflussoptimierte Topologie.



## **Praxistipp #15: Betrachten Sie immer die Kehrseite der Medaille.**

Jeder Vorteil hat einen Nachteil. Dies ist eine Binsenweisheit, die natürlich auch auf die Topologieoptimierung zutrifft. In diesem Ratgeber habe ich die Topologieoptimierung auf den Thron gehoben. Und das hat einen offensichtlichen Grund: Die Topologieoptimierung hilft uns dabei, mit minimalem Materialaufwand ein maximales Tragvermögen zu erreichen. Sie hilft uns dabei, unsere Konstruktion auf eine höhere Stufe der Effektivität zu heben. Was will man mehr?

Doch an dieser Stelle muss ich meine Begeisterung für hocheffiziente, bis aufs Äußerste optimierte Strukturen mit einer Warnung dämpfen: Solche Strukturen sind nicht nur extrem effizient, sondern auch extrem empfindlich. Empfindlich gegenüber allen Belastungen, die wir nicht in unser Kalkül einbezogen haben, gegenüber allen „fremden“ Belastungen, gegenüber allen bei der Optimierung nicht vorhersehbaren äußeren Einflüssen. Das ist die dunkle Seite der Topologieoptimierung.

Nun bleibt die Frage zu klären: Welcher Grad der Spezialisierung ist noch vertretbar? Wie weit können wir in unserem Optimierungsrausch gehen? Dies hängt von einigen Faktoren ab.

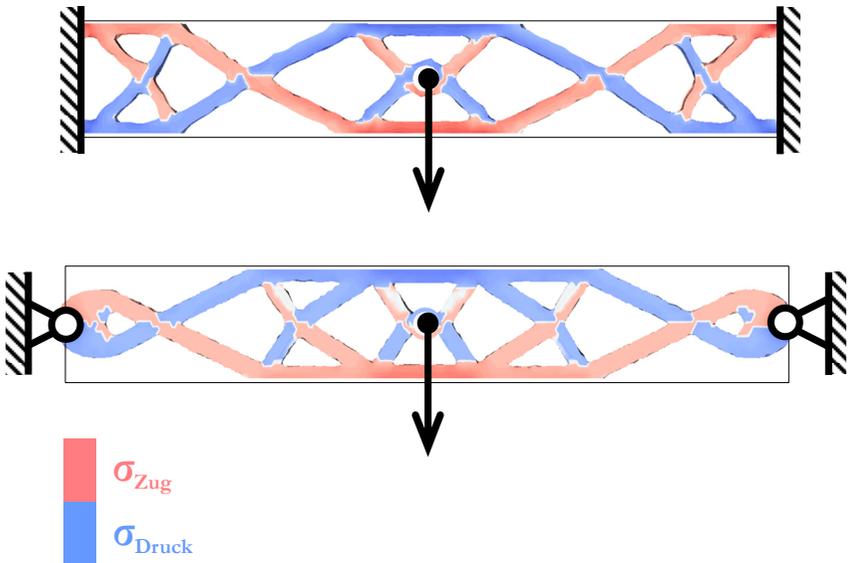
**Erster Faktor: unser Wissensstand.** Je mehr wir über die äußeren Belastungen (mechanische, thermische, chemische) und über das Werkstoffverhalten (Festigkeits-, Steifigkeitseigenschaften) wissen, desto offensiver können wir bei der Optimierung vorgehen und umso weniger Reserve benötigen wir. An dieser Stelle eine wichtige Unterscheidung: Zwar sprechen wir bei der Auslegung von lasttragenden Konstruktionen meistens über Sicherheitsfaktoren – in Wirklichkeit handelt es sich aber um Unsicherheitsfaktoren. Denn in diese Faktoren packen wir all unsere Unsicherheit hinein. Eines aber ist sicher: Wer sich sicher ist, braucht keine Faktoren! Daher sollten wir uns immer fragen: Was wissen wir über die Randbedingungen? Was wissen wir nicht? Von welchen Randbedingungen haben wir nur eine vage Vorstellung?

**Zweiter Faktor: Schwere des Fehlers.** Natürlich hängt auch der Grad der Spezialisierung von der Schwere des konstruktiven Fehlers und den daraus resultierenden Folgen ab. Wenn Menschenleben im Spiel sind, hat Sicherheit die höchste Priorität. Bei solchen sicherheitsrelevanten Struktu-

ren werden oft Redundanzen vorgesehen – Gürtel *und* Hosenträger. Handelt es sich dagegen um einen Gebrauchsgegenstand, deren Versagen nur unsere Laune verschlechtert, können wir die Konstruktion ausreizen.

**Dritter Faktor: Anwendungsbereich.** Es gibt Konstruktionen, die lebenslang nur eine einzige Belastung kennen – das sind die sogenannten Einzweckstrukturen. Ein Keramikmesser ist z. B. nur fürs Schneiden gut. Auf alle „fremden“ Belastungen (Biegen oder Tordieren) antwortet es meistens mit einem KNACK. Demgegenüber gibt es Konstruktionen, die im Laufe ihres Lebens mehreren Belastungen ausgesetzt werden – die sogenannten Mehrzweckstrukturen. Ein Beispiel dafür ist ein Schweizer Messer. Die Auslegung solcher Strukturen ist aufwendiger, da beim Entwurf der Konstruktion diverse Belastungen und vor allem die Wechselwirkungen zwischen den Belastungen beachtet werden müssen.

Mit diesen Ausführungen möchte ich Sie für die Gefahren der Überoptimierung bei der Bauteilauslegung sensibilisieren. Auf der anderen Seite möchte ich ebenso wenig für Angstzuschläge bei der Dimensionierung plädieren. Eine todsichere und übergewichtige oder unbezahlbare Konstruktion ist auch nicht erstrebenswert. Eine gesunde Skepsis ist bei der Optimierung jedoch gefragt.



## Praxistipp #16: Wechseln Sie die Perspektive!

In diesem Ratgeber haben Sie bereits einige Topologieentwürfe analysiert. Vielleicht wenden Sie jetzt ein, dass dies „nur“ einfache 2D-Strukturen waren, während es sich in der Realität meistens um komplexe 3D-Strukturen handelt. Das ist richtig. Wenn wir aber auf die Kraft des Perspektivenwechsels setzen, können wir die Komplexität reduzieren und den Analyseprozess stark vereinfachen. Denn so können wir dreidimensionale Strukturen in drei einfache zweidimensionale Strukturen zerlegen. Wir nehmen uns nur eine Ansicht vor und konzentrieren uns auf diese. So gehen wir von einer Ansicht zur nächsten. Und wenn wir die nötige Denkdisziplin mitbringen – ohne zu springen –, dann wird es relativ einfach. Etwas überspitzt gesagt: Auch eine komplexe Struktur ist einfach, sie ist nur umfangreich.

Wenn Sie sich bewusst nur die eine Ansicht vornehmen wollen, so empfehle ich Ihnen folgendes Vorgehen: Stellen Sie sich bei jeder Ansicht zwei Szenarien vor.

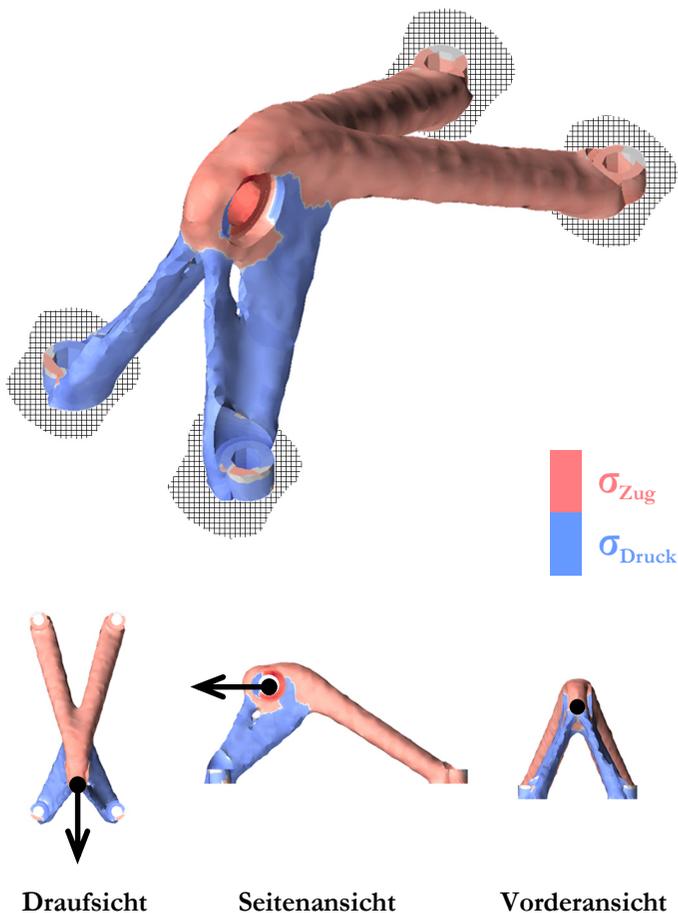
**Erstes Szenario: Horrorzustand.** Fragen Sie sich: Wie müsste ich die Verbindung zwischen der Lasteinleitung und der Lastaufnahme gestalten, damit die Struktur mit Sicherheit kaputtgeht? Wie müsste ich die Topologie gestalten, damit die Struktur stark unter der Last nachgibt und möglichst weich ist? In diesem Fall werden Sie schroffe Übergänge, starke Kraftumlenkungen und einen großen Biegeanteil anstreben. Nun wissen Sie, was Sie vermeiden müssen.

**Zweites Szenario: Paradieszustand.** Jetzt betrachten Sie die Kehrseite der Medaille und fragen sich: Wie sollte die Verbindung zwischen Actio und Reactio aussehen, damit die Struktur problemlos die Lasten trägt? Wie sollte die Topologie aussehen, damit das Bauteil nur wenig unter der Last nachgibt? In diesem Fall werden Sie weiche Übergänge, direkte Kraftwege und rein axiale Beanspruchungen (Zug und Druck) anstreben. Jetzt kennen Sie auch den erstrebenswerten Zustand.

Doch das ist noch nicht alles: Sie können auch die Perspektive der äußeren Belastungen einnehmen, die den Stress verursachen. Sie können die Perspektive des Materials einnehmen, die den Stress ertragen muss. Sie können Ihre Struktur aus der Ferne oder durch die Lupe betrachten. Sie können sich die Struktur durch die Brille eines Skeptikers oder eines

Optimisten ansehen. Je mehr Perspektiven Sie einnehmen, desto ganzheitlicher wird Ihr Verständnis. Testen Sie es!

Ich wage eine einfache These: Wenn Sie dem vorgeschlagenen Vorgehen folgen (also die Perspektiven bewusst ändern), die einfachen Mechanikprinzipien beachten und sich von Ihrem gesunden Menschenverstand leiten lassen, so werden Sie in sieben von zehn Fällen mit minimalem Aufwand die ökonomischste Lösung finden.



## Praxistipp #17: Beschleunigen Sie den Konstruktionsprozess!

„Gutes Werkzeug ist die halbe Arbeit“, besagt ein ungarisches Sprichwort. In der Tat: Ein gutes Werkzeug, das auch zweckbestimmt eingesetzt wird, hilft uns, den Schaffensprozess drastisch zu beschleunigen. Wenn Sie heimwerken, greifen Sie auch instinktiv zu Werkzeugen, die Ihnen dabei helfen, die Arbeit möglichst energiesparend zu erledigen. Genau die gleiche Situation haben wir, wenn wir eine neue Konstruktion konzipieren oder eine bestehende optimieren. In diesem Fall ist ein Optimierungsprogramm für die Topologieberechnung das „Werkzeug“ erster Wahl.

Die in diesem Ratgeber vorgestellten Topologieentwürfe habe ich mit **solidThinking Inspire** von **Altair** durchgeführt. Diese Software unterstützt Sie bei der Designfindung und bietet Ihnen unter anderem die Möglichkeiten zu optimieren, zu konstruieren und zu berechnen. Das Programm ist „das Schweizer Messer“ für den Konstrukteur! Mein Resümee: Die Programmbedienung ist kinderleicht, die Berechnungsergebnisse sind aussagekräftig, die Zeitersparnis ist offensichtlich – klare Empfehlung!

Wenn Sie Topologieoptimierung in der Konstruktion etablieren, wird das hier bald Ihre Realität sein:

**Erster Schritt: Sie bauen das Modell auf (10–40 Minuten).** Zuerst definieren Sie den zur Verfügung stehenden Designraum. Aus dieser kontinuierlichen Struktur wird eine diskrete Struktur – die kraftflussgerechte Topologie – abgeleitet. Sie weisen der Geometrie einen Werkstoff zu. Sie lagern die Struktur und leiten Lasten ein. Sie definieren das Optimierungsziel: meistens maximale Steifigkeit bei minimalem Materialeinsatz. Und schon haben Sie alle Voraussetzungen für die Topologieoptimierung geschaffen.

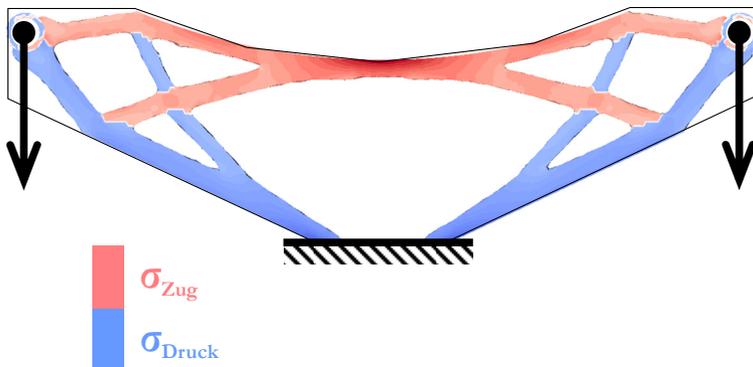
**Zweiter Schritt: Sie lassen den Rechner rechnen (5–20 Minuten).** Jetzt ist der Rechner am Zug. Lassen Sie ihn einfach arbeiten und warten Sie auf das Resultat ... Wie lange Sie warten müssen, hängt von zwei Faktoren ab: der Rechnerleistung und der Netzgröße. Nehmen wir die Rechnerleistung als gegeben an. Für die Netzgröße gilt folgende Devise: erst grob, dann fein. Starten Sie mit relativ großen Elementen (5–10 mm) und reduzieren Sie die Größe dann schrittweise. Machen Sie die Elemente aber nicht zu klein, da dies für unsere Fragestellung (fast) keine Rolle spielt. Nach einigen Minuten ist die Berechnung fertig: Sie erkennen ein wildes Gebilde.

### Dritter Schritt: Sie interpretieren die Ergebnisse (15–60 Minuten).

Nun sind Sie wieder dran: Es ist Ihre Aufgabe, aus dieser abstrakten Struktur konkrete Maßnahmen für Ihre Konstruktion abzuleiten. Wie gut Ihnen dies gelingt, hängt in erster Linie von Ihrem strukturmechanischen Verständnis ab. Wenn Sie einige grundlegende Prinzipien der Mechanik verinnerlicht haben, können Sie den Topologievorschlag problemlos in die Sprache der Konstruktion übersetzen. Wenn Sie diesen Vorschlag jedoch gedankenlos 1:1 in die Konstruktion übernehmen, werden Sie oft genug Schiffbruch erleiden.

Natürlich gibt es noch mehr Feinheiten bei der Topologieberechnung: Fertigungsrestriktionen, Symmetriebedingungen, Füllgrad definieren, Design- und Non-Design-Bereiche festlegen, mehrere Lastfälle berechnen, Variantenanalysen etc. Doch all diese Aspekte sind weder schwer zu begreifen noch zeitraubend in der Umsetzung. Der spätere Nutzen macht den anfänglichen Aufwand um ein Vielfaches wieder wett.

Ob Sie mithilfe der Topologieoptimierung den Konstruktionsprozess „nur“ evolutionär oder aber revolutionär verbessern können, hängt vor allem davon ab, wo Sie heute stehen. Wenn die Topologieoptimierung für Sie ein unverzichtbarer Bestandteil des Konstruktionsprozesses ist, können Sie Ihr Vorgehen noch einmal auf den Prüfstand stellen, um von den Möglichkeiten dieser Methode in vollem Umfang zu profitieren. Ist die Topologieoptimierung für Sie noch ganz neu, so werden Sie in kurzer Zeit extreme Verbesserungen erreichen. Die ein oder zwei Stunden, die Sie am Anfang investieren müssen, werden Ihnen Tage oder gar Wochen einsparen – eine zweifelsohne intelligente Zeitinvestition.



## Epilog: Die drei Lösungen

Nun haben Sie einen ersten Einblick in die Möglichkeiten der Topologieoptimierung gewonnen. Sie haben einiges gelernt und können die hier vorgestellten 17 Praxistipps und Prinzipien in Ihren Konstruktionsalltag einbringen. Sie haben erfahren, dass effiziente Materialausnutzung die oberste Maxime der Topologieoptimierung ist. Sie haben einige Facetten dieser Optimierungsmethode kennengelernt. All diese Informationen sind wichtig, reichen aber nicht aus, um den wahren Nutzen der Topologieoptimierung plausibel zu machen. Diesen können Sie nur herausfinden, indem Sie Ihre eigenen Erfahrungen sammeln. Sobald Sie merken, dass Sie mit weniger Aufwand bessere Resultate erreichen können, werden Sie auf diese wirkungsvolle Methode nicht mehr verzichten wollen.

An dieser Stelle möchte ich noch einmal kurz resümieren: Wenn Sie ganz früh, in der Konzeptphase, Ihre Konstruktion topologisch optimieren, können Sie die folgeschweren Fehlentscheidungen vermeiden/reduzieren, deren Konsequenzen ich im Prolog aufgeführt habe. Vielmehr können Sie mehrere Vorteile erzielen:

**Erster Vorteil: bessere Bauteilqualität.** Dank der Topologieoptimierung werden Sie die Kraftpfade maximaler Dehnung und Stauchung identifizieren, auf diesen Kraftpfaden das Material anordnen und damit jedes Gramm eingesetzten Materials „arbeiten“ lassen. So erreichen Sie mit minimalem Materialeinsatz die geforderte Festigkeit, Stabilität und Steifigkeit.

**Zweiter Vorteil: geringere Bauteilkosten.** Dank der Topologieoptimierung werden Sie die minderbeanspruchten Bereiche identifizieren, diese eliminieren und damit den Materialkostenanteil reduzieren. Denn zum Optimieren gehört beides: Wachsen (die hochbeanspruchten Bereiche verstärken) und Schrumpfen (die minderbeanspruchten Bereiche eliminieren, den Ballast abwerfen). So wird Ihre Konstruktion einem durchtrainierten Athleten ähneln.

**Dritter Vorteil: kürzere Entwicklungszeit.** Dank der Topologieoptimierung werden Sie aus tausenden konstruktiven Möglichkeiten, die in der Konzeptphase denkbar sind, die wenigen wirklich effektiven Lösungsansätze herausfiltern. Sie haben keine fix und fertige Lösung, die Sie 1:1 übernehmen können und damit eine perfekte Konstruktion schaffen. Das nicht. Vielmehr werden Sie mit der Topologieoptimierung das Fundament

gießen, auf dem Sie Ihr Konstrukt aufbauen. Dieser Entwurf ist die Basis für die weitere Detailkonstruktion.

Noch eines: Wenn Sie sich die Prinzipien der Topologieoptimierung zu eigen machen und alltagserprobte Optimierungswerkzeuge einsetzen, dann haben Sie bei der Konzipierung neuer und Optimierung bestehender Konstruktionen einen „unfairen“ Vorteil gegenüber allen Konstrukteuren, die dies nicht tun. Der Unterschied ist enorm: Es ist so, als ob Sie (mit Topologie-Know-how) von A nach B mit dem Fahrrad fahren können, während Ihr Kollege Konstrukteur (ohne Topologie-Know-how) die gleiche Strecke zu Fuß gehen muss.

Und? Möchten Sie jetzt mehr über diese kraftvolle Optimierungsmethode erfahren? Oder möchten Sie vielleicht Ihre eigene Konstruktion durch die neue Topologiebrille betrachten? Vielleicht möchten Sie sogar mit einem Optimierungsprogramm selbst Topologieberechnungen durchführen? Wenn Sie auch nur eine dieser Fragen bejahen können, so hat dieser Ratgeber seinen Zweck erfüllt.

**Alexander Brunner**

**Januar 2018**

Über Ihre Kommentare, Fragen oder Anregungen zu dem in diesem Ratgeber vorgestellten Material würde ich mich freuen.

E-Mail: [info@alexander-brunner.eu](mailto:info@alexander-brunner.eu)



Die meisten konstruktiven Fehler passieren ganz am Anfang, beim Entwurf der Konstruktion. Die Folgen dieser Fehlentscheidungen können fatal sein: Die Konstruktion macht unter der Last schlapp, erfüllt die geforderte Tragfunktion (Festigkeit/Stabilität/Steifigkeit) nicht. Die Konstruktion muss lebenslang unnötigen Ballast mit-schleppen, ist zu schwer und damit zu teuer. Der Konstruktionsprozess ist zeit- und energieraubend, die Ingenieure ertrinken im Meer der Variantenberechnungen.

Was tun?

Nun kommt die Topologieoptimierung ins Spiel. Sie ist wie ein Kompass, der dem Konstrukteur im Ozean der Designmöglichkeiten die Orientierung gibt. Sie hilft Ihnen, aus den tausenden konstruktiver Möglichkeiten die wenigen effizienten Lösungsansätze herauszufiltern. Damit werden Sie verblüffende Ergebnisse erreichen: Mit minimalem Zeitaufwand entwerfen Sie das Skelett der lasttragenden Konstruktion, schaffen damit eine solide Grundlage für weitere Detailoptimierung und lösen bestmöglich den Konflikt zwischen technischen und wirtschaftlichen Zielen.

In diesem Ratgeber finden Sie einige nützliche Ideen für Ihren Konstruktionsalltag. Sie erhalten **17 Praxistipps**, die Ihnen helfen werden, Ihre Konstruktion auf eine höhere Stufe der Effektivität zu heben.

[www.alexander-brunner.eu](http://www.alexander-brunner.eu)



ISBN: 978-3-9818764-2-0