Theorie
Benutzerhandbuch

Inhaltsverzeichnis

Theorie

1. Prinzipien der Topologieoptimierung 4
2. OC-Verfahren 7
   2.1 SIMP-Ansatz 9
   2.2 RAMP-Ansatz 10
3. SKO-Verfahren 12
4. TOSS-Verfahren 14
5. Filterung 15
6. Glättung 17

Benutzerhandbuch

1. Die Oberfläche im Überblick 21
2. Menüleisten 22
3. Icons 24
4. Projektmappenverwaltung 26
   4.1 Neue Projektmappe erstellen 26
   4.2 Projektmappe öffnen 27
   4.3 Projektmappe schließen 28
   4.4 Projektmappenverwaltung in der Textmenüleiste 28
5. Ansicht 30
   5.1 Werkzeugleisten 30
   5.2 Kameraeinstellungen 31
   5.3 Farben 31
   5.4 Darstellungen 31
   5.5 Ansichten und Ansichtsoptionen 32
   5.6 Labels 32
      5.6.1 Knoten 33
      5.6.2 Elemente 33
      5.6.3 Knoten und Elemente 33
      5.6.4 Knoten und Elemente ausblenden 33

5.7 Größe Randbedingungen / Pickingpunkte 33
5.7.1 Größe Randbedingungen 33
5.7.2 Größe Pickingpunkte 33
6. Kontextsensitive Seitenmenüs 34
6.1 Import von CAD und FE-Daten 34
6.1.1 Import 34
6.1.2 Import Textmenüleiste 37
6.1.3 Werkzeugleiste Import 37
6.2 Präprozessor 38
6.2.1 Präprozessor in der Textmenüleiste 38
6.2.2 Picking 38
6.2.3 Knotenpicking 40
6.2.4 Elementpicking 43
6.2.5 Flächenpicking 43
6.2.6 Übersicht der Pickingoptionen und der Anwendungsbereiche 44
6.2.7 Setmanagement 45
6.2.8 Vernetzung 47
6.2.9 Tetraedernetz erzeugen 47
6.2.10 Netzcheck 48
6.2.11 Generierung von Superelementen / Netzgenerator Z88N 50
6.2.12 Z88Arion Materialdatenbank 54
6.2.13 Randbedingungen aufgeben 58
6.3 Solver 63
6.3.1 OC-Verfahren 64
6.3.2 SKO-Verfahren 65
6.3.3 TOSS-Verfahren 65
6.4 Postprozessor 65
6.4.1 Iterationsauswahl 66
6.4.2 Glättung 66
7. Tools 68

7.1 Analyse 68
7.2 STL bearbeiten 69
7.3 Optionen 69
8. Hilfe und Support 72
8.1 Hilfe 72
8.1.1 Videohandbuch 72
8.1.2 Benutzerhandbuch 72
8.2 Über Z88Arion 73
8.3 Support 73
8.3.1 Homepage 73
8.3.2 Email 73
8.3.3 Forum 74

1. Prinzipien der Topologieoptimierung

Die Topologieoptimierung als Teil der Strukturoptimierung hilft Ingenieuren dabei, Produkte bzw. einzelne Bauteile so zu gestalten, dass an sie gestellte Anforderungen optimal erfüllt werden. Das kann beispielsweise eine maximale Steifigkeit bei niedrigem Volumen oder eine maximale Festigkeit bei niedrigem Gewicht sein. Dadurch kann ein großes Einsparpotenzial in Form von weniger Energieeintrag im Herstellungsverfahren des Produkts, weniger Materialeinsatz und weniger Arbeitseinsatz bei der Entwicklung ausgeschöpft werden. Diese Vorteile ermöglichen eine Konstruktion und Produktion, die die Prinzipien der Nachhaltigkeit erfüllen.

Um diese Einsparpotenziale bestmöglich nutzen zu können, findet die Topologieoptimierung in der frühen Phase der Konzeption Anwendung (siehe Abbildung 1). Hier besteht noch eine große Freiheit in den Gestaltungsmöglichkeiten, die später einen großen Einfluss auf die weiteren entstehenden Kosten haben. Gleichzeitig sind die zu diesem Zeitpunkt entstehenden Kosten für Änderungen sehr gering.

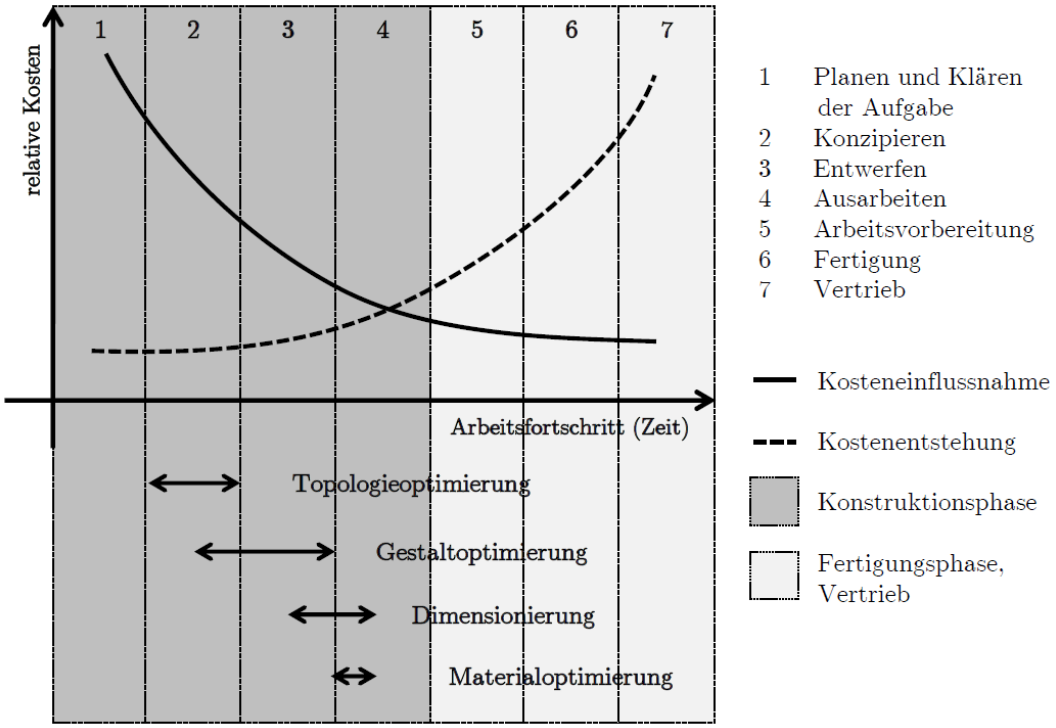


Abbildung 1: Zeitpunkte der Anwendung der Teilgebiete der Strukturoptimierung

Der Aufwand für eine Topologieoptimierung ist sehr niedrig. Zunächst wird vom Anwender definiert, welcher Bauraum für das betrachtete Bauteil zur Verfügung steht. Dann wird angegeben, welche Belastungen an welcher Stelle auf das Bauteil wirken und wo die Gestalt nicht verändert werden soll, bspw. an Bohrungen. Danach kann die Optimierung bereits gestartet werden und die Optimierungssoftware erledigt den Rest.

Je nachdem, welches Verfahren verwendet wird und welches Ziel angestrebt wird, bezieht die Optimierungssoftware aus einer Finiten Elemente Analyse (FEA) die entsprechenden Daten, die er zur Weiterverarbeitung benötigt. Das können neben Verschiebungen, die durch die wirkenden Kräfte hervorgerufen werden ebenso Spannungen im Bauteil sein. Auch ganz andere Größen, wie z. B. der Wärmefluss oder die Steifigkeit der Struktur können von Interesse sein.

Mit Hilfe der Daten aus der FEA wird die Struktur des Bauteils angepasst, indem der Elastizitätsmodul (E-Modul) der finiten Elemente variiert wird. Dabei soll ein niedriger E-Modul ein Loch darstellen und ein hoher E-Modul die feste Struktur. Mit dieser neuen E-Modul Verteilung wird in der nächsten Iteration wieder eine FEA durchgeführt. Hier zeigt sich auch die Sinnhaftigkeit dieses Vorgehens. Ein Element mit niedrigem E-Modul weist ein sehr weiches Verhalten auf und trägt somit - quasi wie ein Loch - nicht zur Festigkeit oder Steifigkeit der Struktur bei. Würde ein anderer physikalischer Teilaspekt (Wärmefluss, Strömungsgeschwindigkeiten, etc.) das Ziel der Optimierung darstellen, müsste evtl. eine andere Größe als der E-Modul, bspw. die Wärmeleitfähigkeit, variiert werden. Bei manchen Verfahren wird der E-Modul erst mittelbar über eine andere Größe bestimmt. Sämtliche Variablen, die durch den Optimierungsalgorithmus verändert werden, werden als Designvariablen bezeichnet.

Wie der E-Modul angepasst wird, hängt vom Verfahren ab, das verwendet wird. Die existierenden Verfahren lassen sich grob in die beiden Gruppen der mathematischen und empirischen Verfahren gliedern. Bei den mathematischen Verfahren werden die Designvariablen aufgrund einer mathematisch hergeleiteten Gesetzmäßigkeit verändert, was dann zum Optimum führt. Bei empirischen Verfahren werden die Designvariablen hingegen auf der Basis einer Vorschrift verändert, die auf der Vermutung der Optimalität basieren und in der

Regel mit wenig Rechenaufwand gute Ergebnisse liefern. In Z88Arion sind Verfahren aus beiden Gruppen realisiert.

Folgende Erläuterungen sind zu großen Teilen aus Werken von M. P. Bendsøe, Lothar Harzheim, Ole Sigmund, Axel Schumacher und Claus Mattheck entnommen.

2. OC-Verfahren

Das Optimality-Criterion (OC) Verfahren ist ein Vertreter der mathematischen Verfahren. Es wird verwendet, um die Steifigkeit des Bauteils zu maximieren, bzw. dessen Nachgiebigkeit zu minimieren. Dabei wird die mittlere Nachgiebigkeit definiert als

$$C = \sum_i \vec{F}_i^{\,T} \vec{u}_i. \tag{1}$$

Der Index i bezeichnet alle Kraftangriffspunkte, $\vec{F}_i$ die jeweilige Kraft und $\vec{u}_i$ die dazugehörende Verschiebung. Die mittlere Nachgiebigkeit entspricht der doppelten äußeren geleisteten Arbeit und folglich der doppelten Dehnungsenergie $U = \frac{1}{2}\vec{u}^T \boldsymbol{K} \vec{u}$. Hier ist $\boldsymbol{K}$ die Gesamtsteifigkeitsmatrix der Struktur.

Da davon ausgegangen werden kann, dass das Ausgangsbauteil mit vollem Material im gesamten Bauraum die steifste Variante darstellt, muss ein Bauteilvolumen vorgegeben werden, das am Ende der Optimierung unterschritten werden soll - das sog. Zielvolumen vV^0. Dabei ist V^0 das Ausgangsvolumen und v der Füllgrad, der erreicht werden soll. Somit muss kein absoluter Wert angegeben werden. Insgesamt ergibt sich dadurch folgendes Optimierungsproblem, wobei x_i^L und x_i^U untere bzw. obere Schranken für die sogenannten Designvariablen sind:

$$\begin{aligned} &\min C \\ sodass \quad & V - vV^0 \leq 0, \quad 0 < v < 1 \\ & x_i^L - x_i \leq 0, \quad i = 1 \,..\, n \\ & x_i - x_i^U \leq 0, \quad i = 1 \,..\, n \end{aligned} \tag{2}$$

Die Designvariablen x_i werden während der Optimierung variiert. Zwischen diesen und dem Volumen der Struktur besteht folgender Zusammenhang:

$$V = \sum_i v_i = \sum_i x_i v_i^0 \tag{3}$$

Hier ist v_i^0 das Ausgangsvolumen des einzelnen Elements i. Mit Veränderung der Designvariablen ändern sich die aktuellen Volumina der Elemente und damit das Gesamtvolumen.

Nach Bilden der zugehörigen Lagrange-Funktion (Gleichung (**4**)) und mithilfe der zweiten Kuhn-Tucker-Bedingung kann hieraus ein Optimalitätskriterium hergeleitet werden (Gleichung (**5**)), das als Basis für einen heuristischen Iterationsalgorithmus dient (Gleichung (**6**)).

$$\begin{aligned}\mathcal{L}(x,\vartheta,\lambda,\mu) = {} & u^T \boldsymbol{K} u + \vartheta(V - \upsilon V^0) \\ & + \sum_{i=1}^{n_e} (\lambda_i (x_i - x_i^{max}) + \mu_i (x_i^{min} - x_i))\end{aligned} \tag{4}$$

$$B_i = 1 + \frac{\lambda_i}{\vartheta v_i^0} - \frac{\mu_i}{\vartheta v_i^0} \quad \forall\, i = 1 \dots n \tag{5}$$

$$x_i^{k+1} = \begin{cases} \max(0, x_i^k - \alpha) & , x_i^k B_i^\eta \leq \max(0, x_i^k - \alpha) \\ x_i^k B_i^\eta & , \max\left(0, x_i^k - \alpha\right) < x_i^k B_i^\eta < \min(1, x_i^k + \alpha) \\ \min(1, x_i^k + \alpha) & , x_i^k B_i^\eta \geq \min(1, x_i^k + \alpha) \end{cases} \tag{6}$$

In Gleichung (**4**) müssen die sogenannten Lagrange-Multiplikatoren ϑ, $\boldsymbol{\lambda}$ und $\boldsymbol{\mu}$ die Nichtnegativitätsbedingung erfüllen. Die Faktoren α und η in Gleichung (**6**) werden Schrittweite und Dämpfungsfaktor genannt. Der Wert B_i entsteht aus der Lagrange-Funktion durch differenzieren und umstellen:

$$B_i = \frac{u^T \frac{\partial \boldsymbol{K}}{\partial x_i} u}{\vartheta v_i^0} \tag{7}$$

Nun muss, um bei der zugrundeliegenden FEA Löcher und feste Strukturen zu simulieren, der E-Modul variiert werden. Dieser wird abhängig von den

Designvariablen angepasst. Hierfür gibt es verschiedene Methoden, wovon hier kurz der SIMP-Ansatz (Solid Isotropic Material with Penalization) und der RAMP-Ansatz (Rational Approximation with Material Properties) aufgeführt werden.

2.1 SIMP-Ansatz

Ausgehend von der sog. Homogenisierungsmethode wird die Designvariable eines finiten Elements e gleich der normierten physikalischen Dichte gesetzt. Diese errechnet sich aus dem Quotienten der aktuellen physikalischen Dichte und der ursprünglichen physikalischen Dichte.

$$x_e := \rho_e^{norm} = \frac{\rho_e}{\rho_e^0} \tag{8}$$

Der SIMP-Ansatz stellt nun über ein empirisches Materialgesetz folgenden Zusammenhang zwischen E-Modul und Designvariable her:

$$\frac{E_e}{E_e^0} = \left(\frac{\rho_e}{\rho_e^0}\right)^p \quad \rightarrow \quad E_e = x_e^p \cdot E_e^0 \tag{9}$$

Um numerische Stabilität zu gewährleisten, wird eine untere Schranke für den E-Modul eingeführt, woraus sich eine leicht angepasste Variante der vorherigen Gleichung ergibt:

$$E_e = E_{min} + x_e^p \cdot (E_e^0 - E_{min}) \tag{10}$$

Der Faktor p wird Penalty-Faktor genannt. Er soll dafür sorgen, dass finite Elemente mit einer mittleren physikalischen Dichte bestraft werden, und somit mittlere E-Moduln, also zwischen E_{min} und E_e^0 vermieden werden. Abbildung 2 stellt die resultierenden (relativen) E-Moduln in Abhängigkeit der physikalischen Dichte für verschiedene Penalty-Faktoren dar. Das Ziel dieses Vorgehens ist eine möglichst gute 0-1-Verteilung, also eine Struktur mit klar definierten Grenzen zwischen Löchern und festen Bestandteilen. Üblicherweise werden Werte **zwischen 2 und 4** für den Penalty-Faktor empfohlen.

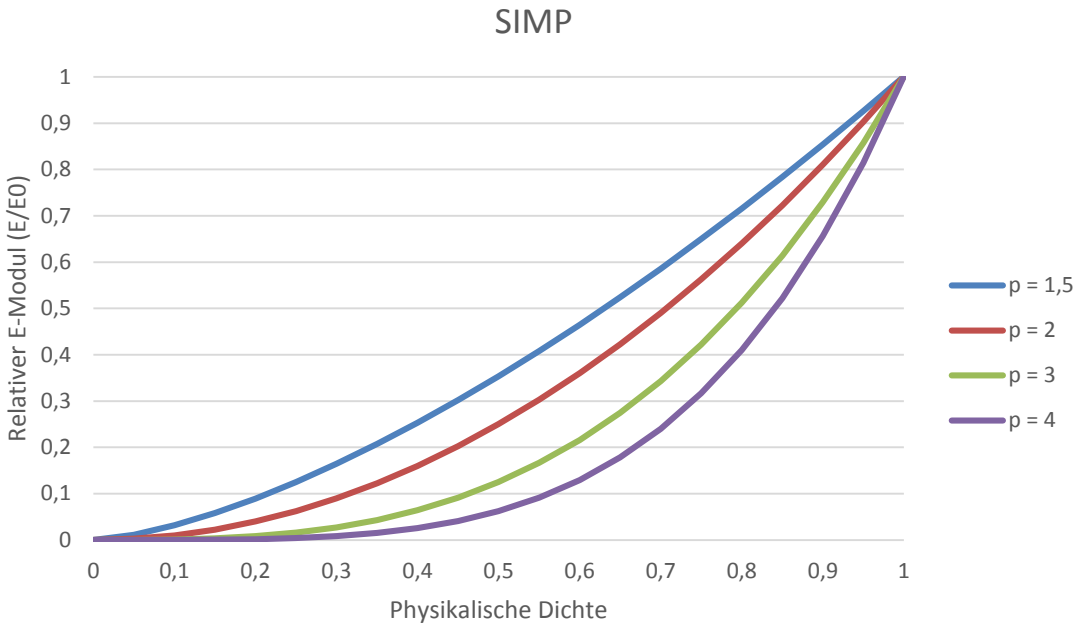


Abbildung 2: SIMP-Ansatz mit verschiedenen Penalty-Faktoren

2.2 RAMP-Ansatz

Neben dem SIMP-Ansatz gibt es den RAMP-Ansatz. Auch hier wird versucht, mittlere physikalische Dichten zu vermeiden, also zu "bestrafen". Das Ziel ist wieder eine annähernde 0-1-Verteilung der E-Moduln der einzelnen finiten Elemente.

Der Zusammenhang zwischen physikalischer Dichte und E-Modul wird in folgender Gleichung beschrieben:

$$E_e = E_{min} + \frac{x_e}{1 + q \cdot (1 - x_e)} \cdot (E_e^0 - E_{min}) \qquad \textbf{(11)}$$

Dabei ist, wie oben, e das aktuell betrachtete finite Element, E_{min} die untere Schranke des E-Moduls, E_e^0 der ursprüngliche E-Modul, x_e die Designvariable und q das Pendant zum Penalty-Faktor des SIMP-Ansatzes. Je größer q gewählt wird, desto stärker werden mittlere physikalische Dichten bestraft. Unglücklicherweise gibt es keine Richtwerte zur Orientierung. Einen Anhaltspunkt bietet Abbildung 3. Hier ist zu sehen, dass für große Faktoren q noch sehr hohe physikalische Dichten niedrigen E-Moduln zugewiesen werden.

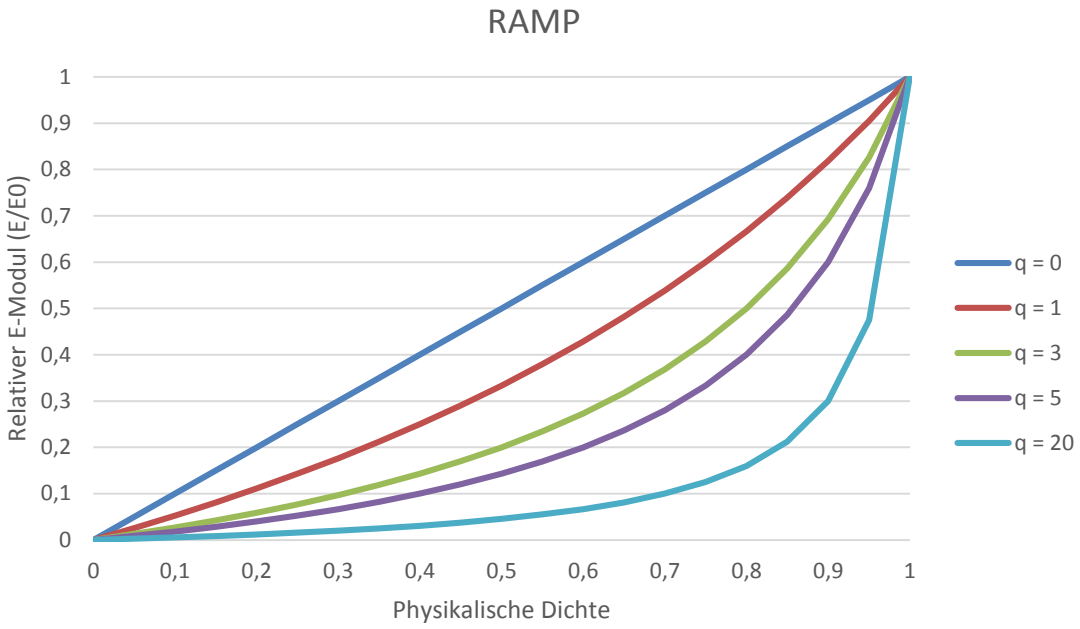


Abbildung 3: RAMP-Ansatz mit verschiedenen Faktoren

3. SKO-Verfahren

Anders als das OC-Verfahren hat das Soft-Kill-Option (SKO) Verfahren keinen mathematisch hergeleiteten Hintergrund. Grundgedanke ist hier vielmehr, Vorbilder aus der Natur nachzuahmen. Beispielsweise ist an Bäumen zu beobachten, dass bei hoher Belastung an der Stelle der Belastung vermehrt Material angelagert wird, das Baumwachstum also größer ist. Das Gleiche ist auch bei Knochen zu beobachten, die darüber hinaus aber auch Material abbauen, wenn eine Stelle unterbelastet ist.

Warum dieses Verhalten für einen Optimierungsalgorithmus verwendet wird bzw. warum vermutet wird, dass die so erzielten Strukturen "optimal" sind, begründet sich wie folgt: Die natürlichen Strukturen hatten Millionen Jahre Zeit, sich weiterzuentwickeln und neue Methoden der Anpassung herbeizuführen. Dabei hat die Evolution dafür gesorgt, dass die am besten angepassten Wesen sich am meisten vermehren. Es kann also davon ausgegangen werden, dass das Verhalten der biologischen Strukturen aufgrund des evolutionären Auswahlprozesses nah an das bzw. an ein Optimum herankommt. Da ein Beweis hierfür nicht erbracht werden kann, muss diese Aussage so hingenommen werden. Es handelt sich also um ein heuristisches Verfahren.

Wie bereits oben erwähnt, wird das OC-Verfahren zur Maximierung der Steifigkeit eines Bauteils verwendet. Das Ziel und damit das angestrebte Optimum beim SKO-Verfahren ist dagegen eine homogene Oberflächenspannung, also gleiche Spannungswerte an der gesamten Bauteiloberfläche. Es wird also zur Festigkeitsoptimierung verwendet. Da die Spannungen abhängig vom Abstand zur neutralen Faser sind, kann natürlich keine homogene Spannungsverteilung im gesamten Bauteil erreicht werden. Die Werte an der Oberfläche sind jedoch ausschlaggebend, da sie hier in der Regel am höchsten sind.

Die untenstehende Formel beschreibt, wie der E-Modul der Struktur verändert wird und welche Parameter hierauf einen Einfluss haben.

$$E_i^{k+1} = E_i^k + s \cdot (\sigma_i^k - \sigma_{ref}) \qquad \textbf{(12)}$$

Dabei beschreibt i das betrachtete finite Element, k die aktuelle Iteration, s den sogenannten Skalierungsfaktor und σ_{ref} die Referenzspannung. Diese soll einen Richtwert darstellen, welcher Wert als Oberflächenspannung erwünscht ist. Der Skalierungsfaktor dient dazu, das Verfahren sensibler oder robuster zu gestalten. Es finden sich verschiedene Anhaltswerte für den Skalierungsfaktor, wobei $s = 2$ meist empfohlen wird.

Wie anhand der Formel zu sehen ist, wird der Ausdruck in der Klammer negativ, wenn die Spannungen in einem Element unter der Referenzspannung liegen. Hierdurch wird der aktuelle E-Modul für die nächste Iteration verkleinert, was dem Abbau von Material entspricht. Hingegen wird bei einer Überbelastung, also einer Spannung über der Referenzspannung der E-Modul vergrößert, also Material angelagert.

Oft findet sich auch noch eine andere Variante der Formel, in der der E-Modul mittelbar über eine (virtuelle) Elementtemperatur angepasst wird. Dabei wird über die Spannungsdifferenzen anstelle des E-Moduls die Temperatur variiert. Grund hierfür ist die oft vorhandene Möglichkeit bei kommerziellen FE-Programmen, den E-Modul temperaturabhängig zu verändern, wohingegen der E-Modul auf direkte Weise nur schwer veränderbar ist.

4. TOSS-Verfahren

Sowohl OC als auch SKO Verfahren haben jeweils nur ein Ziel, im Falle des OC die Steifigkeit zu maximieren und im Falle des SKO die Festigkeit zu maximieren bzw. die Oberflächenspannungen zu homogenisieren. Dadurch kann es vorkommen, dass Bauteile mit hoher Steifigkeit entstehen, die jedoch große Spannungsschwankungen und Spannungsspitzen aufweisen, also ungleichmäßig belastet werden. Andererseits können auch feste Bauteile entstehen, die sich jedoch bei Belastung sehr stark verformen.

Aus diesem Grund ist in Z88Arion neben dem OC-Verfahren ein weiteres Verfahren integriert. Das sogenannte Topology Optimization for Stiffness and Stress (TOSS) Verfahren versucht, sowohl die Steifigkeit als auch die Festigkeit zu optimieren. Es handelt sich also um ein Mehrzieloptimierungsverfahren.

Zur Realisierung wird zunächst das betrachtete Bauteil mit dem OC-Verfahren optimiert. Das Resultat, die steife Struktur, wird anschließend mit dem SKO-Verfahren optimiert. Hier kann es dann sein, dass die Struktur an manchen Stellen wieder verdickt, während sie an anderen Stellen verdünnt wird. Der grundsätzliche Aufbau, der sich nach dem OC-Verfahren ergeben hat, bleibt jedoch erhalten. Somit wird erreicht, dass die Endstruktur möglichst steif ist, gleichzeitig aber auch die Festigkeitsanforderungen gut erfüllt. Die gesamte Optimierung wird in einem Optimierungslauf durchgeführt, das heißt, der Benutzer muss sich nicht darum kümmern, die beiden verwendeten Verfahren zu starten.

5. Filterung

Bei linearen Finiten Elementen kann sich im Laufe der Optimierung eine Struktur ausbilden, die einem Sachbrettmuster ähnelt. Es wechseln sich dabei Finite Elemente mit hoher und geringer Steifigkeit ab, weshalb dieses Phänomen als Checkerboard-Effekt bezeichnet wird. Diesen Effekt zeigt Abbildung 4 schematisch.

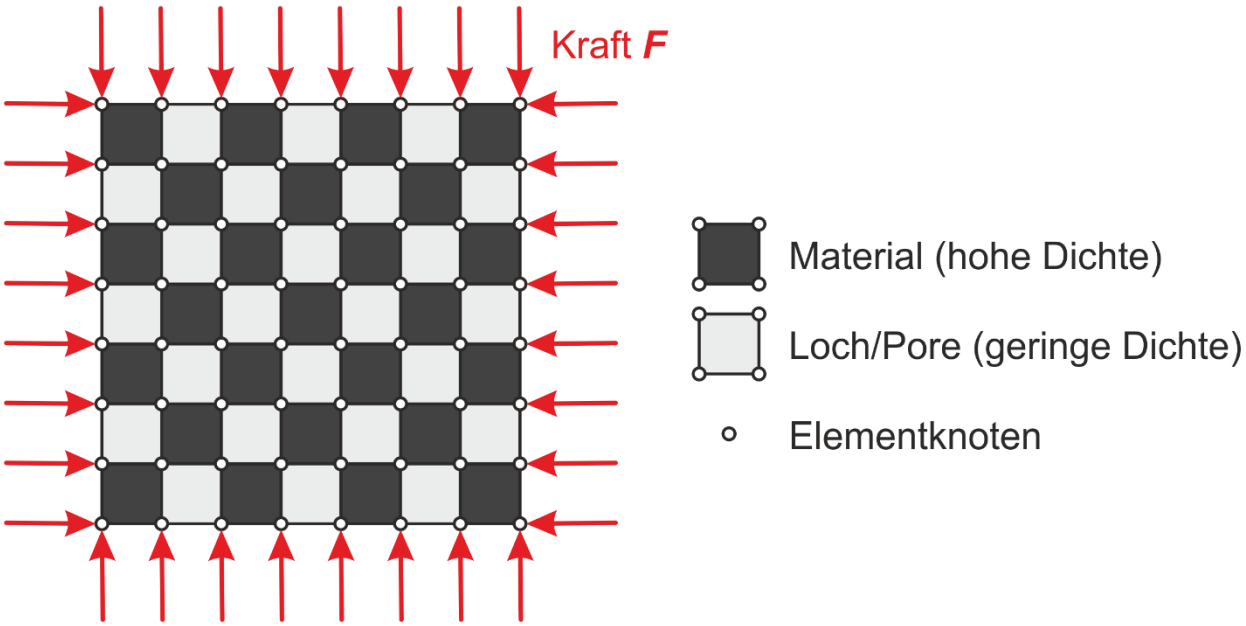


Abbildung 4: Darstellung des Checkerboard-Effekts

Hierbei tritt eine künstliche Steifigkeit in diesen Bereichen auf, da lineare Elemente die Steifigkeit bei einem solchen Muster numerisch schlecht modellieren. Aus numerischer Sicht repräsentiert somit die schachbrettartige Materialverteilung die Lösung des Optimierungsproblems. Dies gilt hauptsächlich, wenn als Zielfunktion die Maximierung der Steifigkeit definiert ist. Um diesen unerwünschten Effekt zu unterbinden, existieren verschiedene Ansätze. Einerseits können für die Topologieoptimierung finite Elemente mit quadratischem Ansatz verwendet werden, andererseits ist der Einsatz von Filter eine gängige Methode. Diese Mechanismen verändern Zwischenergebnisse des Algorithmus so, dass benachbarte Finite Elemente in einem vordefinierten Bereich nicht wegoptimiert werden. Am weitesten verbreitet sind Sensitivitäts-

und Dichtefilter, die das Ergebnis der Topologieoptimierung unterschiedlich stark beeinflussen können.

In Z88Arion ist ein Sensitivitätsfilter implementiert, der in drei verschiedenen Varianten genutzt werden kann. Je nachdem, welcher Radius eingestellt wird, wird ein größerer oder kleinerer Bereich um die betrachteten Elemente beibehalten bzw. nicht wegoptimiert. Der Radius kann als absoluter, durchschnittlicher oder maximal erlaubter Wert angegeben werden.

Variante 1 („sensitivity filter without density weighting“)

$$\widetilde{dC}_e = \frac{\widetilde{\partial C}}{\partial x_e} = \frac{\sum_{i=1}^{n_e} h_{ei} \cdot \frac{\partial C}{\partial x_i}}{\sum_{i=1}^{n_e} h_{ei}} \tag{13}$$

Variante 2 („bi-lateral sensitivity filter“)

$$\widetilde{dC}_e = \frac{\widetilde{\partial C}}{\partial x_e} = \frac{\sum_{i=1}^{n_e} h_{ei} \cdot \bar{h} \cdot V_i^0 \cdot \frac{\partial C}{\partial x_i}}{\sum_{i=1}^{n_e} h_{ei} \cdot \bar{h} \cdot V_i^0} \tag{14}$$

Variante 3 (Erweiterung nach *Pedersen*)

$$\widetilde{dC}_e = \frac{\widetilde{\partial C}}{\partial x_e} = \frac{\sum_{i=1}^{n_e} h_{ei} \cdot V_i^0 \cdot \frac{\partial C}{\partial x_i}}{\sum_{i=1}^{n_e} h_{ei} \cdot V_i^0} \tag{15}$$

6. Glättung

Nach der Optimierung eines Bauteils muss das Ergebnis in der Regel nachkonstruiert werden, um damit weiterarbeiten zu können. Das reine Optimierungsergebnis ist allerdings schwer zu interpretieren, da durch das Wegnehmen einzelner Finite Elemente durch die zurückbleibenden Elemente eine zerklüftete Struktur entsteht. Um die Ergebnisse besser interpretieren zu können oder evtl. sogar sofort damit weiterarbeiten zu können, ist die Glättung ein unverzichtbares Werkzeug. Abbildung 5 zeigt den Vergleich eines nicht geglätteten mit einem geglätteten Ergebnis.

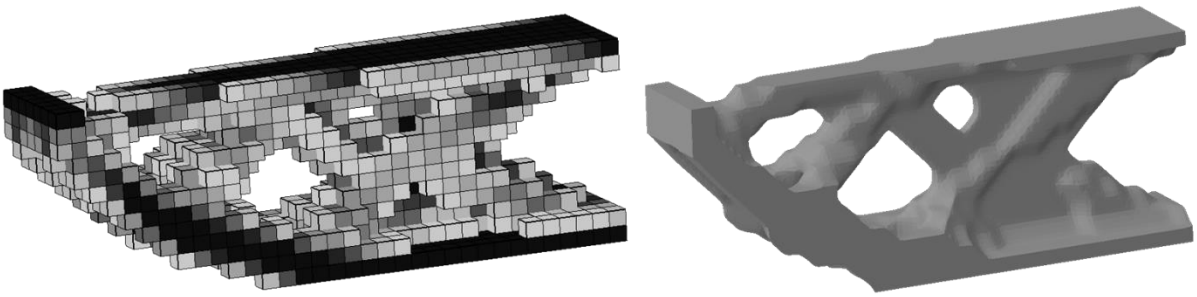


Abbildung 5: Optimiertes Ergebnis vor und nach der Glättung

Das in Z88Arion implementierte Glättungsverfahren arbeitet mit zwei konsekutiven Schritten. Im ersten Schritt wird das ursprüngliche Ergebnis um die Elemente „bereinigt“, die weggefallen sind. Diese sind nach der Optimierung noch enthalten und werden nur basierend auf ihrer sehr niedrigen Dichte ausgeblendet. Weiterhin werden die Elemente, die erhalten bleiben, aber eine relative Dichte kleiner als eins haben, so bearbeitet, dass sie auch nur zu diesem Anteil in der finalen Struktur enthalten sind. Hierfür wird pro Knoten die Knotendichte basierend auf den Elementdichten um diesen Knoten berechnet. Diese Knotendichte wird dann verwendet, um zu entscheiden, ob ein Knoten Teil der Struktur bleibt oder nicht.

Der zweite Schritt besteht darin, die vorbereitete Struktur mit einem impliziten Laplace-Verfahren zu glätten. Um hierbei gewisse Eigenschaften der Struktur nicht „wegzuglätten“, wird die Struktur adaptiv verfeinert. Abbildung 6 zeigt, wie sich diese Verfeinerung auf die Glättung auswirkt.

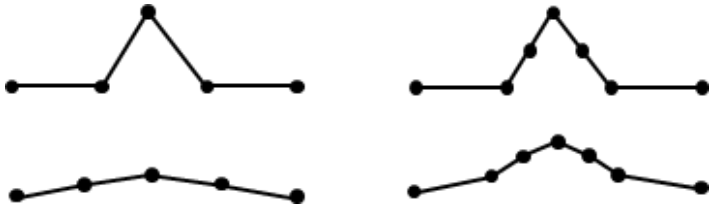


Abbildung 6: Adaptive Verfeinerung zum Erhalt bestimmter Struktureigenschaften

Um die Weiterarbeit mit dem geglätteten Ergebnis zu vereinfachen, kann dieses direkt als STL-Datei exportiert werden und in weiterführender Software wieder importiert werden. Außerdem ist es möglich, das geglättete Ergebnis direkt aus Z88Arion in Z88Aurora zu öffnen, um damit weitere Finite Elemente Analysen durchzuführen.

Eine Topologieoptimierungssoftware basierend auf Z88® für Windows-Computer (64-bit)

Diese Freeware-Version ist geistiges Eigentum des Lehrstuhls für Konstruktionslehre und CAD der Universität Bayreuth, herausgegeben von Univ. Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg

unter der Mithilfe von:

Dr.-Ing. Bettina Alber-Laukant, Dipl.-Ing. Daniel Billenstein
Maximilian Braun, M.Sc., Kevin Deese, M.Sc.
Christian Dinkel, M.Sc., Pascal Diwisch, M.Sc.
Dr.-Ing. Andreas Dörnhöfer, Dr.-Ing. Michael Frisch
Johannes Glamsch, M.Sc., Christian Glenk, M.Sc.
Dipl.-Ing. Daniel Goller, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Reinhard Hackenschmidt
Stefan Hautsch, M.Sc., Florian Hüter, M.Sc.
Dipl.-Ing. Claudia Kleinschrodt, Dr.-Ing. Martin Neidnicht
Dr.-Ing. Florian Nützel, Frank Rudolph, M.Sc., Dipl.-Ing. Felix Viebahn
Dr.-Ing. Christoph Wehmann, Johannes Wittmann, M.Sc.
Aljoscha Zahn, M.Sc., Dr.-Ing. Markus Zimmermann

Alle Rechte bleiben beim Verfasser

Z88 Arion® ist eine eingetragene Marke (Nr. 30 2015 2261863) von Univ. Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg

Beachten Sie, dass bei Z88Arion (und auch anderen Finite-Elemente-Analyse- bzw. Optimierungsprogrammen) mitunter Vorzeichendefinitionen gelten, die von den üblichen Definitionen der analytischen Technischen Mechanik abweichen.

⚠ Einheitenkonventionen werden vom Benutzer selbstständig verwaltet. Die in Z88Arion integrierte Materialdatenbank arbeitet mit den Einheiten N/mm/t.

Z88Arion ist ein leistungsfähiges, komplexes Computerprogramm, das sich noch in der Entwicklungsphase befindet.

Inwieweit Z88Arion sich mit anderen Programmen verträgt, ist noch nicht untersucht! Ziel dieser Forschungsversion ist es, Ihnen das grundsätzliche Bedienkonzept des Programms näher zu bringen. Die Entwickler von Z88Arion sind stets interessiert, die Software zu verbessern. Vorschläge, Anregungen und Hinweise können an hilfe@z88arion.de gesendet oder im Forum unter http://forum.z88.de veröffentlicht werden.

Systemanforderungen

Betriebssysteme	Microsoft® Windows 7®, Windows 8.1® oder Windows 10®, jeweils 64-Bit
Grafikanforderungen	OpenGL-Treiber
Arbeitsspeicher	Mindestens 1 GB, empfohlen 8 GB
Dokumentation und Videos erfordern	PDF-Reader, Videoplayer, Browser

1. Die Oberfläche im Überblick

Z88Arion zeichnet sich durch die intuitive Bedienung des Prä- und Postprozessors aus. Das Projektdatenmanagement erfolgt mit einer Projektmappenverwaltung. Eine Statusanzeige sorgt für besseren Bedienkomfort.

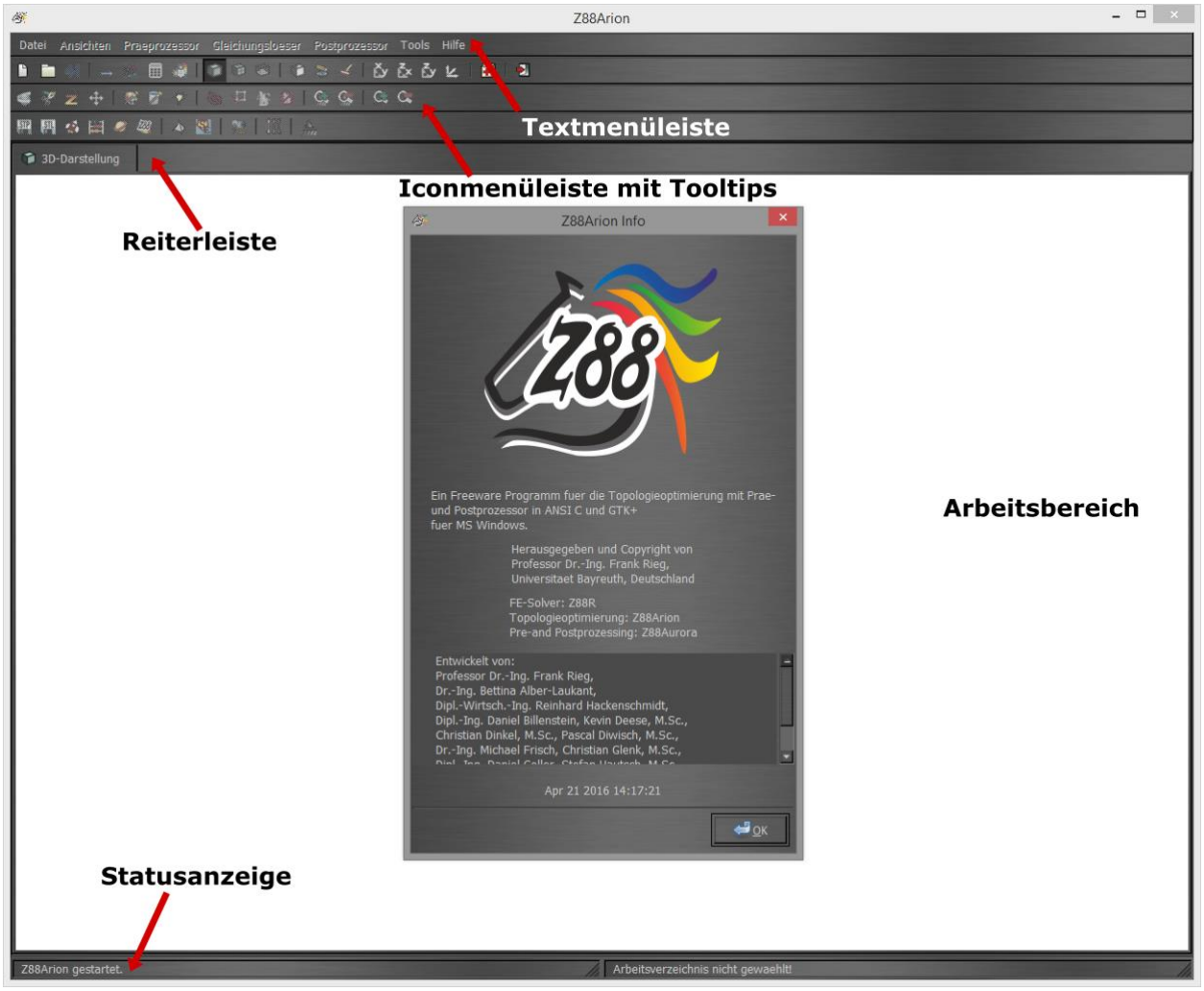


Abbildung 7: Oberfläche von Z88Arion

2. Menüleisten

Die Bedienung erfolgt über mehrere Menüleisten. Den Schnellzugriff auf alle Funktionen von Z88Arion bieten die drei Iconmenüleisten. Die Hauptfunktionen der oberen Iconmenüleiste, wie z. B. Präprozessor, öffnen zusätzliche Seitenmenüs. Die anderen zwei Iconmenüleisten enthalten diverse Ansichtsmanipulationen, Farbeinstellungen, Importoptionen und die Präprozessorfunktionalitäten.

Die vier Hauptfunktionen „Import“, „Präprozessor“, „Solver“ und „Postprozessor“ sind zusätzlich über die F-Tasten (F2 - F5) verfügbar.

In der Textmenüleiste sind alle Funktionalitäten der Iconmenüleiste und der Seitenmenüs enthalten, die jeweiligen Icons sind den Textbefehlen vorangestellt. Je nach dem momentanen Arbeitsschritt existieren mehrere Reiter in der Reiterleiste, wie z. B. die Materialkarten im Materialmenü, zwischen denen gewechselt werden kann. Mit der Betätigung des „X“ an jeder Reiterleiste kann der Reiter geschlossen werden.

Die Iconmenüleiste ist in verschiedene Bereiche unterteilt: die Projektmappenverwaltung, die kontextsensitiven Seitenmenüs, die Darstellungsoptionen und den Support. Je nach Stand der Analyse sind einzelne Icons grau hinterlegt, da die Funktionalität zum aktuellen Zeitpunkt nicht verfügbar ist.

Bitte beachten Sie jederzeit die Statusanzeigen am linken unteren Rand der Bedienoberfläche. Hier finden Sie Hinweise auf die nächsten Schritte bzw. Informationen zur Bedienung!

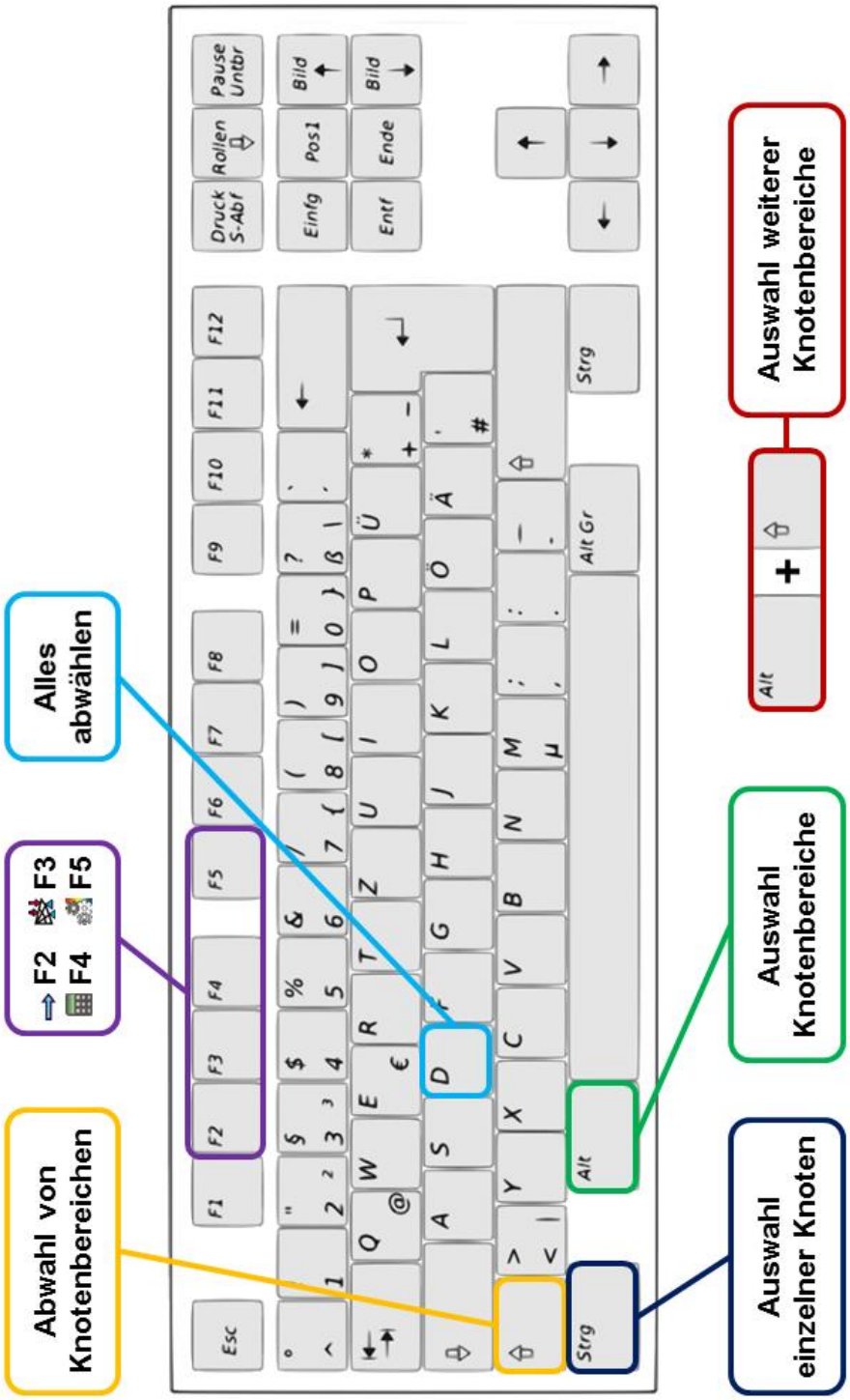


Abbildung 8: Tastaturbelegung

3. Icons

Hier finden Sie eine Übersicht der Icons für die Toolleisten in Z88Arion.

Icon	ID	Beschreibung	Icon	ID	Beschreibung
-	0	Trennlinie		25	Koordinatensystem
	2	Neues Projekt		26	Einpassen
	3	Projektmappe öffnen		27	Ansicht Aktualisieren
	4	Projektmappe schließen		28	Randbedingungen vergrößern
	5	Import		29	Randbedingungen verkleinern
	6	Präprozessor		32	Picking-Punkte vergrößern
	7	Solver		33	Picking-Punkte verkleinern
	8	Postprozessor		36	Vernetzen: Tetraeder
	10	Hilfe		37	Vernetzen: Superelemente
	11	Beenden		39	Materialdatenbank
	12	Rotationen		40	Randbedingungen
	13	Clipping		41	STEP-Import
	14	Z-Limit		42	STL-Import
	15	Legendenfarben		44	NASTRAN-Import
	16	Beleuchtung		45	ABAQUS-Import
	17	Bauteilfarben		47	COSMOS-Import
	18	Knotennummern		48	Z88-Import
	19	Elementnummern		50	Darstellung schattiert
	20	Alles beschriften		51	Darstellung Oberflächennetz
	21	Alle Beschriftungen ausblenden		52	Darstellung Netz
	22	X-Y-Ansicht		53	Picking
	23	X-Z-Ansicht		54	Rand-/Volldarstellung
	24	Y-Z-Ansicht		55	Schnelle Ansicht
				-1	Ende der Toolleiste

Weitere Erläuterungen zu den zugrunde liegenden Funktionen finden Sie in den jeweiligen Kapiteln des Handbuchs.

Um die Toolleisten manuell anzupassen, können Sie in der Datei z88enviro.dyn (zu finden im Installationsverzeichnis `Z88Arion/win/bin`) die jeweiligen Icon-IDs anpassen, verschieben oder entfernen. Hierbei gilt folgende Syntax:

```
TOOLBAR #Nummer_der_Toolbar #Toolbar_an_aus
#Icon-ID #Icon-ID … #Icon-ID -1
```

Die Toolbars sind fortlaufend nummeriert (erste Zahl nach `TOOLBAR`) und können aktiviert (zweite Zahl nach `TOOLBAR` = 1) bzw. deaktiviert (Zahl = 0) werden. Im Folgenden ist die Standard-Einstellung aus der Datei z88enviro.dyn abgedruckt:

```
**Buttons der Toolleisten
TOOLBAR 1 1
2 3 4 0 5 6 7 8 0 50 51 52 0 54 55 27 0 22 23 24 25 0 10 0
11 -1
TOOLBAR 2 0
-1
TOOLBAR 3 1
12 13 14 26 0 15 17 16 0 18 19 20 21 0 28 29 0 32 33 -1
TOOLBAR 4 1
41 42 44 45 47 48 0 36 37 0 53 0 39 0 40 -1
```

4. Projektmappenverwaltung

Je nach Projektstand ist es dem Anwender möglich, eine neue Projektmappe zu erstellen oder ein bestehendes Projekt zu öffnen. Funktionalitäten, die zu diesem Zeitpunkt nicht verfügbar sind, werden grau hinterlegt dargestellt.

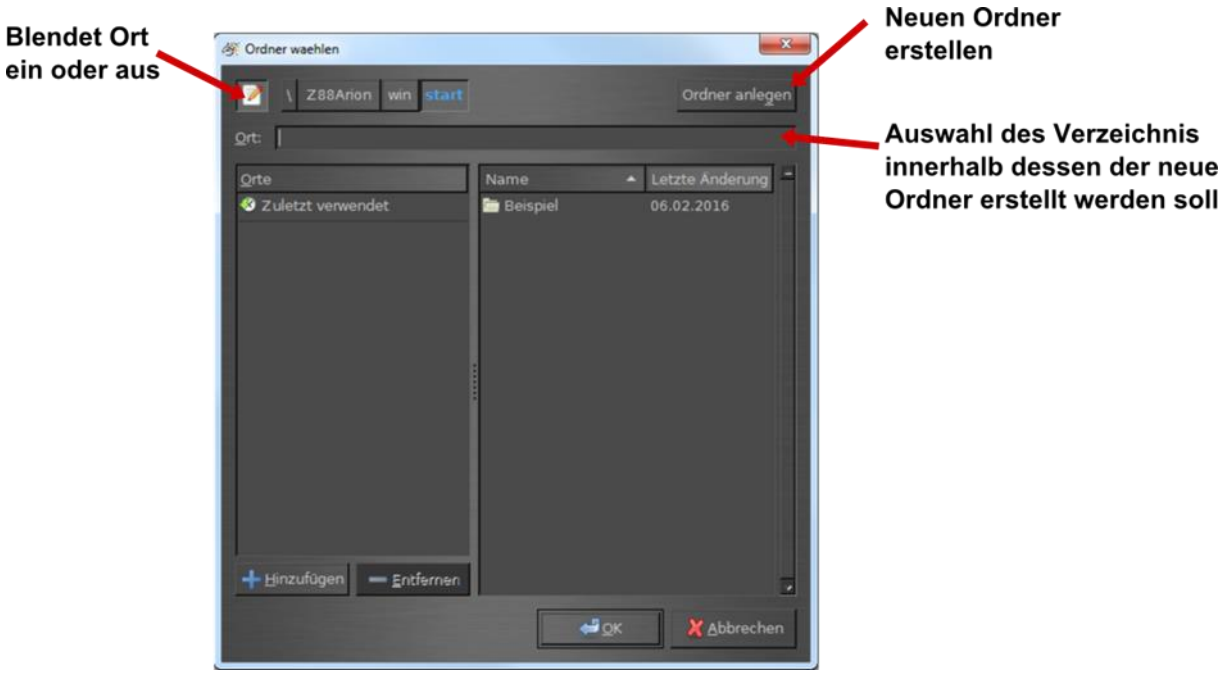


Abbildung 9: Projektmappenverwaltung von Z88Arion

4.1 Neue Projektmappe erstellen

- Einen neuen Ordner anlegen
  - Namen des Ordners eingeben
    - Bestätigen (Return)
- Klicken Sie OK, um die Aktion zu bestätigen

Die Eingabemaske verschwindet, Sie können mit der Erstellung des Berechnungsmodells beginnen.

Für die weitere Verwendung der Projektmappe kann diese in den Schnellzugriff gelegt werden! (⇨ Hinzufügen)

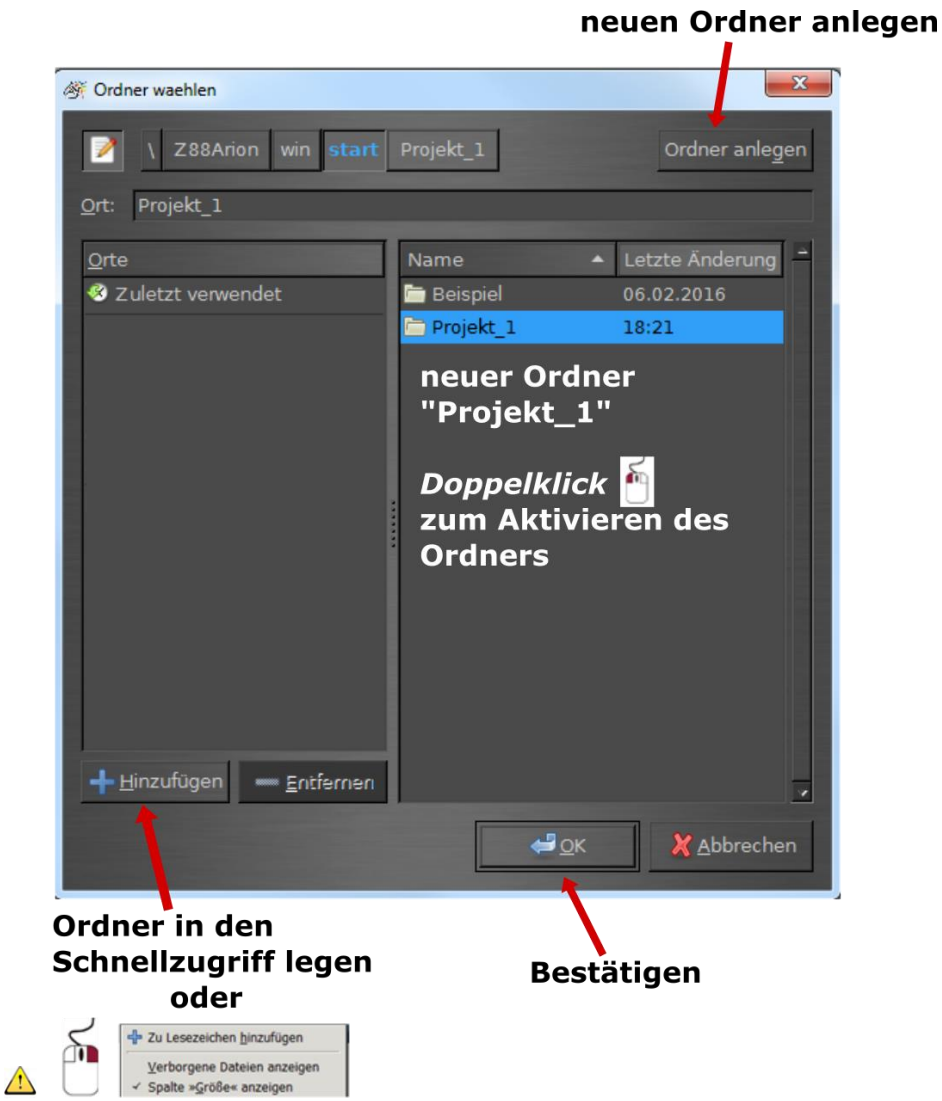


Abbildung 10: Neue Projektmappe erstellen und in den Schnellzugriff legen

4.2 Projektmappe öffnen

- Eine zu öffnende Projektmappe auswählen
- Klicken Sie OK, um die Aktion zu bestätigen. Das Projekt wird im Arbeitsbereich angezeigt

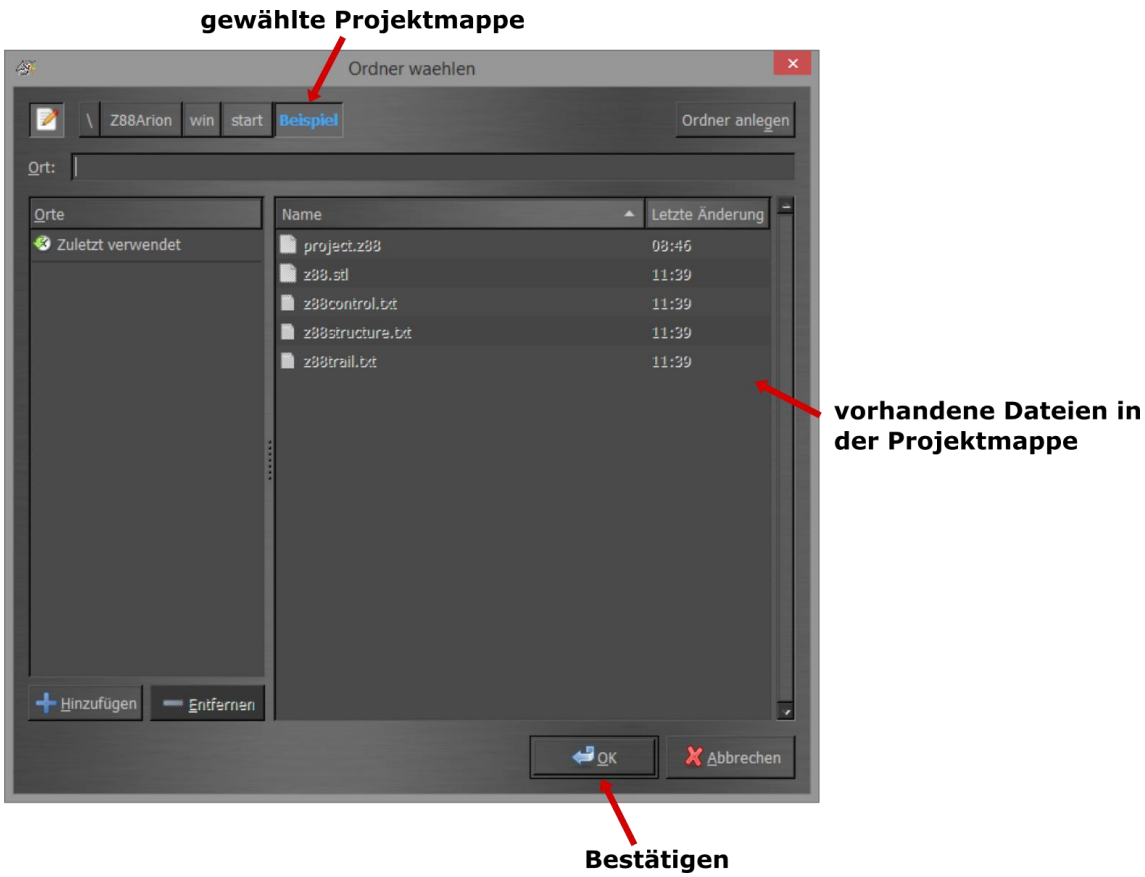


Abbildung 11: Eine bestehende Projektmappe öffnen

- Allgemein kann mit einem Doppelklick direkt aus der Oberfläche auf die entsprechenden Projektmappe zugegriffen werden, siehe Abbildung 12.

Abbildung 12: Direkter Projektmappenzugriff

4.3 Projektmappe schließen

Mit diesem Button wird die momentan geöffnete Projektmappe geschlossen.

Sie müssen immer erst die aktuelle Projektmappe schließen, um eine neue zu erstellen oder ein anderes Projekt zu öffnen!

4.4 Projektmappenverwaltung in der Textmenüleiste

Zusätzlich zu der Iconmenüleiste verfügt Z88Arion über eine Textmenüleiste oberhalb der Iconmenüleiste. Diese beinhaltet entweder weitere Funktionalitäten oder man kann die gleichen Funktionen aufrufen, wie sie in der Iconmenüleiste vorhanden sind. Auch hier sind Funktionalitäten, die derzeit nicht verfügbar sind, grau hinterlegt.

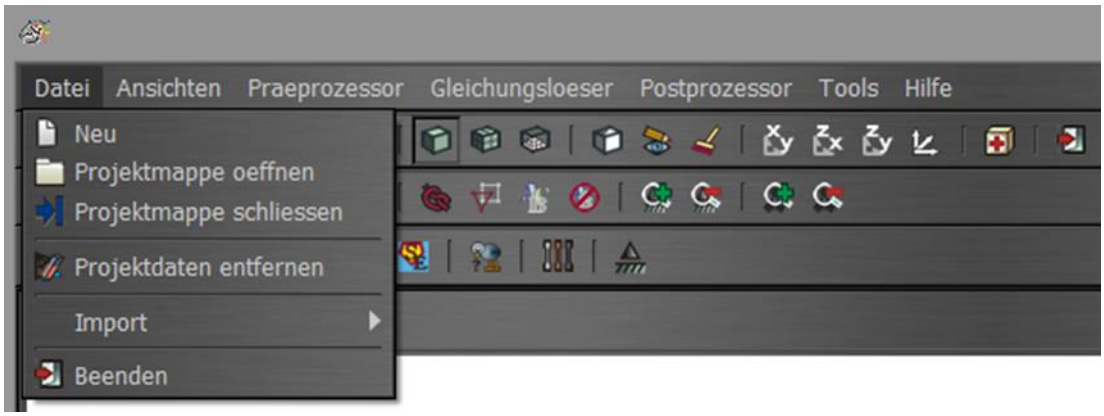


Abbildung 13: Projektmappenverwaltung in der Textmenüleiste

5. Ansicht

Die Anzeigeoptionen können in Z88Arion vielfältig editiert werden. Es besteht die Möglichkeit, häufig benötigte Werkzeugleisten bei Bedarf anzeigen zu lassen oder deren Anordnung zu ändern, die Lichter, Material- und Legendenfarbe zu ändern oder diverse zusätzliche Ansichtsoptionen an- bzw. auszuschalten. Im Untermenü „Labels“ können die Nummerierungen der Knoten und Elemente eingeschaltet werden.

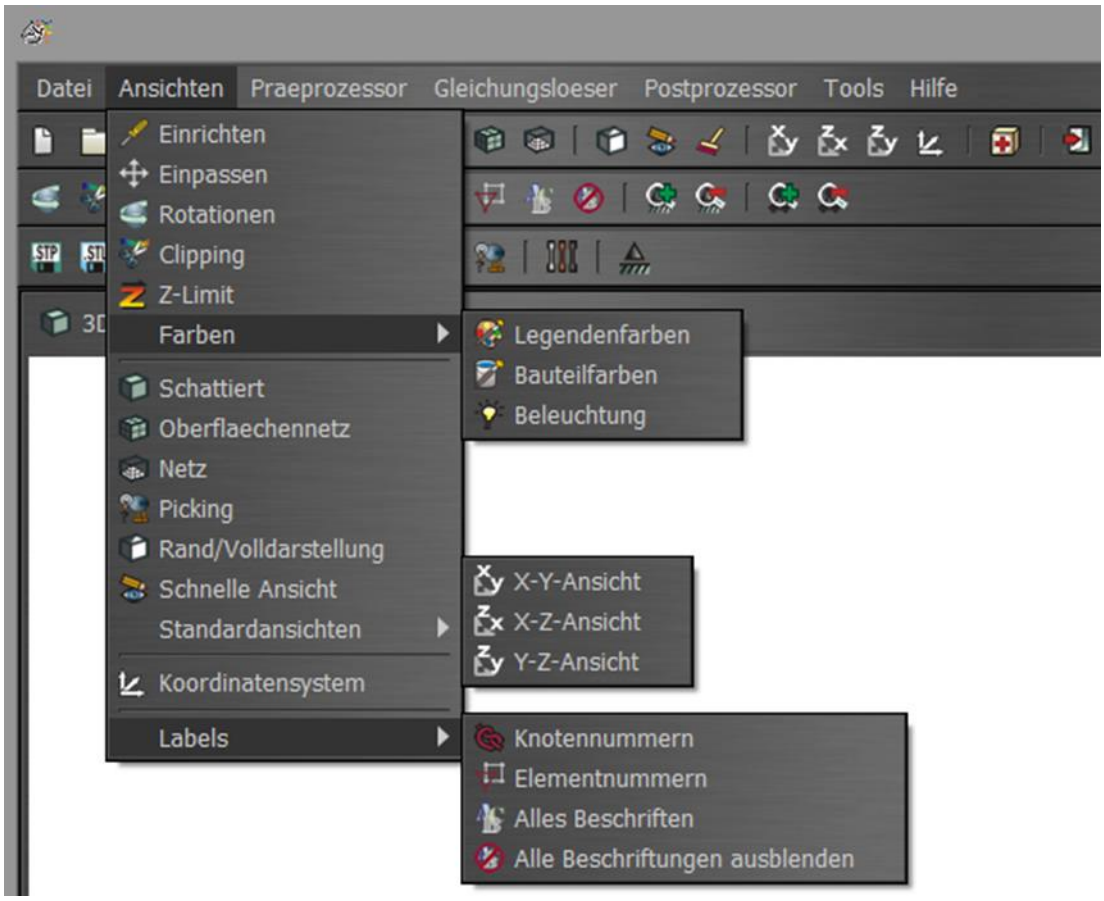


Abbildung 14: Ansichtsoptionen

5.1 Werkzeugleisten

Für Import/Export, Ansicht und Präprozessor besteht die Möglichkeit, zusätzlich Werkzeugleisten einzublenden. Dies kann dauerhaft über die Einstellung in der Datei z88enviro.dyn im Installationsverzeichnis geschehen oder sitzungsabhängig über das Menü „Ansicht → Einrichten“. Nähere Informationen und Anpassungsmöglichkeiten finden Sie unter Kapitel 3.

5.2 Kameraeinstellungen

Autoscale bietet die Möglichkeit, das Modell in das OpenGL-Fenster einzupassen. Mit Rotationen 3D kann ein gedrehter Zustand mit einem definierten Rotationswinkel eindeutig eingestellt werden. Z-Limit zum Betrachter stellt eine Clipping-Möglichkeit dar. Durch das Einstellen einer definierten Z-Ebene kann das Bauteil von innen betrachtet werden. Alternativ können die drei Koordinatenebenen (X-Y, X-Z, Y-Z) und die Frontebene mit Clipping per Schieberegler für das Schneiden der Ansicht verwendet werden.

5.3 Farben

Sowohl die Legendenfarbe als auch die Hintergrundfarbe des OpenGL-Fensters können beliebig verändert werden. Hierzu kann auf definierte Standards (Schwarz/Weiß, Weiß/Schwarz, Standard) zurückgegriffen oder manuell eine bestimmte Farbe eingestellt werden. Das Bauteil wird über die Bauteilfarbe und die Lichtoptionen angepasst dargestellt.

5.4 Darstellungen

Es bieten sich vier Möglichkeiten der Ansichtsdarstellung. Diese können über die Icons in der Iconmenüleiste gesteuert werden.

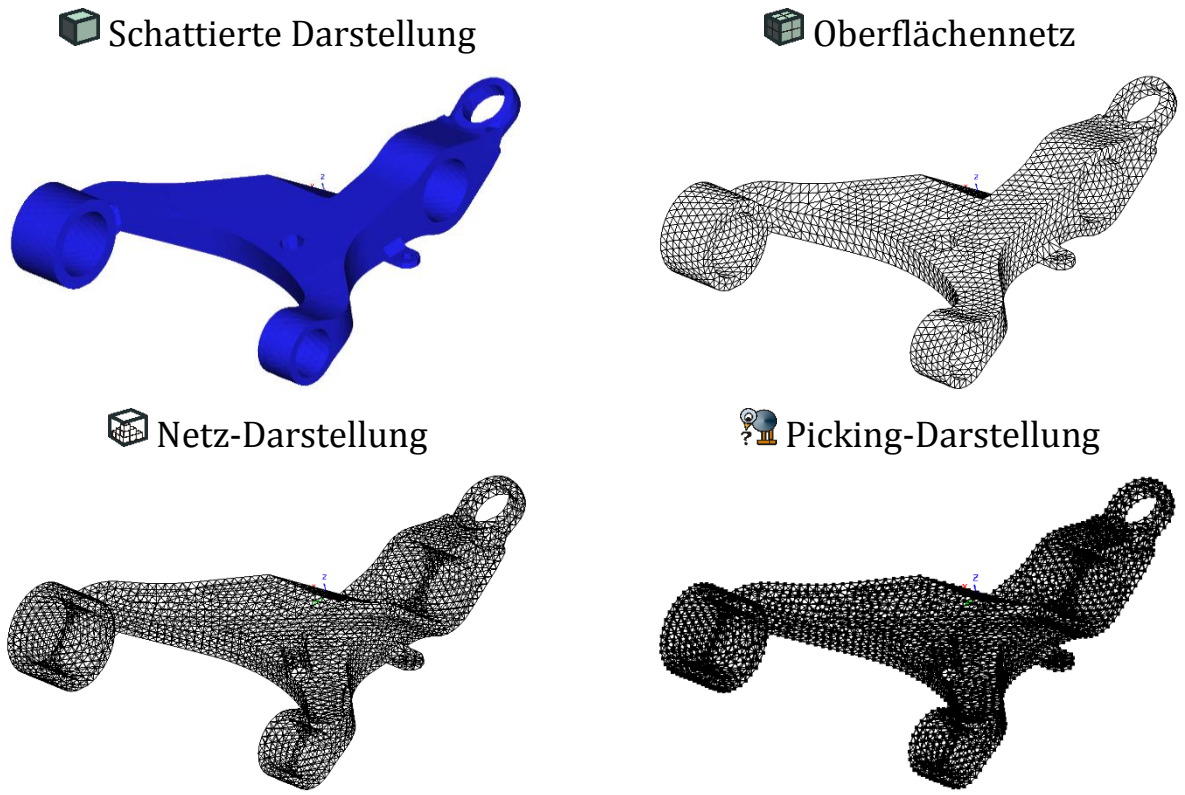


Abbildung 15: Darstellungsoptionen in Z88Arion

Bei der Aktivierung der Picking-Funktion wechselt Z88Arion automatisch in die Picking-Ansicht. Mit der Aktivierung der schnellen Ansicht in Kombination mit der schattierten Darstellung können selbst große Bauteile schnell bewegt werden.

5.5 Ansichten und Ansichtsoptionen

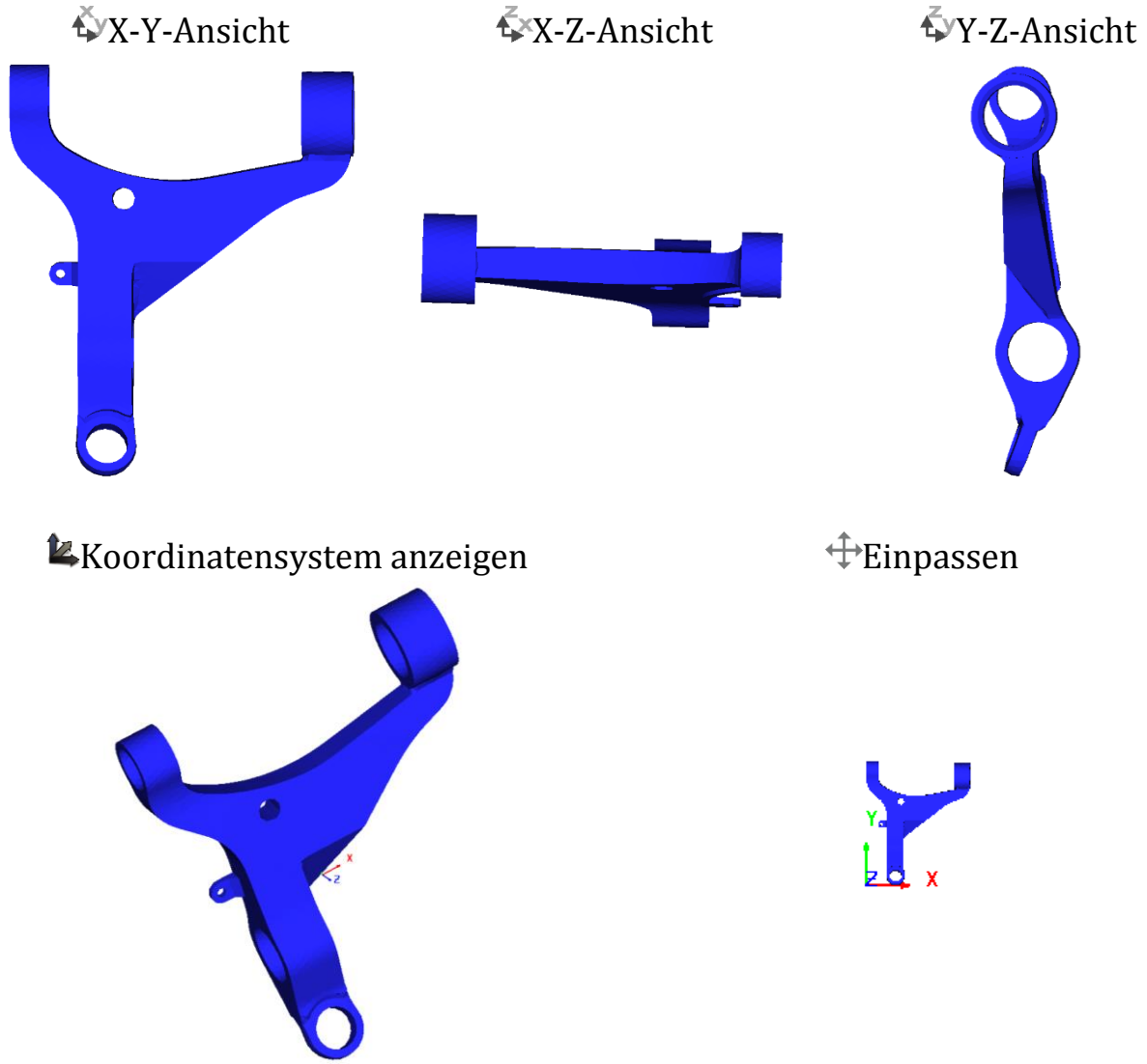


Abbildung 16: Ansichtsoptionen in Z88Arion

Pro Klick auf das jeweilige Icon dreht sich die Ansicht um 180°.

5.6 Labels

Der Menüpunkt „Labels“ dient dazu, die jeweiligen Knoten und Elementnummern gewählter Objekte anzuzeigen und enthält folgende Unterpunkte:

5.6.1 Knoten

Es wird ein Fenster eingeblendet, in dem die Nummern der gewünschten Knoten eingetragen werden müssen, um sie anzuzeigen. Der Dialog wird mit „OK“ beendet.

5.6.2 Elemente

Analog zu „Labels → Knoten“ können auch hier die gewünschten Elementnummern eingetragen werden, um diese anzuzeigen.

5.6.3 Knoten und Elemente

Bei dieser Funktion werden die Labels aller Knoten und Elemente eingeblendet.

Bitte beachten Sie, dass diese Funktion die Darstellung großer Strukturen mit vielen Elementen und Knoten einerseits sehr unübersichtlich gestalten kann und anderseits die Geschwindigkeit des Programms, je nach verwendeter Hardware, negativ beeinflussen kann.

5.6.4 Knoten und Elemente ausblenden

Bei dieser Funktion werden die Labels aller Knoten und Elemente ausgeblendet.

5.7 Größe Randbedingungen / Pickingpunkte

5.7.1 Größe Randbedingungen

Die Funktion Größe Randbedingungen bewirkt, dass die angezeigten Randbedingungen im Präprozessormenü vergrößert oder verkleinert dargestellt werden.

Große Darstellung

Kleine Darstellung

Abbildung 17: Darstellung der Randbedingungen

5.7.2 Größe Pickingpunkte

Die Funktion Größe Picking bewirkt, dass die angezeigten Pickingpunkte vergrößert oder verkleinert dargestellt werden.

6. ⇒ Kontextsensitive Seitenmenüs

Wenn Sie ein Projekt gestartet haben, können Sie verschiedene Aktionen ausführen. Zum einen können Sie ein bestehendes Projekt anzeigen und verändern, zum anderen können Sie eine Struktur sowohl aus einem CAD-Programm als auch einem FE-Programm importieren.

6.1 ⇒ Import von CAD und FE-Daten

Nach dem Erstellen einer neuen Projektmappe besteht die Möglichkeit, sowohl Geometriedaten als auch FE-Strukturen einzulesen und diese in Z88Arion weiter zu verwenden. Einen Überblick über die verwendbaren Formate gibt Abbildung 18.

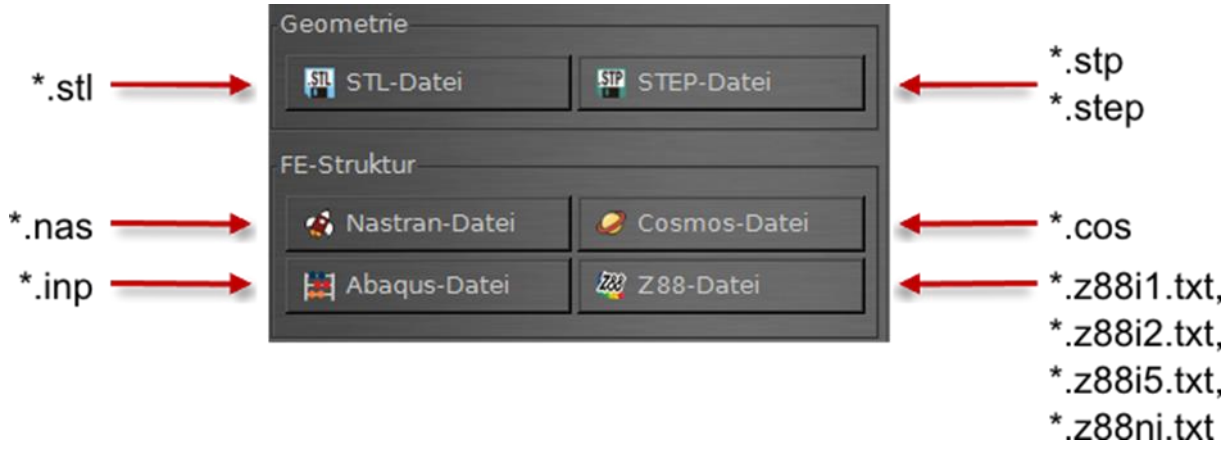


Abbildung 18: Import in Z88Arion

6.1.1 Import

Exemplarisch wird die Vorgehensweise zum Import einer STEP-Datei dargestellt (Abbildung 19):

- Import anwählen
  - Auf „STEP-Datei“ klicken, ein Auswahlfenster öffnet sich
    - Datei auswählen
      - Klicken Sie OK, um die Aktion zu bestätigen

⇨ Import CAD / FE Daten

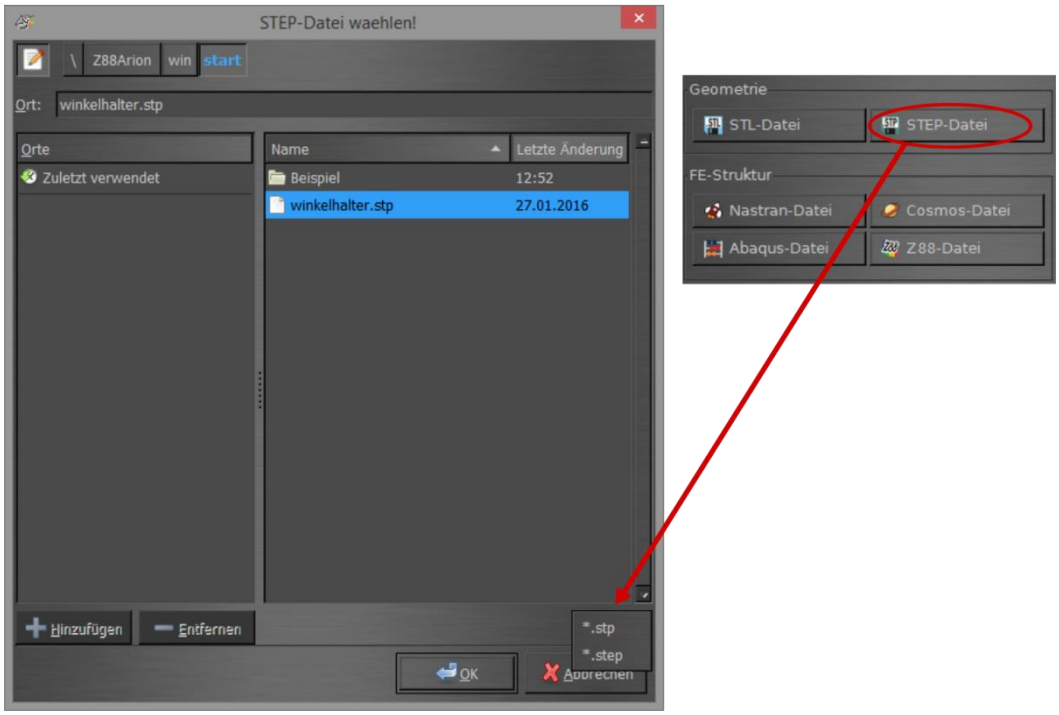


Abbildung 19: Import einer STEP-Datei

⚠ Die Voreinstellung, welche Eingabedatei eingelesen werden soll, nimmt der Benutzer selbsttätig vor.

⚠ Die Einleseroutine ist von der Qualität der gegebenen Daten abhängig. Unvollständige oder beschädigte STEP- oder STL-Daten führen zu inkorrekten Darstellungen und fehlerhaften Vernetzungen in Z88Arion.

In diesem Fall ist es notwendig, die Exporteinstellungen des CAD-Programms anzupassen. Je nach Programm können die Sehnenlängen, die Innenwinkel oder Seitenverhältnisse geändert werden.

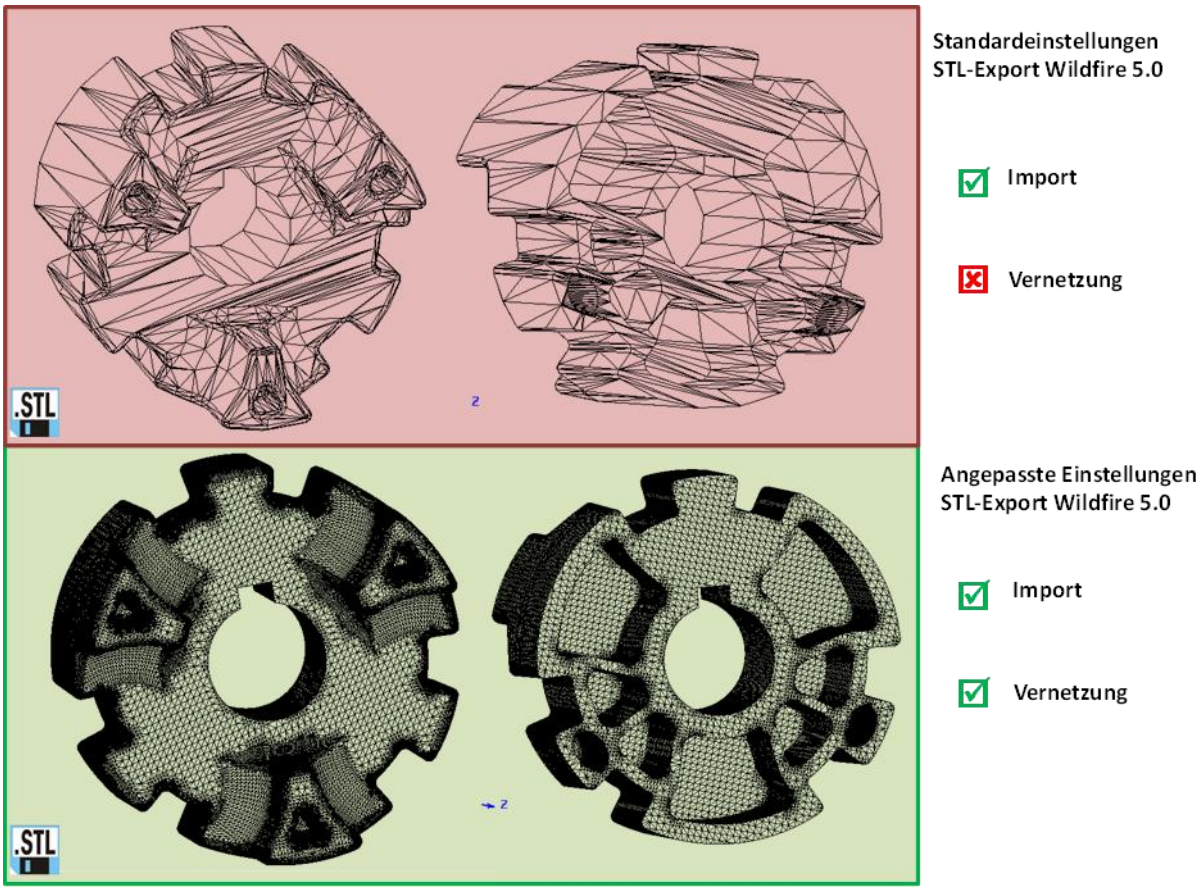


Abbildung 20: Import einer STL-Datei

Einen Überblick über die Modelldaten, die aus FE-Strukturdaten übernommen werden können, bietet Tabelle 1.

Tabelle 1: Modelldaten, die aus FE-Strukturdaten übernommen werden können

	Z88	ABAQUS	COSMOS	NASTRAN
FE-Struktur	✓	✓	✓	✓
FE-Superstruktur	✓	✗	✗	✗
Einzellasten	✓	✓	✓	✓
Festhaltungen	✓	✓	✓	✓
Flächenlasten	✓	✗	✗	✓

6.1.2 Import Textmenüleiste

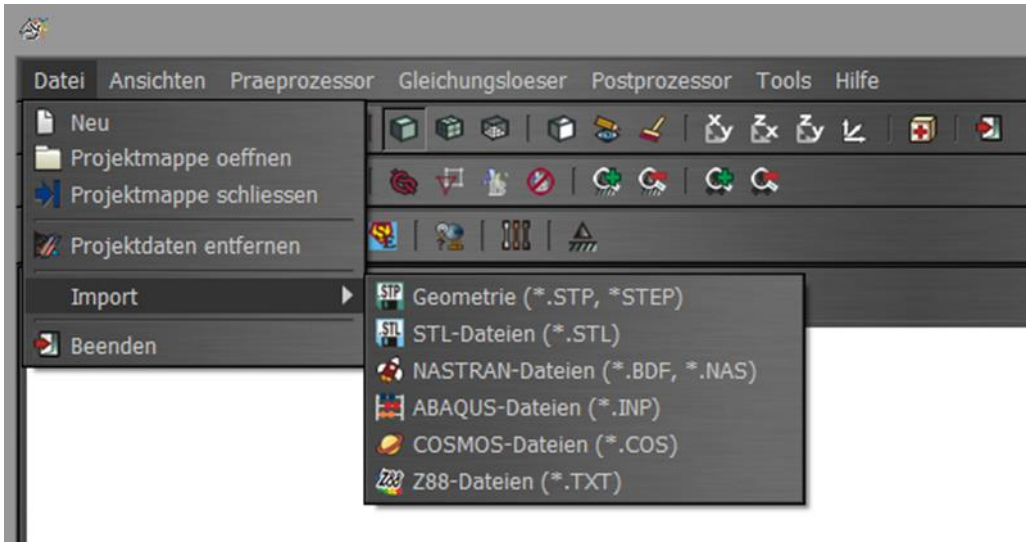


Abbildung 21: Import in der Textmenüleiste

6.1.3 Werkzeugleiste Import

Die Werkzeugleiste „Import“ ist standardmäßig eingeblendet. Im Menü „Ansichten“ unter „Einrichten“ bietet sich im Reiter „Werkzeugleisten“ die Möglichkeit, die Werkzeugleiste „Import“ abzuwählen.

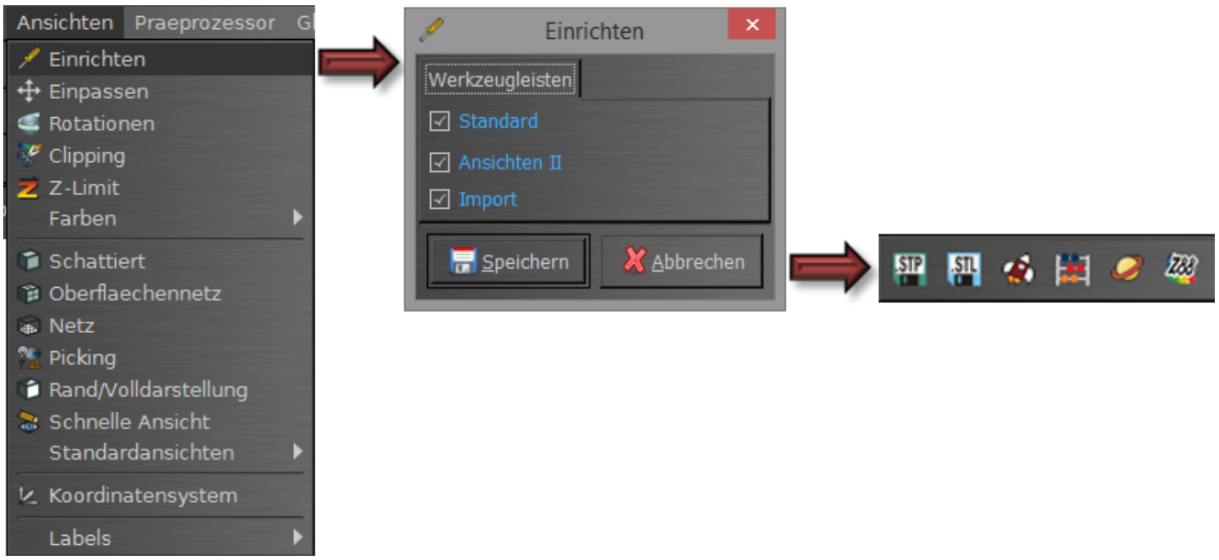


Abbildung 22: Werkzeugleiste Import

6.2 Präprozessor

Beim Klick auf das Präprozessor-Icon öffnet sich das kontextsensitive Seitenmenü „Präprozessor“ (Abbildung 23). Es kann entweder eine FE-Struktur erstellt oder eine eingeladene Geometrie vernetzt werden. Anschließend besteht die Möglichkeit, ein Material aus der Datenbank auszuwählen oder ein eigenes Material zu editieren. Im Folgenden werden alle Möglichkeiten des Präprozessors separat vorgestellt.

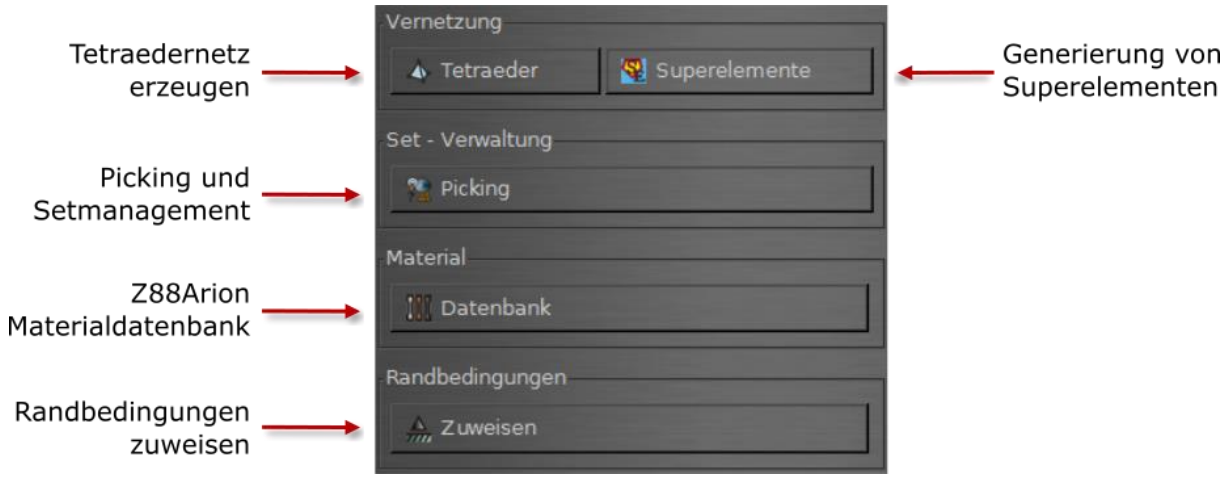


Abbildung 23: Seitenmenü „Präprozessor“

6.2.1 Präprozessor in der Textmenüleiste

Auf alle Funktionen des Präprozessors kann über die Textmenüleiste zugegriffen werden.

Abbildung 24: Textmenüleiste „Praeprozessor“

6.2.2 Picking

In Z88Arion besteht die Möglichkeit, in der grafischen Benutzeroberfläche Randbedingungen wie Kräfte, Drücke und Verschiebungen aufzubringen. Dafür wird das sogenannte „Picking“ verwendet. Für das Picking gibt es eine separate

Ansicht, die Sie im Hauptfenster durch Klicken auf den Button einblenden können.

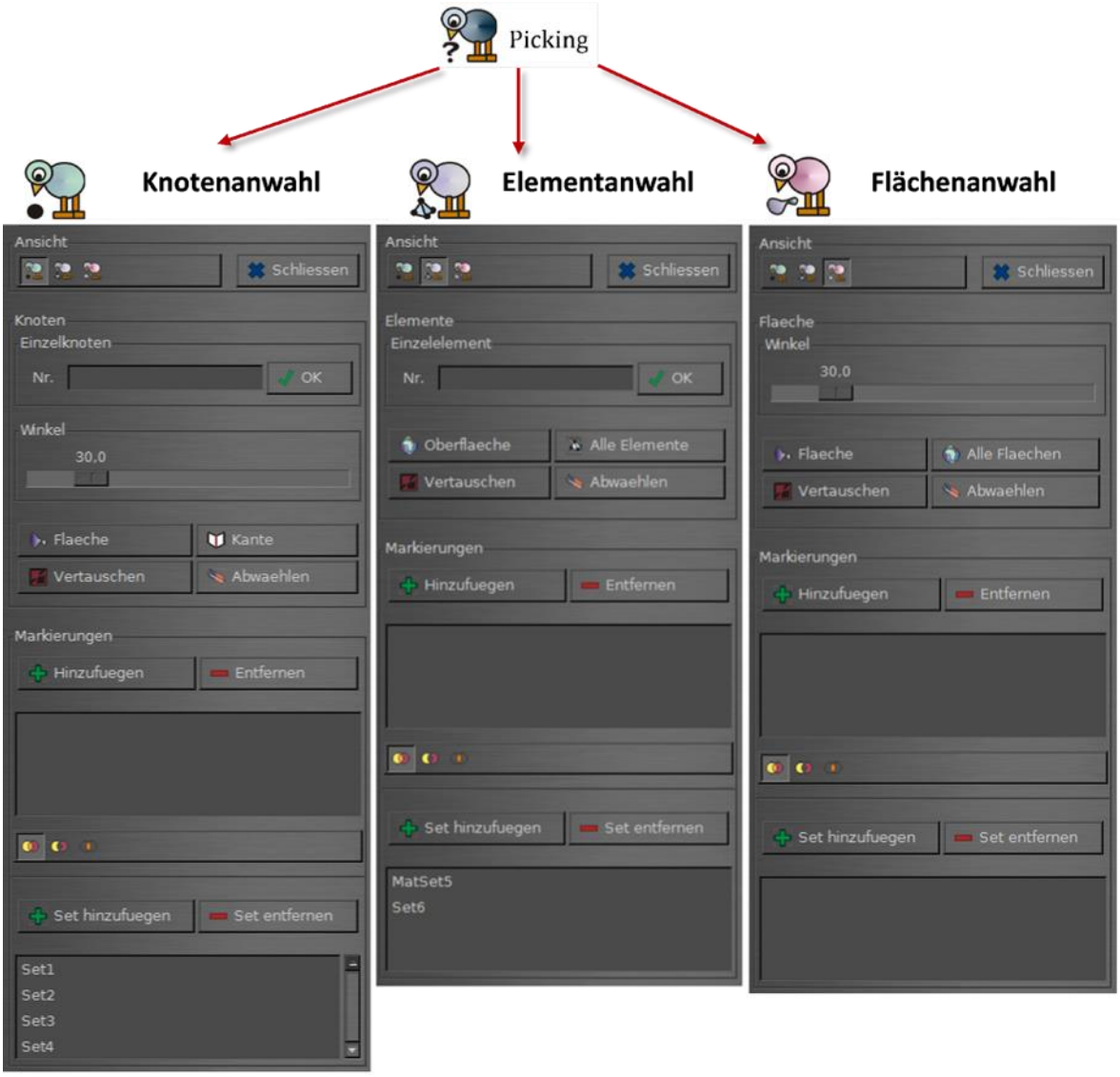


Abbildung 25: Pickingoptionen in Z88Arion

Um die Geschwindigkeit der Pickingdarstellung großer Bauteile zu verbessern, kann die Rand/Voll-Darstellung aktiviert werden. Ist diese aktiviert, kann jedoch nur die Oberfläche des Bauteils angewählt werden. Ansonsten können auch Knoten im Bauteilinneren selektiert werden.

Die Pickingdarstellung ist von der vorher gewählten Darstellung abhängig. So können entweder alle Knoten oder nur Oberflächenknoten gepickt werden!

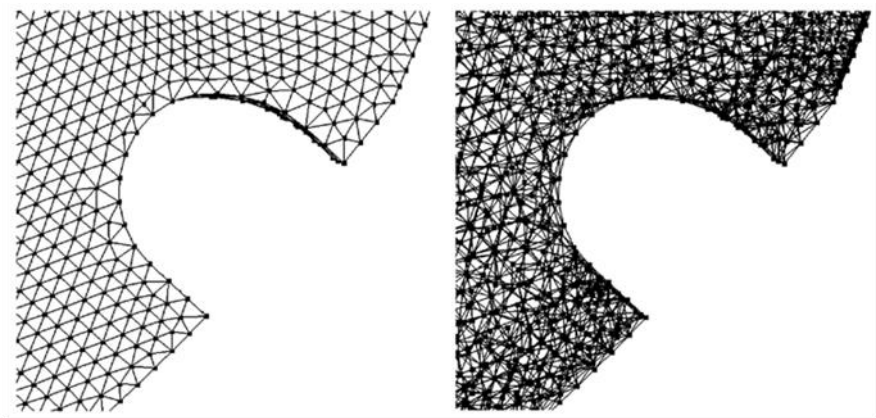


Abbildung 26: Wechsel zur Darstellungsoption „Picking“, links Oberfläche, rechts alle Knoten

Tastenkombinationen

Mit Hilfe der Maus und einiger weniger Tastaturkürzel ist es möglich, einzelne oder mehrere Knoten, Elemente oder Flächen „anzupicken“, um die gewünschten Randbedingungen zu definieren. Diese werden nachfolgend als „Picking-Elemente“ bezeichnet.

Strg + *(klicken)*	Auswahl einzelner Picking-Elemente.
Alt + *(halten)*	Neue Auswahl mehrerer Picking-Elemente in einem rechteckigen Fenster und gleichzeitiges Verwerfen der vorangegangenen Auswahl.
Alt + ⇧ + *(halten)*	Zusätzliche Auswahl mehrerer Picking-Elemente in einem rechteckigen Fenster, unter Beibehaltung der vorangegangenen Auswahl.
⇧ + *(halten)*	Aufziehen eines rechteckigen Fensters zur Abwahl mehrerer Picking-Elemente in einem Bereich.

Dabei sind die jeweiligen Knoten, Elemente oder Flächen durch kleine schwarze Rechtecke gekennzeichnet. Die Anwahl erfolgt durch die Tastenkombinationen und direktes Klicken auf die Rechtecke.

6.2.3 Knotenpicking

Das Knotenpicking enthält folgende Funktionen:

- Einzelknoten
- Flaeche
- Kante

- Vertauschen
- Abwaehlen

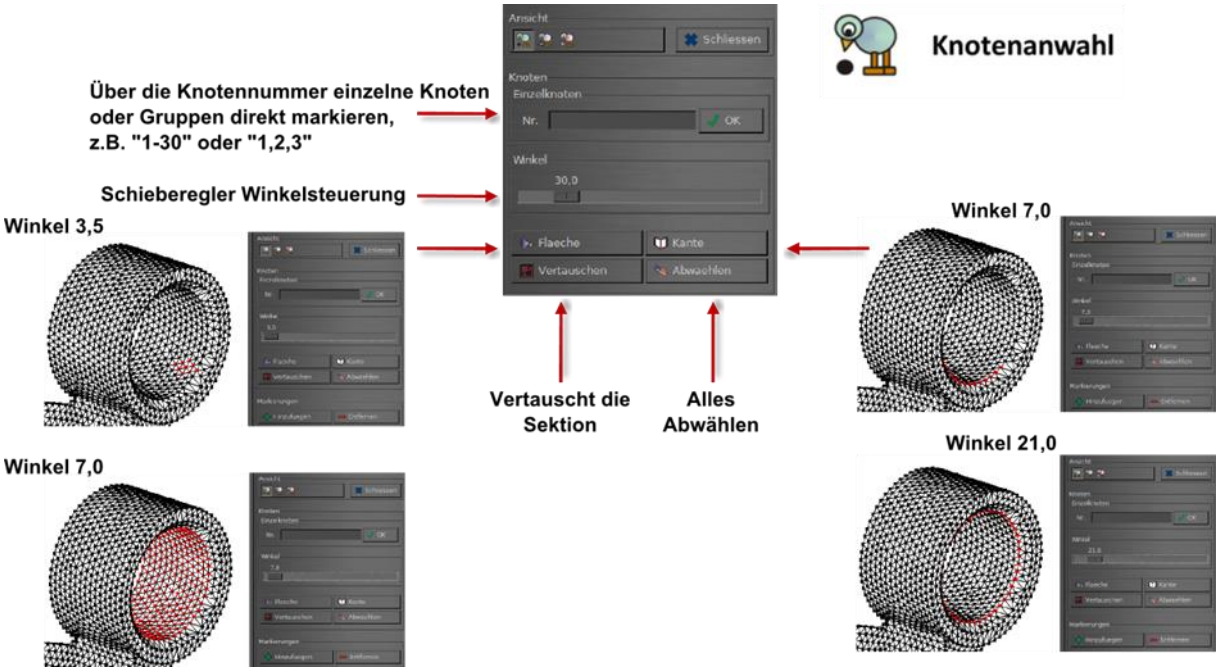


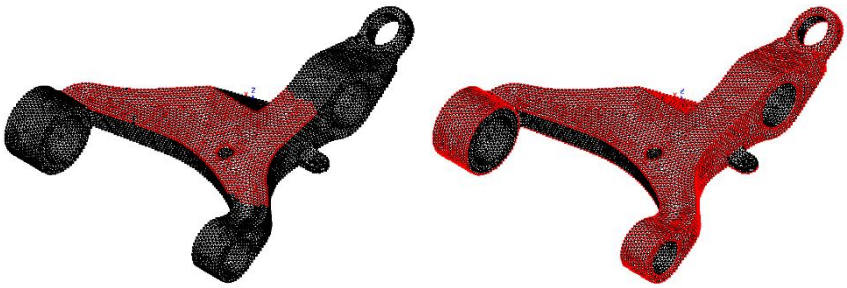
Abbildung 27: Knotenpicking: Flächen wählen (links); Kanten wählen (rechts)

Einzelknoten: Es können sowohl einzelne Knoten sowie zusammenhängende Bereiche über Nummern markiert werden.

Flaeche: Wenn Sie z. B. die Bohrungsinnenfläche für die Aufgabe von Randbedingungen wählen wollen, können Sie die Funktion „Flaeche“ nutzen. Picken Sie mit Strg + *(klicken)* einen Knoten an. Mit dem Schieberegler kann ein Winkel vorgegeben werden, der die Selektion beeinflusst. Der Zahlenwert beschreibt den Winkel zwischen den Normalen der Flächen des Elements, auf dem der angewählte Knoten liegt und der benachbarten Elemente. Ist der Wert kleiner oder gleich dem Eingestellten, werden die Knoten der jeweiligen Elemente ausgewählt.

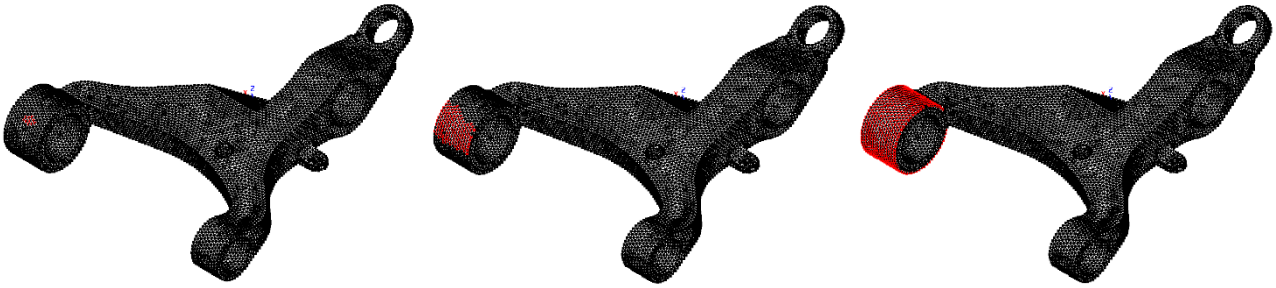
Um die passenden Einstellungen für Ihre gewünschte Fläche herauszufinden, müssen Sie unter Umständen mehrere Werte durchprobieren, bis Sie das gewünschte Ergebnis erzielen. Als Richtwerte gelten die Einstellungen in Abbildung 28.

Gewählter Knoten auf ebener Fläche



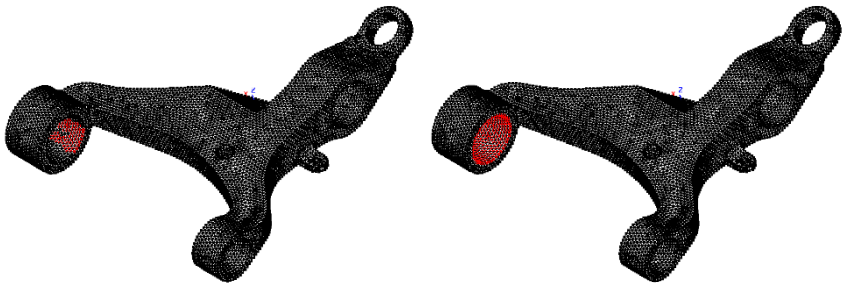
Winkel 1° Winkel 40°

Gewählter Knoten auf gekrümmter Fläche



Winkel 2° Winkel 3° Winkel 4°

Gewählter Knoten in Bohrung



Winkel 4° Winkel 9°

Abbildung 28: Winkeleinstellungen

⚠ **Nur die Anwahl von Eckknoten ist zulässig!**

Kante: Eine Gruppe von nebeneinanderliegenden Knoten, die entlang einer Kante eines FE-Modells verlaufen, können durch die Option „Kante“ gewählt werden. Durch diese Pickingoption wird es beispielsweise ermöglicht, Kanten von Bohrungen oder umlaufende Kanten eines Profils zu wählen. Es muss jeweils ein Knoten der Kante gewählt werden. Durch die Winkelsteuerung kann auch ein Teil der Kante selektiert werden.

Vertauschen: Durch „Vertauschen“ wird die Selektion invertiert.

Abwaehlen: Abwählen der zuvor markierten Bereiche.

6.2.4 Elementpicking

Das Elementpicking enthält folgende Funktionen:

- Oberflaeche
- Alle Elemente
- Vertauschen
- Abwaehlen

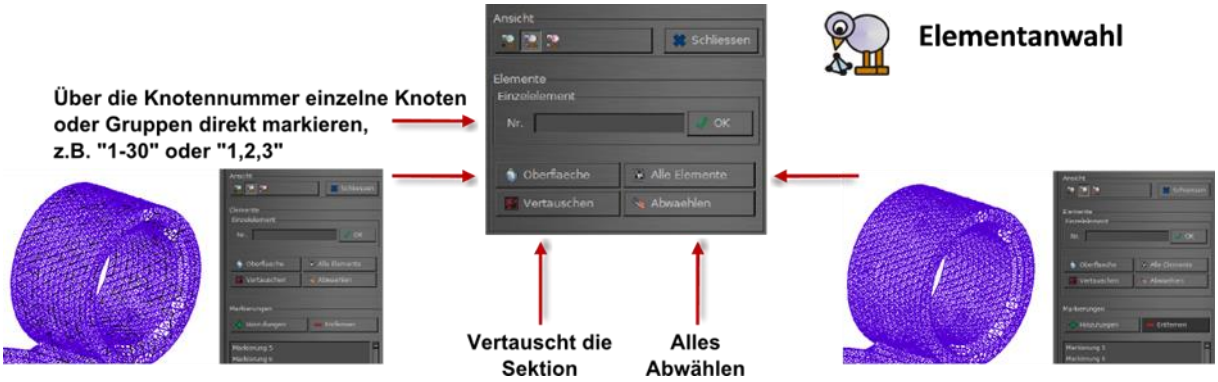


Abbildung 29: Elementpicking

Unter Umständen kann es nötig sein, Elementen verschiedene Materialwerte zuzuweisen. Dies ist mit dem Elementpicking über die normalen Pickingoptionen und das Elementpicking möglich.

6.2.5 Flächenpicking

Das Flächenpicking enthält folgende Funktionen:

- Flaeche
- Kante
- Vertauschen
- Abwaehlen

Abbildung 30: Flächenpicking

Die Funktion „Flaeche“ funktioniert analog zum Knotenpicking. Es können jeweils Bauteiloberflächen gewählt werden. Picken Sie mit Strg + *(klicken)* eine Flächenmarkierung und wählen Sie „Flaeche“. Mit „Alle Flaechen“ kann die gesamte Oberfläche ausgewählt werden.

6.2.6 Übersicht der Pickingoptionen und der Anwendungsbereiche

Knotenanwahl	Elementanwahl	Flächenanwahl
Randbedingungen, Fix-Sets	Tetraederverfeinerer	Druck Tetraeder, Hexader
	Materialzuweisung	
	Lokale Vernetzung Hexaedervernetzer	

Abbildung 31: Anwendungsbereiche der Pickingoptionen

6.2.7 Setmanagement

Jede Auswahl, die über die Picking-Menüs getroffen wurden, kann als Markierung gespeichert werden. Dazu einfach bei der gewünschten Auswahl auf „Hinzufuegen“ klicken. Die Markierungen dienen als Basis für die Sets mit Randbedingungen, Materialzuweisungen, Fix-Sets, Tetraederverfeinerungen oder Darstellungsoptionen. Mit Hilfe der Booleschen Operationen können verschiedene Markierungen addiert, verschnitten oder getrimmt werden. Dazu werden die beiden zu bearbeitenden Markierungen bei gehaltener Strg + ausgewählt. Wenn das gewünschte Ergebnis erreicht ist, ebenfalls wieder auf „Set hinzufuegen“ klicken.

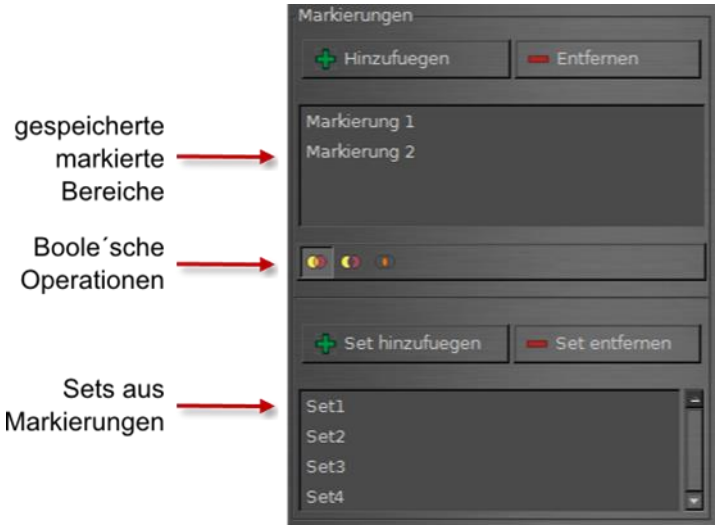


Abbildung 32: Markierungen und Sets im Pickingmenü

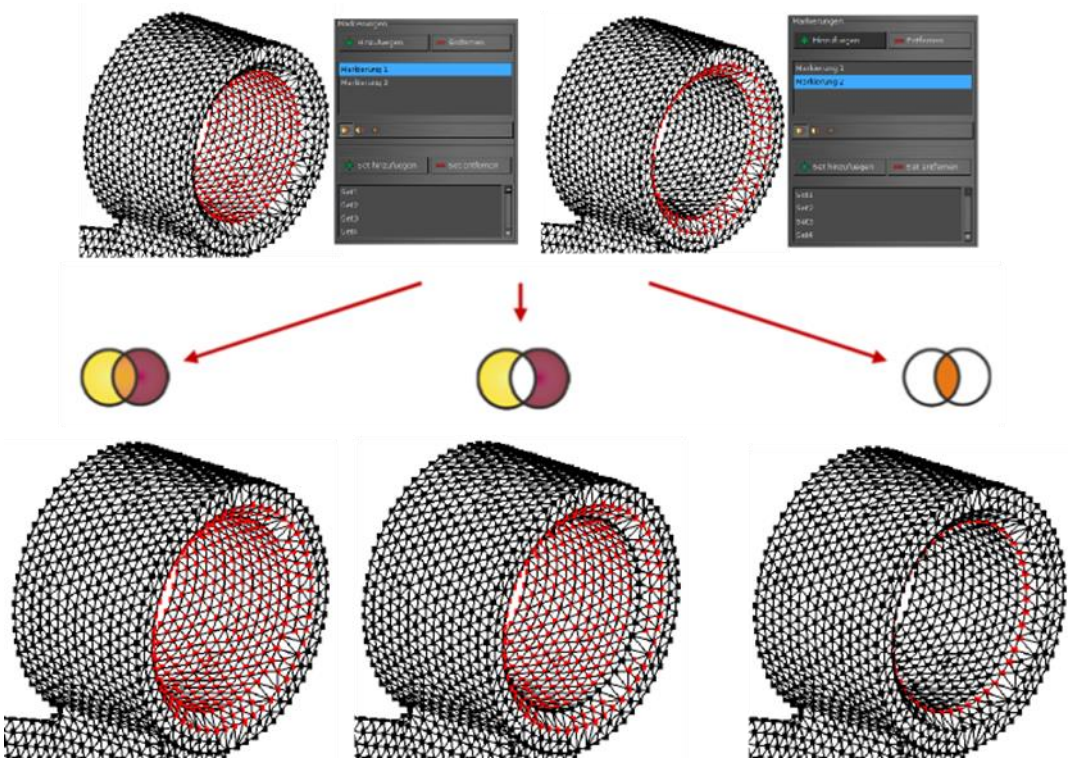


Abbildung 33: Boolesche Operationen zum Anlegen von Sets aus der Kombination verschiedener Markierungen

6.2.8 Vernetzung

Sie haben drei Möglichkeiten, in Z88Arion Strukturen zu vernetzen. Einerseits kann ein Kontinuum mit dem Netzgenerator Z88N über den Zwischenschritt der Superelementerzeugung zu diversen FE-Strukturen vernetzt werden, andererseits sind zwei Open-Source-Freemesher, TetGen und NETGEN, zur Erzeugung von Tetraedernetzen in Z88Arion integriert.

6.2.9 Tetraedernetz erzeugen

Nach dem Import einer Geometriestruktur via *.STEP oder *.STL kann die Struktur mit linearen Tetraedern vernetzt werden. Es stehen zwei Open-Source-Vernetzer zur Verfügung:

- TetGen wurde von Dr. Hang Si der Forschungsgruppe "Numerische Mathematik und Wissenschaftliches Rechnen" des Weierstraß-Instituts für Angewandte Analysis und Stochastik in Berlin entwickelt.
- NETGEN wurde hauptsächlich von Prof. Joachim Schöberl (Institut für Analysis und Scientific Computing an der Technischen Universität Wien, Forschungsgruppe Computational Mathematics in Engineering) im Rahmen der Projekte „Numerical and Symbolic Scientific Computing“ und dem Start Project „hp-FEM“ entwickelt.

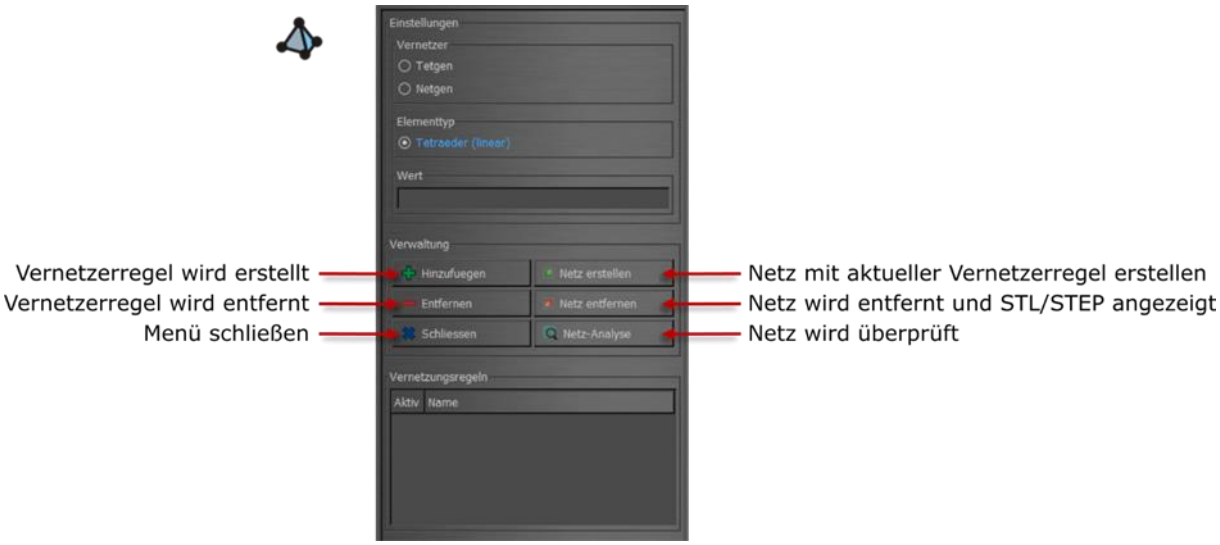


Abbildung 34: Erzeugung von Tetraedernetzen und Optionen TetGen/NETGEN

- TetGen oder NETGEN auswählen
    - Netzfeinheit und Elementtyp festlegen (die Wertangabe entspricht der mittleren Kantenlänge in der jeweilig verwendeten Längeneinheit)

- auf Hinzufuegen klicken (die Vernetzerregel wird erstellt) Die Vernetzerregel kann jederzeit wieder angesehen werden.
- danach entweder Netz erstellen oder eine weitere Vernetzerregel anlegen
- mit Schliessen das Tetraedermenü verlassen

Angezeigt wird jeweils das zuletzt erzeugte Netz; wenn zu einem vorher erzeugten Netz zurückgekehrt werden soll, dann die entsprechende Vernetzerregel aufrufen und die Vernetzung erneut durchführen.

Je nach Vernetzer nimmt die Netzerstellung einige Zeit in Anspruch, bitte beachten Sie das Infofeld „Vernetzung“ und die Statusanzeige! Wählen Sie eine Netzfeinheit, die ihrem Bauteil angemessen ist!

6.2.10 Netzcheck

Als zusätzliche Funktionen bietet das Tetraedervernetzermenü die Funktion „Netzcheck“ zur Rechenbarkeit importierter oder selbst erstellter Netze. Bitte beachten Sie, dass die Ergebnisse der FE-Berechnung nur bei ausreichend gutem Netz plausibel sind. Führen Sie deshalb am Ende der Vernetzung möglichst immer eine Rechenbarkeitsabfrage des Netzes durch. Wenn das Netz fehlerhaft ist, wird im Anschluss an die Meldung das fehlerhafte Element im Drahtgittermodus rot dargestellt. Zusätzlich wird die Datei Z88DET.TXT im Projektverzeichnis erzeugt.

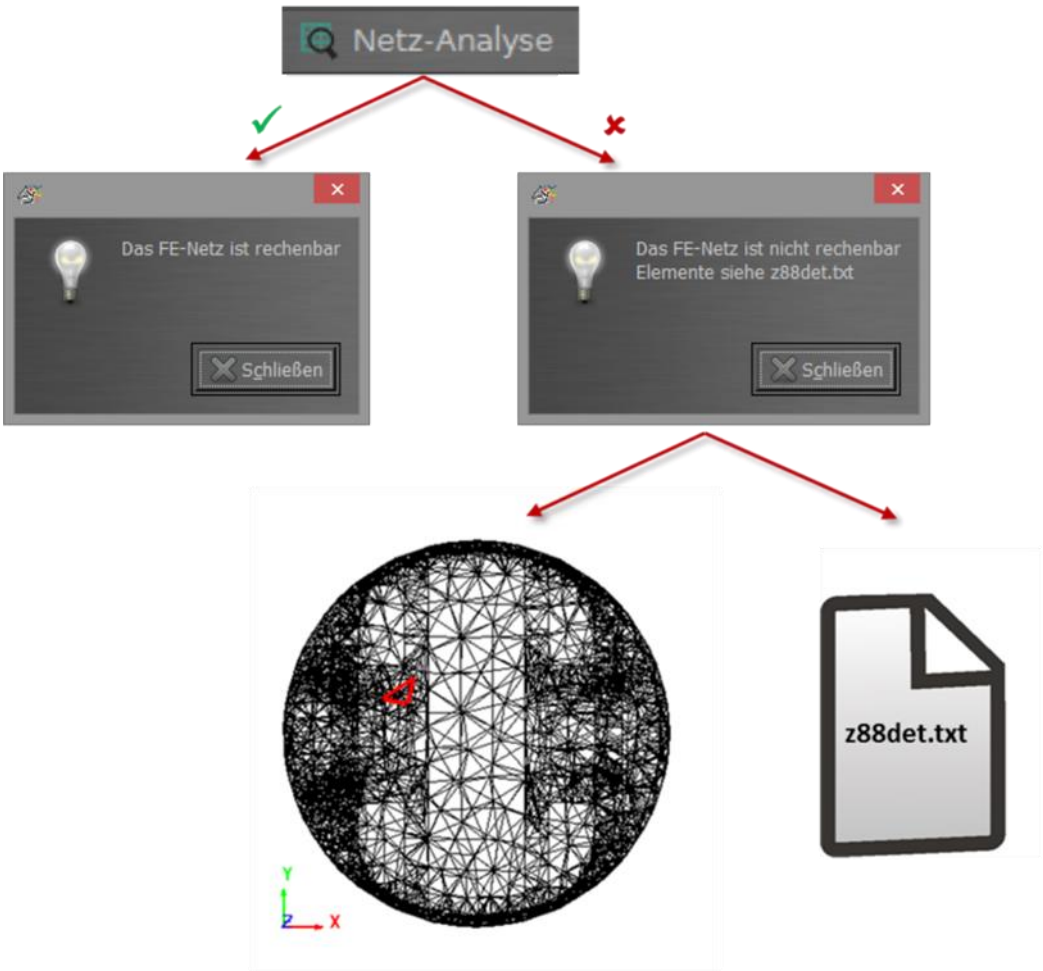


Abbildung 35: Netzcheck

6.2.11 Generierung von Superelementen / Netzgenerator Z88N

Der Netzgenerator Z88N aus Z88 ist mit einer erweiterten Funktionalität in Z88Arion integriert:

- Tetraederverfeinerer für Tetraeder

Er wird im Präprozessormenü über das Icon Superelemente aufgerufen.

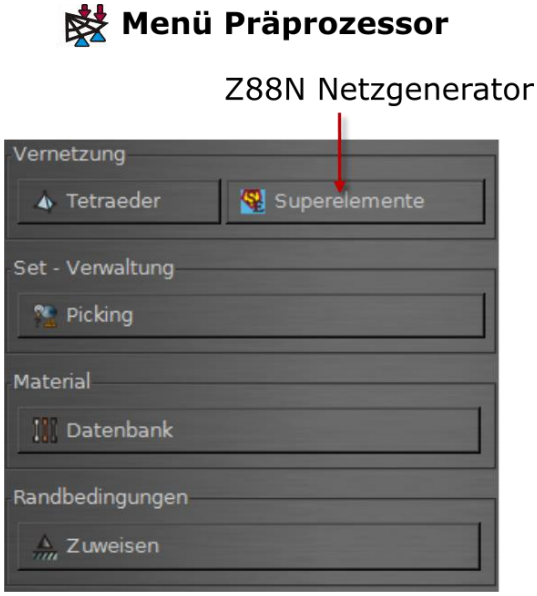


Abbildung 36: Menü „Präprozessor“ mit Starticon „Superelemente“ des Netzgenerators Z88N

Verwendung von Z88N in Z88Arion

Der Netzgenerator kann aus einer Finite-Elemente-Superstruktur eine verfeinerte Struktur erzeugen. Hierbei wird der Elementtyp 1 (Hexaeder mit 8 Knoten) unterstützt.

In alle Raumrichtungen kann eine Superelementstruktur gleichmäßig, absteigend oder aufsteigend verfeinert werden. Hierzu können zunächst Elementsets angelegt werden, dann die Vernetzerregeln definiert und anschließend vernetzt werden.

Beispielsweise:

- 3 Elementsets anlegen, in Superelemente wechseln
    - Elementtyp festlegen

- Lokale X-Richtung: Unterteilung gleichmäßig (Aequid.), absteigend (Abst.) oder aufsteigend (Aufst.) auswählen und Verfeinerungswert eingeben
- Lokale Y-Richtung: Unterteilung gleichmäßig (Aequid.), absteigend (Abst.) oder aufsteigend (Aufst.) auswählen und Verfeinerungswert eingeben
- Lokale Z-Richtung: Unterteilung gleichmäßig (Aequid.), absteigend (Abst.) oder aufsteigend (Aufst.) auswählen und Verfeinerungswert eingeben
- Auf Hinzufuegen klicken (die Vernetzerregel wird erstellt). Die Vernetzerregel kann jederzeit wieder angesehen werden.
- Danach entweder Netz erstellen oder eine weitere Vernetzerregel verfassen. Pro Set kann nur eine Vernetzerregel definiert werden!
- Mit Schliessen das Menü verlassen

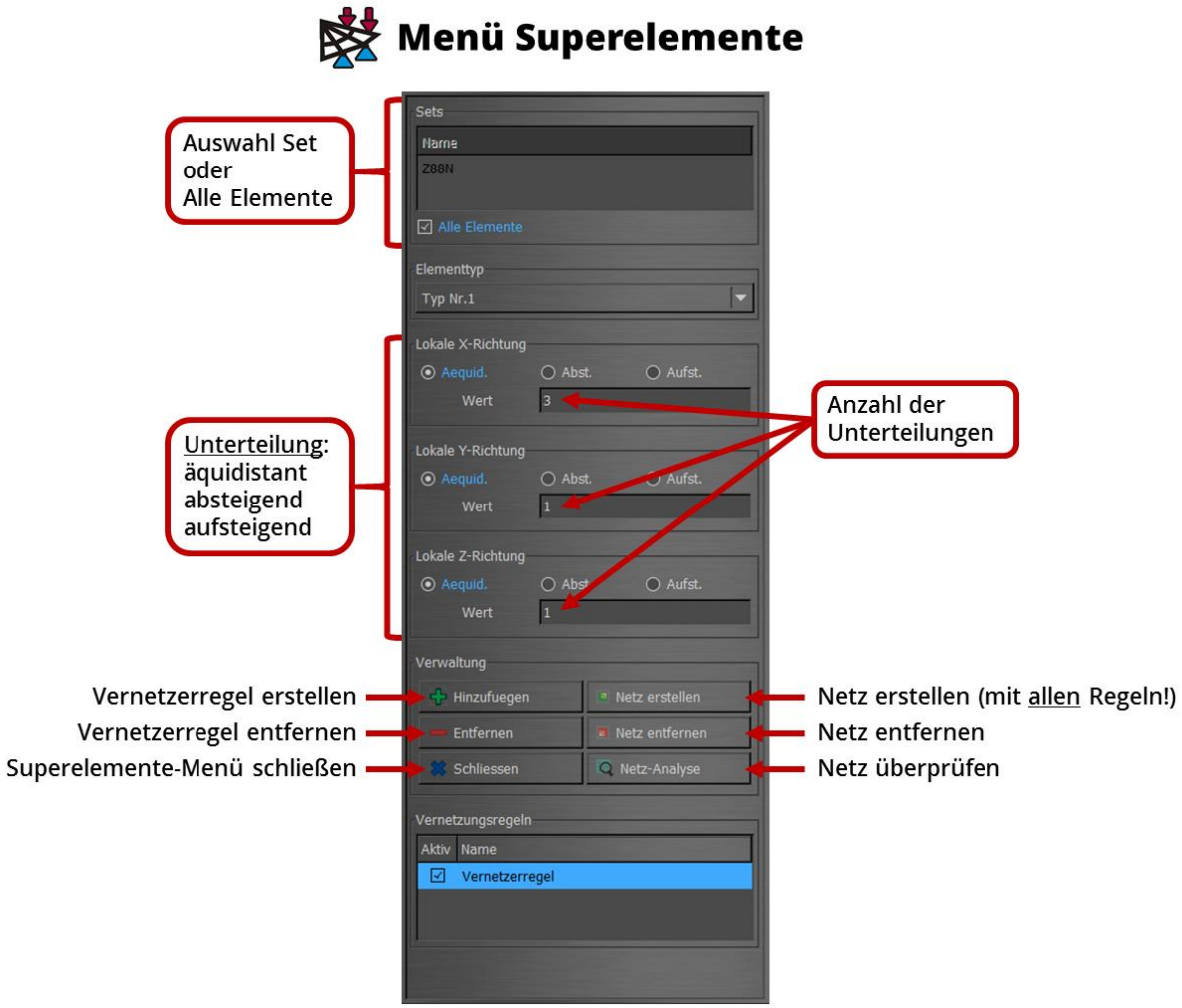


Abbildung 37: Menü „Superelemente“ des Netzgenerators Z88N

⚠ Nach der Netzerstellung werden die Vernetzerregeln gelöscht!

Tetraederverfeinerer

Mit dieser Funktionalität ist es möglich, bestehende Tetraedernetze zu verfeinern. Mittels Picking kann ein Elementset mit denjenigen Tetraedern angelegt werden, welche verfeinert werden sollen. Die Unterteilung jedes Elementes erfolgt in 8 Tetraeder.

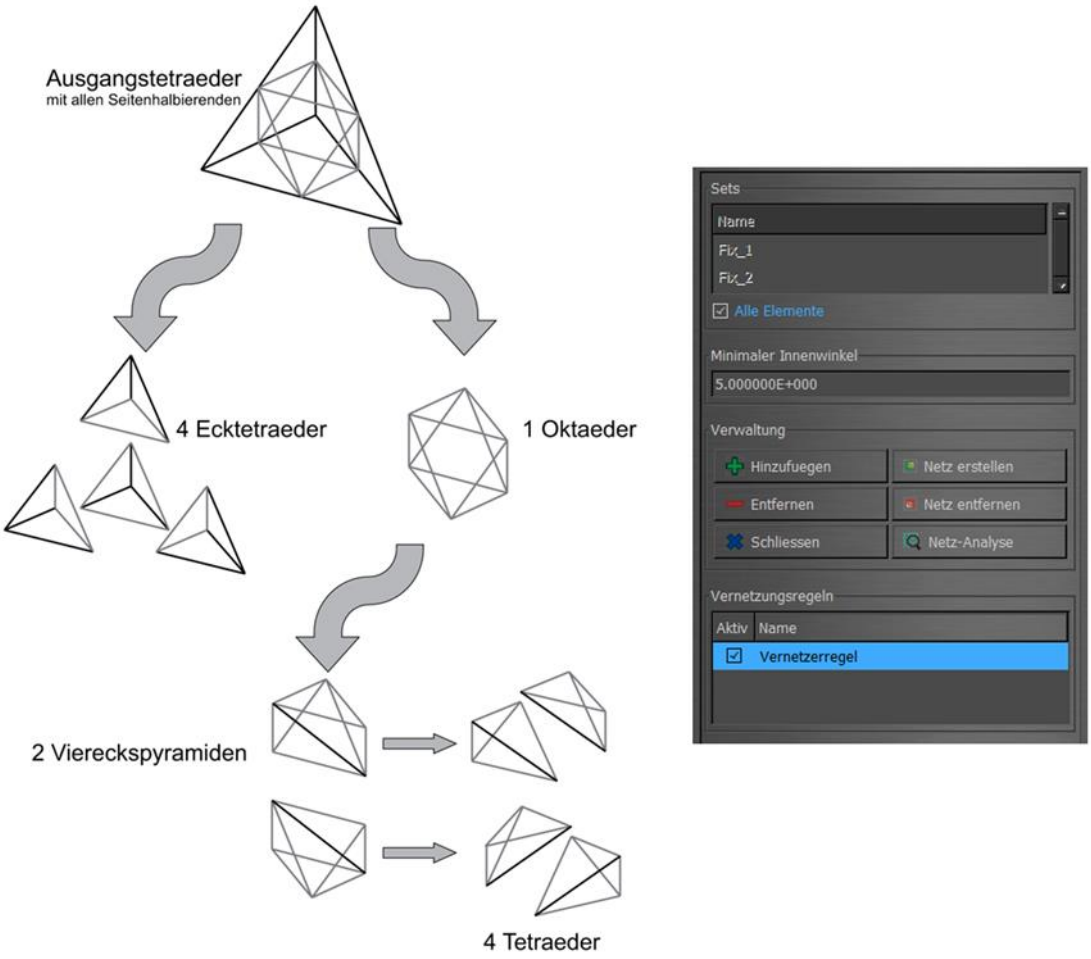


Abbildung 38: Eingabemaske Tetraederverfeinerer (rechts); Ablauf der Tetraederverfeinerung (links)

Die angrenzenden Elemente werden anschließend an die veränderte Knotenanzahl angepasst und ebenfalls zergliedert. Hierbei ist ein minimaler Elementwinkel anzugeben, um einer zu starken Verzerrung vorzubeugen. Statt des idealen Innenwinkels von 60° ist bei einer FE-Vernetzung eine Vorgabe des Winkels zwischen 3-10° realistisch.

In Abbildung 39 ist die Verfeinerung von 2 Dreiecken dargestellt. In Schritt 2 werden die Dreiecke unterteilt und in Schritt 3 die Nachbarelemente angepasst, um die Konsistenz des Netzes wieder herzustellen. Treten zu kleine Innenwinkel auf (Pfeil), wird der Vorgang wiederholt, bis alle Winkel über dem angegebenen Wert liegen.

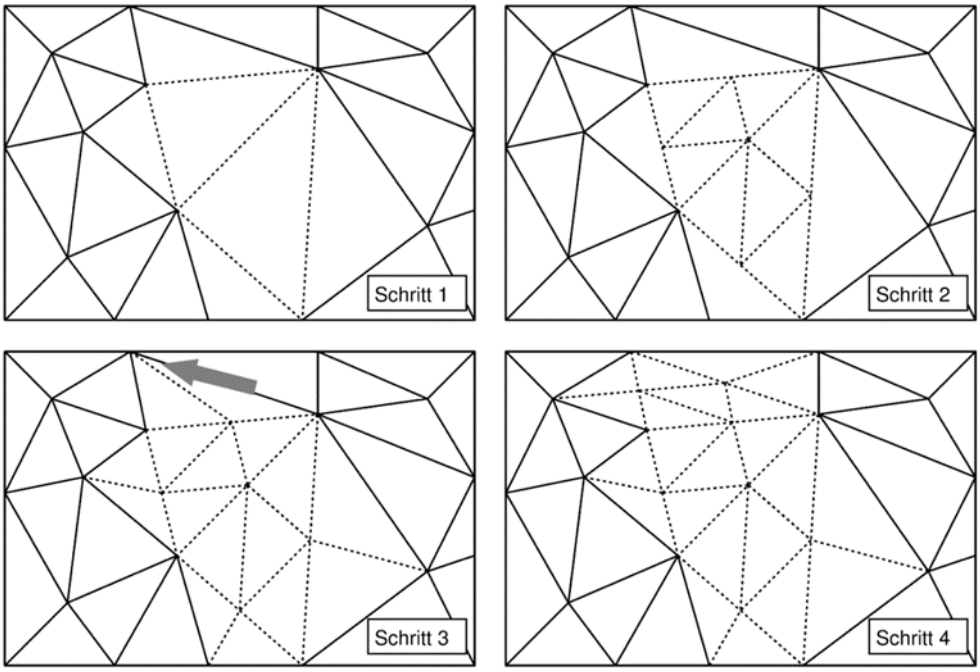


Abbildung 39: Verlauf des Verfeinerungsalgorithmus mit Winkelkriterium

6.2.12 Z88Arion Materialdatenbank

Die Materialdatenbank mit über 50 gängigen Konstruktionswerkstoffen von Z88Arion wird im Präprozessormenü über den Button aufgerufen (bzw. über „Praeprozessor → Material → Datenbank“). Um Ihnen die Arbeit mit Z88Arion zu erleichtern, wurden bereits mehrere Materialien, wie diverse Stahl- und Aluminiumsorten, vordefiniert.

Wenn Sie links einen Werkstoff aus der Liste anwählen, können die Eigenschaften über „Details“ betrachtet werden (Abbildung 40). Wenn ein Material bezüglich der Eigenschaften angepasst werden soll, wird eine Kopie des Materials angelegt, da sonst die interne Datenbank nicht konsistent gehalten werden kann. Bestehende Materialien aus älteren Projekten können importiert werden.

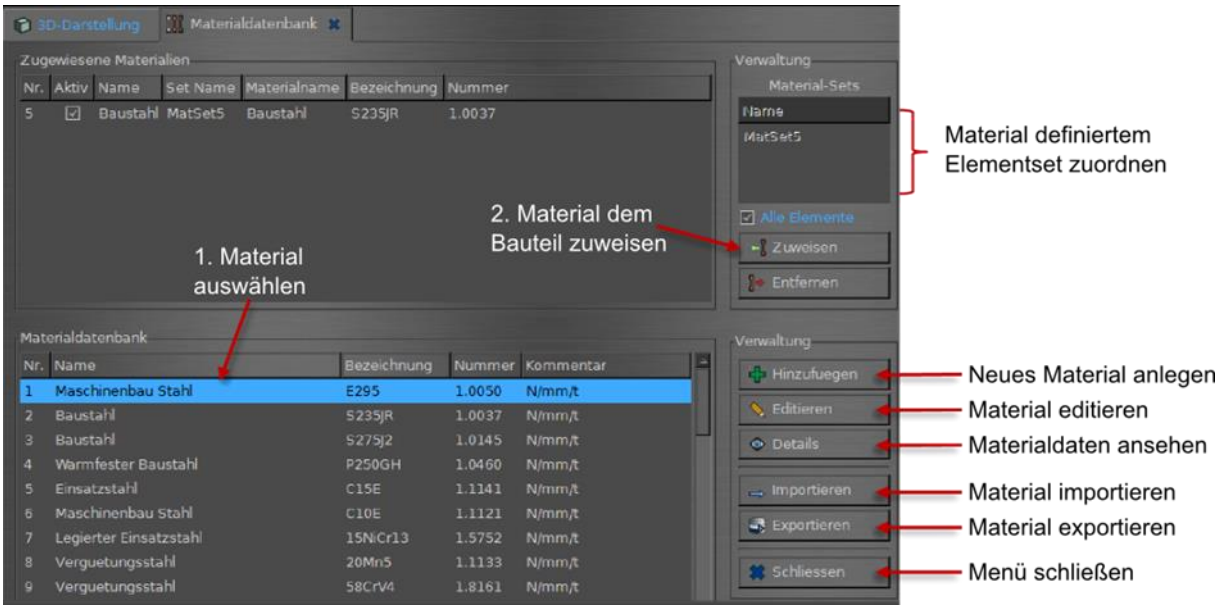


Abbildung 40: Z88Arion Materialdatenbank

Sollte der benötigte Werkstoff nicht enthalten sein, so haben Sie die Möglichkeit, neue Materialien in der Datenbank zu definieren. Hierzu klicken Sie im rechten Menü auf Hinzufuegen und es öffnet sich das Kontextmenü "Materialparameter" (Abbildung 41). In der ersten Eingabegruppe können Sie die Werkstoffsorte mittels "Name", "Bezeichnung" und "Nummer" definieren. In der zweiten Eingabegruppe werden die Materialeigenschaften E-Modul und Querkontraktionszahl für die Analyse eingegeben. Die Dichte (⚠ **Einheit Dichte: t/mm³**) ist für die Topologieoptimierung nicht relevant.

Abbildung 41: Kontextmenü Materialparameter I

Im Falle von unlegiertem Baustahl (nach DIN EN 10025-2) würde sich dies wie folgt gestalten:

Name:	Baustahl (Trivialname)
Bezeichnung:	S235JR
Nummer:	1.0037
Kommentar:	Eigene Kommentare, z. B. Lieferant, Einheitensystem, etc.
E-Modul:	206000
Dichte:	7.85 E-9
Querkontraktionszahl:	0.30

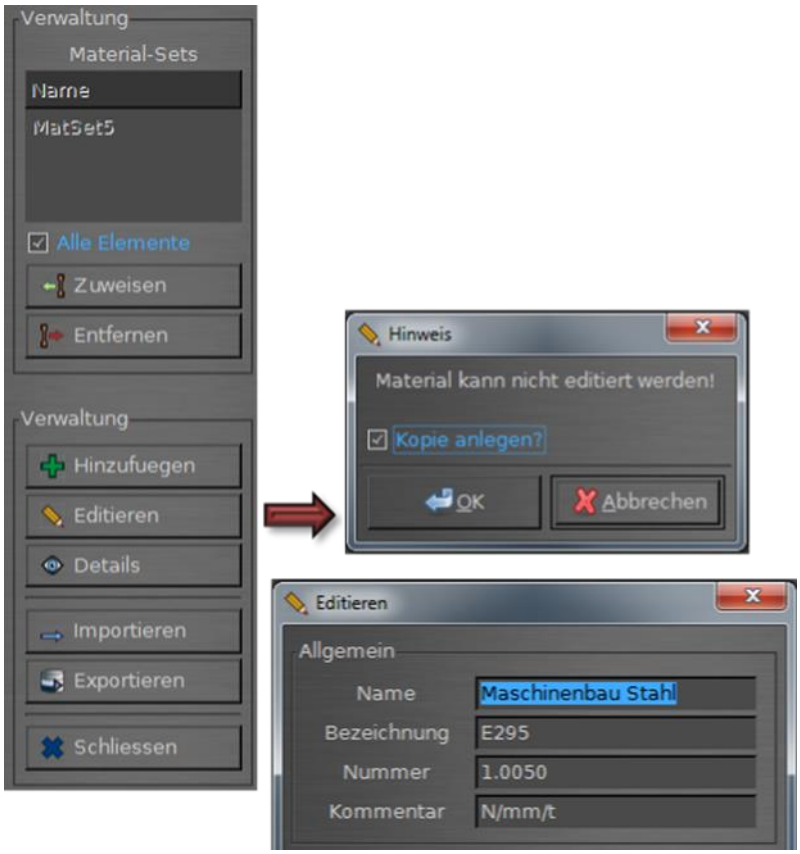


Abbildung 42: Kontextmenü Materialparameter II

Es müssen jeweils nur die für die Analyseart erforderlichen Kennwerte eingegeben werden.

⚠ Bitte beachten Sie, dass ein Punkt als Dezimaltrennzeichen eingegeben werden muss!

Mit der Schaltfläche Editieren können bereits eingegebene Werkstoffe bearbeitet werden. Hierbei wird eine Kopie des bestehenden Werkstoffs angelegt, um die Datenbank konsistent zu halten.

Mit Zuweisen wird das markierte Material dem Bauteil hinzugefügt und mit Entfernen entfernt. Wenn Sie die Materialzuweisung auf den gesamten Körper anwenden wollen, lassen Sie den Haken bei "alle Elemente" gesetzt. Andernfalls können Sie auch einzelnen Elementsets verschiedene Materialien zuweisen, beispielsweise um ein Bimetall abzubilden.

Durch Schliessen wird die Datenbank gespeichert und der Reiter geschlossen.

6.2.13 Randbedingungen aufgeben

Z88Arion bietet die Möglichkeit, alle Randbedingungen innerhalb des Präprozessors zu definieren. Vorab müssen im Pickingmenü Sets definiert werden (für weitere Hinweise konsultieren Sie bitte das Kapitel „Picking“).

Knotenanwahl	Flächenanwahl
alle mechanischen Randbedingungen und Fix-Sets	Druck für Tetraeder und Hexaeder

Abbildung 43: Pickingoptionen für Randbedingungen

Importierte Strukturen können entweder mit den bestehenden Randbedingungen in Z88Arion gerechnet werden oder es können neue Vorgaben gemacht werden. Für die importierten Randbedingungen werden automatisch Sets angelegt, die im Randbedingungsmenü betrachtet und ggf. modifiziert werden können.

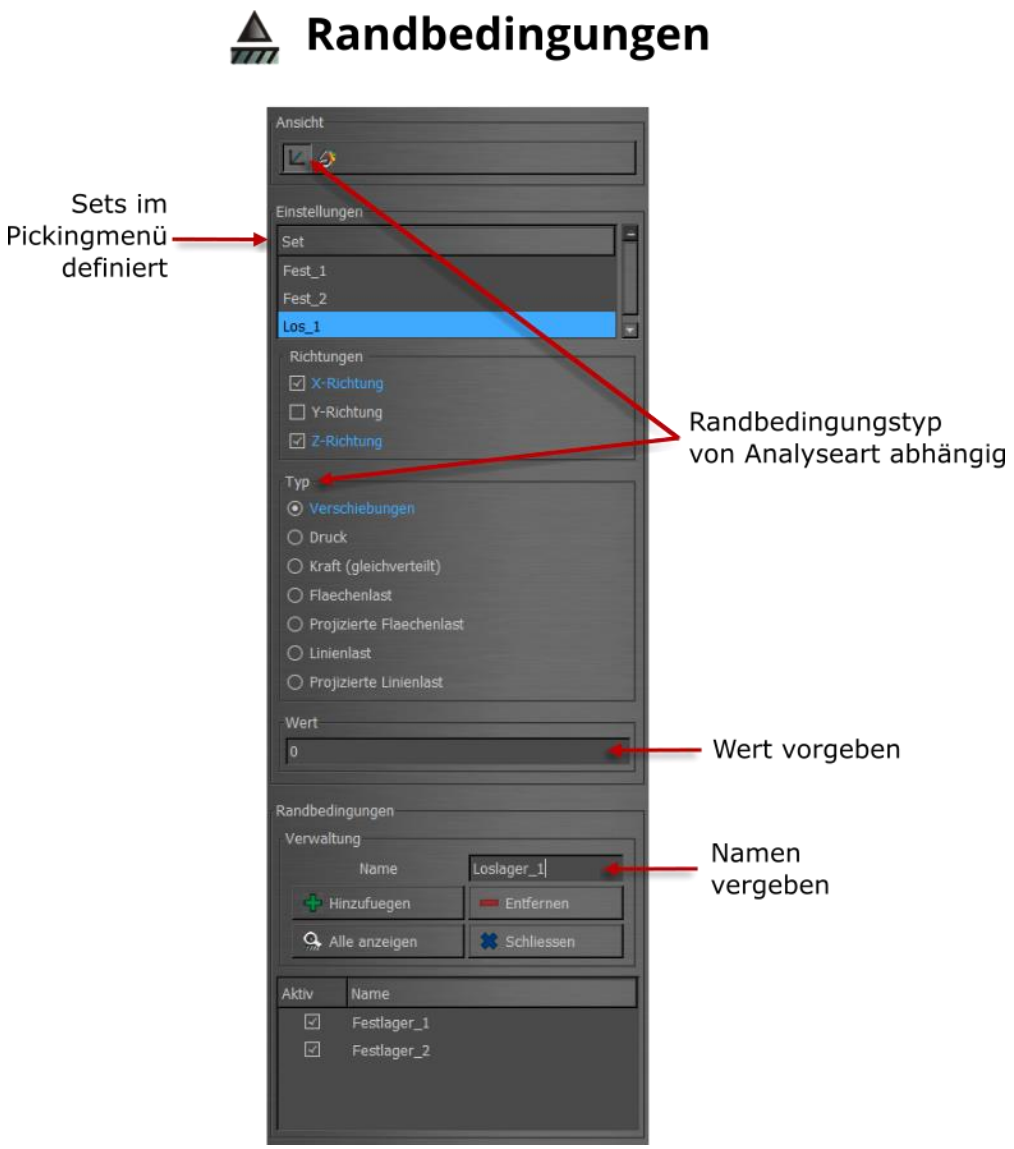
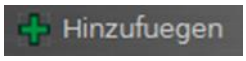


Abbildung 44: Erstellen von Randbedingungen I

Um eine Randbedingung aufzubringen, gehen Sie wie folgt vor:

- Randbedingungsart auswählen
  - Set auswählen
    - Richtungen/Rotationen markieren, z. B. „X-Richtung, Y-Richtung, Z Richtung“
  - Typ anwählen, z. B. „Verschiebungen“
  - Wert eingeben, z. B. „0“
  - Name eingeben, z. B. „fest“

- 

Im OpenGL-Fenster erscheint die Randbedingung in der jeweiligen Farbe.

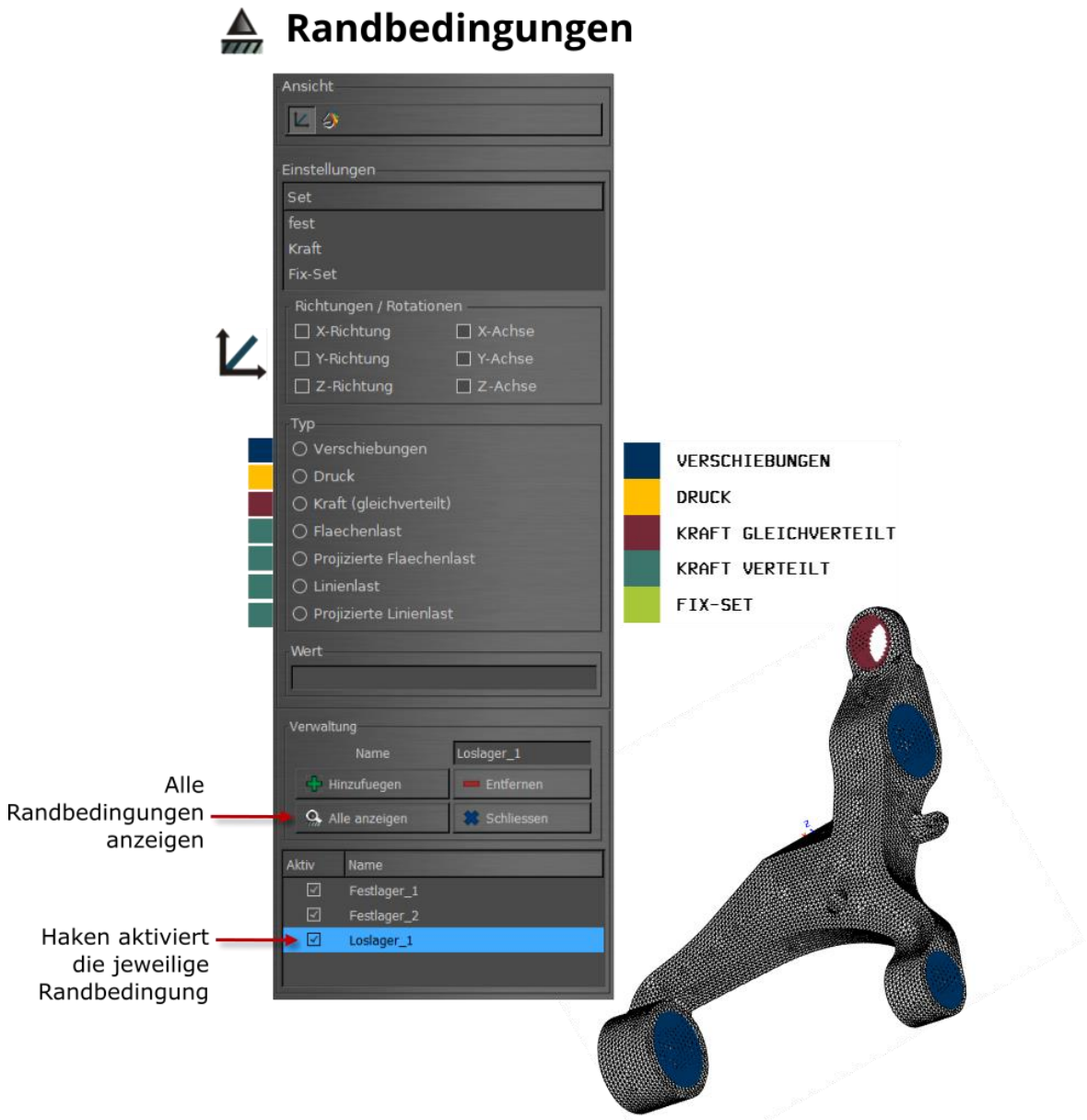


Abbildung 45: Erstellen von Randbedingungen II

Die Möglichkeiten der Randbedingungsaufgabe zeigt Abbildung 45. Es können Verschiebungen, Drücke und Kräfte aufgebracht werden, wobei bei Kräften die Auswahl zwischen gleichverteilt, Flächenlast, projizierte Flächenlast, Linienlast und projizierte Linienlast zu treffen ist. Die Option „Kraft (gleichverteilt)“ prägt die eingegebene Kraft auf jedem gewählten Knoten auf. „Flächenlast“ und „Linienlast“ erreichen eine Umrechnung der Gesamtkraft auf die einzelnen Knoten der Fläche.

⚠ Druck benötigt immer ein Flächenset.

Entfernen löscht bestehende Randbedingungen. „Alle anzeigen“ zeigt die mit Haken aktivierten Randbedingungen. Die unterschiedlichen Randbedingungen werden in einer Farbskala dargestellt.

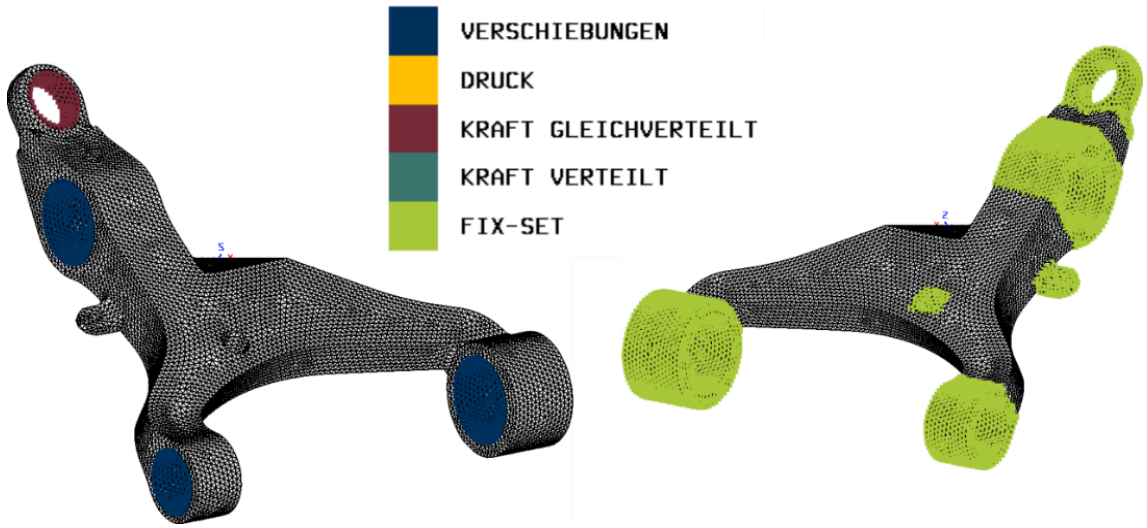


Abbildung 46: Darstellungsart „Randbedingungen“

Um einzelne Randbedingungen separat zu betrachten, kann die jeweilige Randbedingung unter „Verwaltung“ gewählt werden.

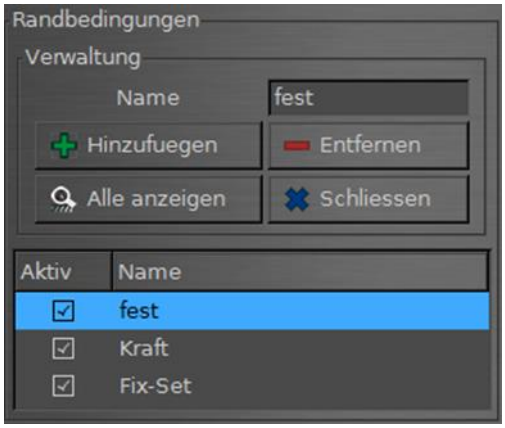


Abbildung 47: Ansicht separate Randbedingung

Durch Schliessen wird das Randbedingungsmenü geschlossen.

Zusätzlich zu den mechanischen Kraft- und Verschiebungsrandbedingungen ist bei Z88Arion die Erzeugung sogenannter Fix-Sets über das Topologie-optimierungsmenü möglich. Diese werden per Knotenset angelegt und fixieren die zu den Knoten im gewählten Set zugehörigen Elemente, so dass diese

während der Optimierung nicht verändert werden. Folglich bleibt die physikalische Dichte dieser Elemente stets bei „1“.

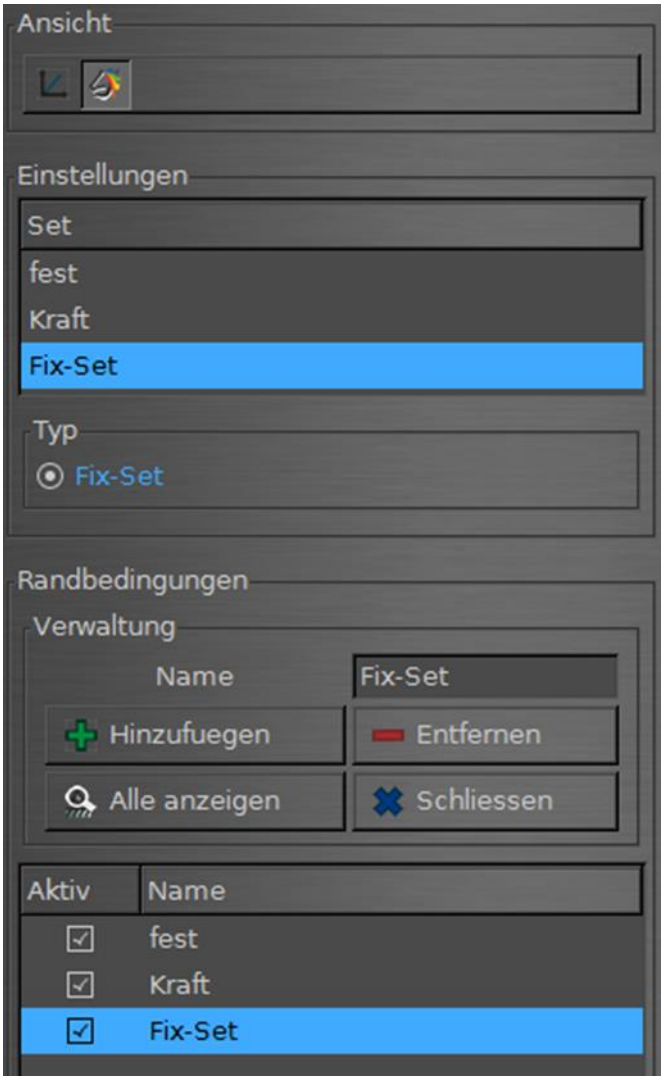


Abbildung 48: Randbedingungsauswahl Fix-Set

⚠ Bei mehreren Bereichen, die nicht optimiert werden dürfen, müssen mehrere Markierungen angelegt werden, die zu einem Fix-Set zusammengefügt werden.

⚠ Die Randbedingungsmarkierungen werden nicht mit der Größe des Bauteils skaliert. Wenn Sie aufgebrachte Randbedingungen nicht sehen, verändern Sie bitte die Größe über die Werkzeugleiste Ansicht oder den Unterpunkt „Größe Randbedingungen“, vgl. Kapitel 5.7.1.

6.3 Solver

Der Solver ist das Herz des Programmsystems. Er berechnet die Element-Steifigkeitsmatrizen, kompiliert die Gesamt-Steifigkeitsmatrix, skaliert das Gleichungssystem, löst das Gleichungssystem und gibt die Informationen über Verschiebungen und Spannungen an den Optimierungsalgorithmus, der die Bauteiltopologie nach den Ergebnissen der FEA und der Optimierungsrandbedingungen ändert.

Z88Arion verwendet zur Lösung des FE-Problems einen direkten Sparsematrix Solver mit Fill-In, der auf dem PARDISO-Solver basiert. Dieser Solver ist mehrkernfähig und somit sehr schnell, benötigt aber sehr viel dynamischen Speicher zur Laufzeit (RAM).

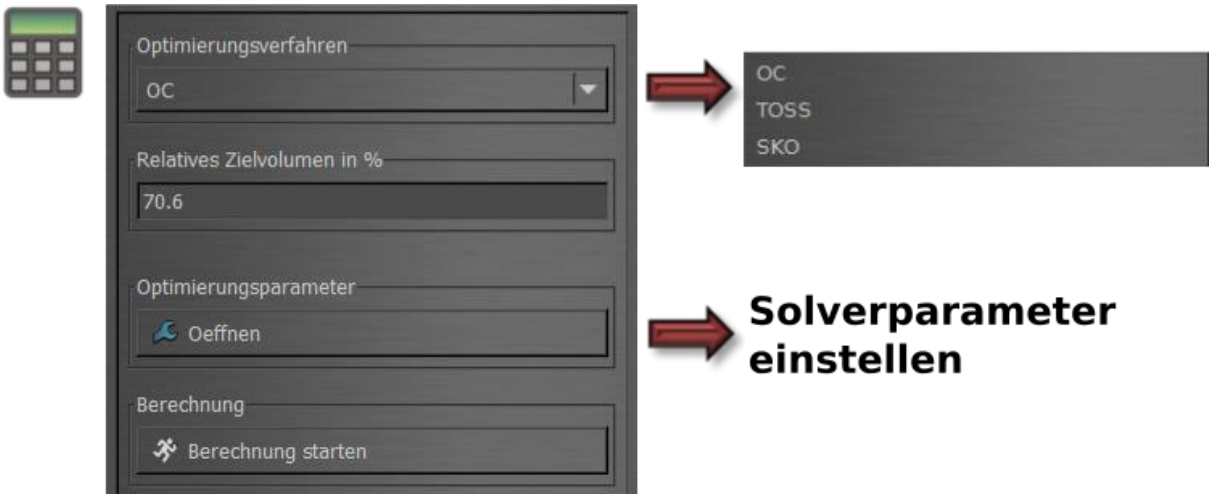


Abbildung 49: Solvermenü Z88Arion

Die Ergebnisse des FE-Gleichungslösers werden von den Optimierungs-algorithmen dazu verwendet, die Bauteiltopologie nach den Vorgaben wie beispielsweise Volumen oder Fix-Sets anzupassen. Es stehen drei Optimierungs-verfahren zur Verfügung: OC, ein Optimalitätskriterienverfahren zur Steifigkeitsoptimierung, SKO, ein Verfahren zur Festigkeitsoptimierung und TOSS, ein kombiniertes Verfahren zur Steifigkeits- und Festigkeitsoptimierung. Im Solvermenü können vom Benutzer das relative Zielvolumen (siehe Seite 7) oder erweiterte Optimierungsparameter eingestellt werden.

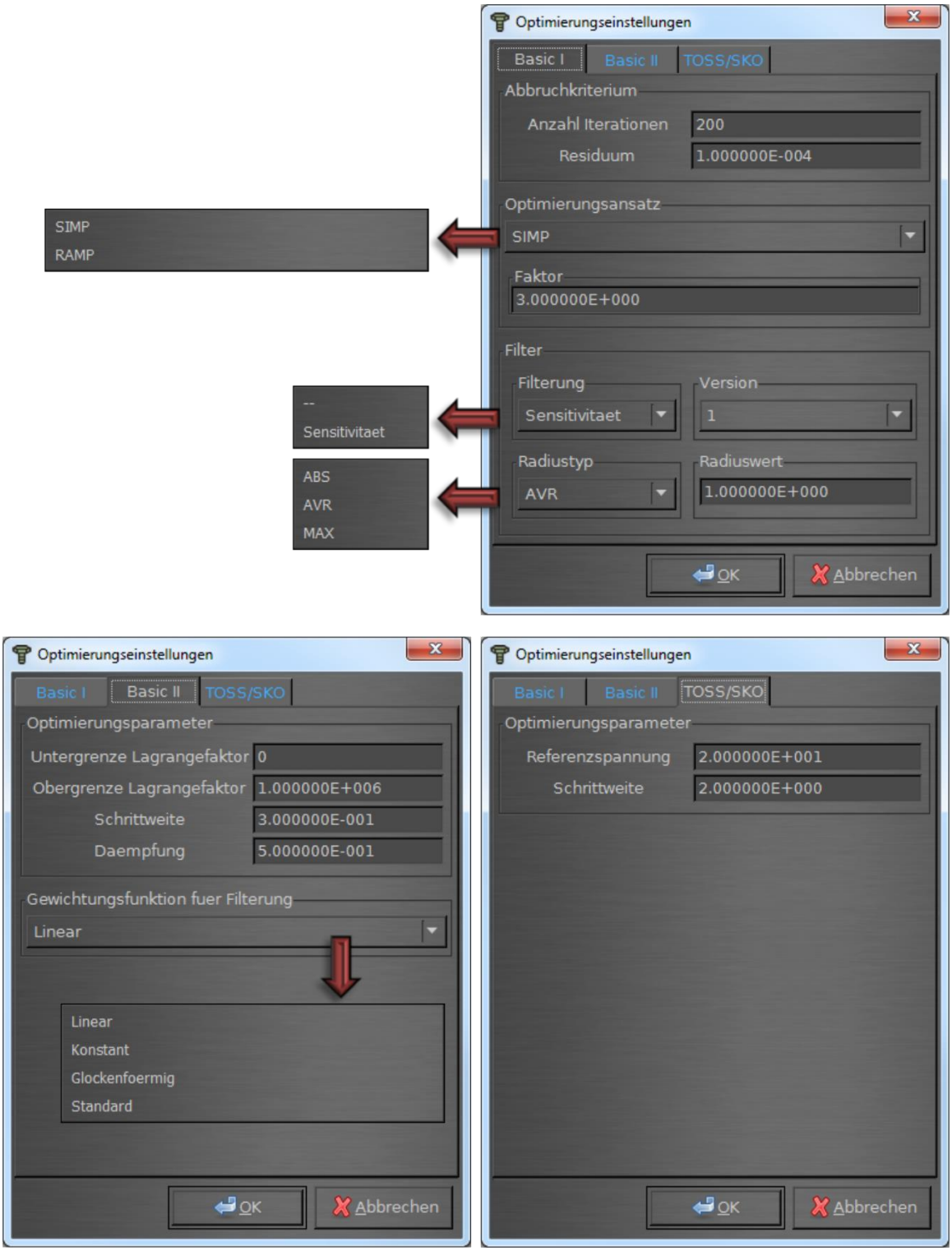


Abbildung 50: Optimierungsparameter

6.3.1 OC-Verfahren

Für das OC-Verfahren (siehe Kapitel 2 im Abschnitt Theorie) können unter dem Reiter „Basic I“ zunächst zwei Werte als Abbruchkriterien eingestellt werden. Die Anzahl der Iterationen gibt die maximale Anzahl der Optimierungsschleifen an, die durchlaufen werden. Sollte die Optimierungssoftware nach Erreichen der

Anzahl noch nicht fertig sein, wird hier abgebrochen und der bisherige Stand als Ergebnis verwendet. Das Residuum als zweites Abbruchkriterium gibt an, unter welchem Grenzwert sich die Veränderung der Designvariablen über mehrere Iterationen hinweg befinden muss, damit die Optimierung als beendet gilt.

Unter Optimierungsansatz kann zwischen SIMP und RAMP gewählt werden. Je nachdem, welcher Ansatz gewählt wurde, stellt „Faktor“ den Penalty-Faktor p (SIMP) bzw. den Faktor q (RAMP) dar.

Unter Filterung können verschiedene Versionen eines Sensitivitätsfilters gewählt werden (siehe Kapitel 5 im Abschnitt Theorie). Als Radius kann ein absoluter Wert (ABS), ein durchschnittlicher Wert (AVR) oder ein maximaler Wert (MAX) vorgegeben werden.

Unter dem Reiter „Basic II“ sind weitere Einstellmöglichkeiten enthalten, die sich auf die Langrange-Funktion bzw. das Bisektionsverfahren hinter dem OC-Verfahren auswirken. Diese Einstellungen sollten nicht verändert werden.

6.3.2 SKO-Verfahren

Für das SKO-Verfahren kann unter dem Reiter „TOSS/SKO“ die Referenzspannung und der Skalierungsfaktor eingestellt werden.

Unter dem Reiter „Basic I“ kann die maximale Anzahl der Iterationen festgelegt werden. Die weiteren Einstellungen haben keinen Einfluss auf das SKO-Verfahren.

6.3.3 TOSS-Verfahren

Beim TOSS-Verfahren (siehe Kapitel 4 im Abschnitt Theorie) können wie beim OC-Verfahren sämtliche Einstellungen im Reiter „Basic I“ (und theoretisch auch im Reiter „Basic II“) verändert werden. Sie wirken sich auf das Ergebnis aus, da das TOSS-Verfahren eine sequentielle Optimierung mit dem OC-Verfahren und dem SKO-Verfahren darstellt.

Die Einstellungen unter dem Reiter „TOSS/SKO“ beziehen sich auf das zugrunde liegende SKO-Verfahren. Hier kann die Referenzspannung und der Skalierungsfaktor eingestellt werden.

6.4 Postprozessor

Nach erfolgter Berechnung können Sie sich durch Klicken auf Postprozessor die Ergebnisse direkt in Z88Arion anzeigen lassen.

6.4.1 Iterationsauswahl

Auf der rechten Bildschirmseite erscheint ein Kontextmenü. Es besteht die Möglichkeit, die Darstellung der Optimierung anhand der Iterationsschritte, der Darstellungsgrenze und dem gewünschten Ergebnis anzupassen.

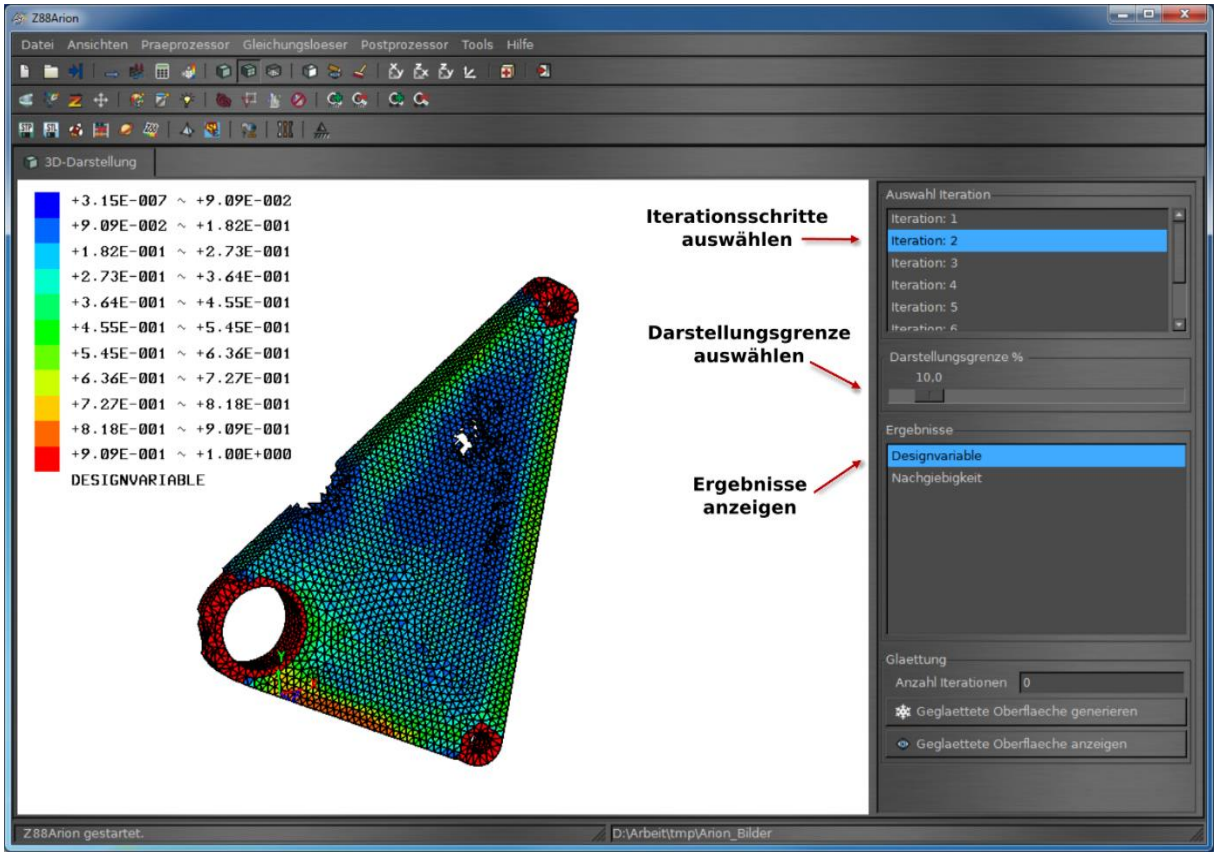


Abbildung 51: Z88Arion Postprozessor

Der Optimierungsfortschritt lässt sich mit „Auswahl Iteration“ Schritt für Schritt nachvollziehen. Gleichzeitig ist die „Darstellungsgrenze“ in Prozent für die Struktur anpassbar. Hierbei werden Elemente, deren physikalische Dichte unter dem angegebenen Wert liegt, ausgeblendet. Bei der Wahl der Ergebnisse besteht die Wahl zwischen der „Designvariable“ und der „Nachgiebigkeit“ sowie speziell bei SKO und TOSS der „Spannungen pro Element“.

6.4.2 Glättung

Mit Hilfe des Buttons

im unteren rechten Bereich des Postprozessors können aus den optimierten Ergebnissen geglättete Ergebnisse erzeugt werden. Hierzu wird zuerst die gewünscht Iteration ausgewählt und die Darstellungsgrenze eingestellt. Das Bauteil wird geglättet, so wie es im Postprozessor angezeigt wird. Als nächstes wird die Anzahl der

Iterationen für den zweiten Glättungsschritt eingestellt. Dabei haben sich ca. 10 bis 20 Iterationen als guter Wert erwiesen.

Nachdem die Glättung erfolgreich durchgelaufen ist, kann über den Button Geglaettete Oberflaeche anzeigen eine Übersicht der durchgeführten Glättungen angezeigt werden. Durch Auswahl und Öffnen eines Ergebnisses, wird dieses in einem neuen Fenster zur Ansicht geöffnet.

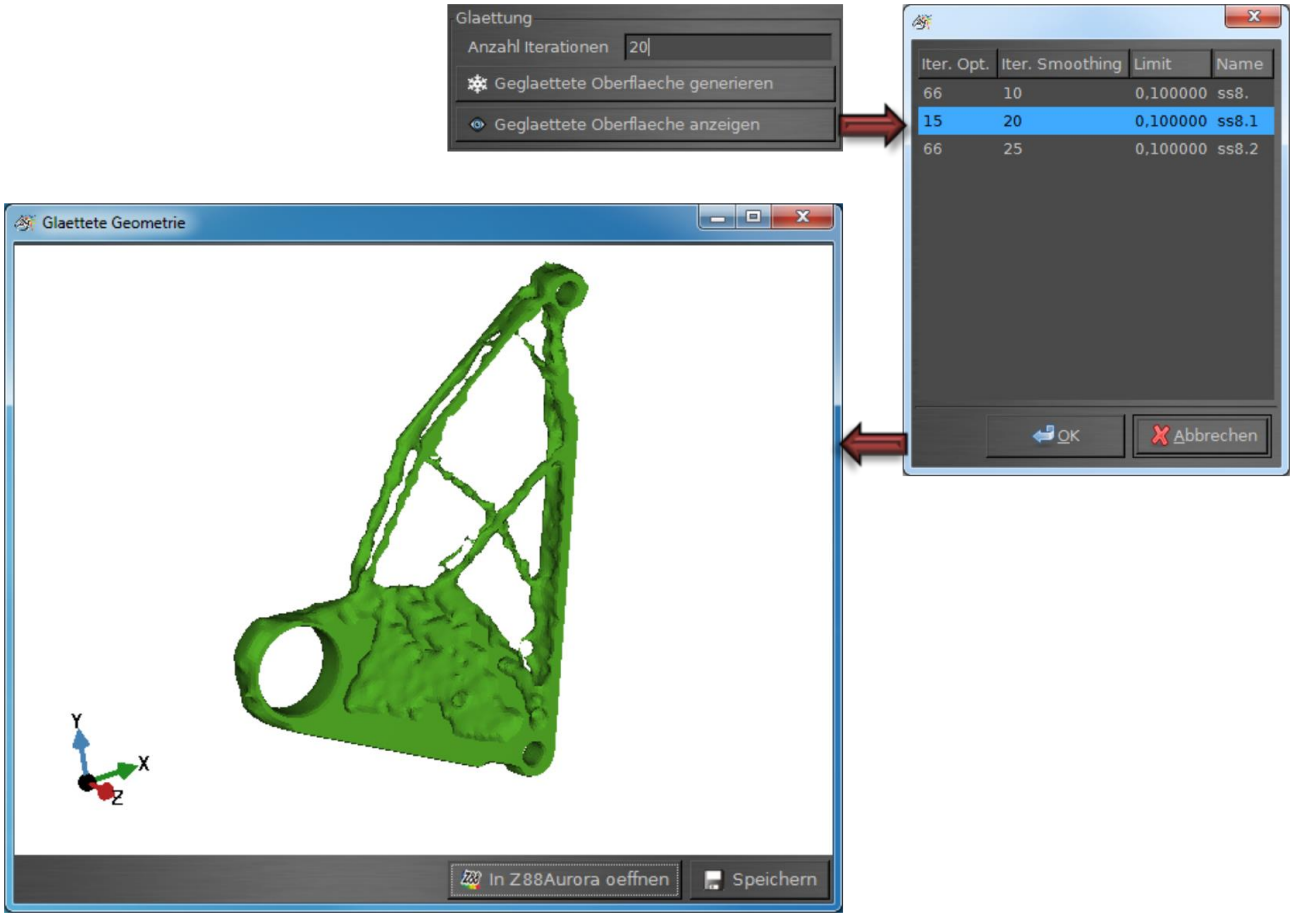


Abbildung 52: Anzeige des geglätteten Ergebnisses

Aus dem Ansichtsfenster kann das gerade betrachtete Glättungsergebnis entweder als STL exportiert werden, oder über den Button In Z88Aurora oeffnen direkt in Z88Aurora geöffnet werden. Hierzu muss Z88AuroraV4 installiert sein.

7. Tools

7.1 Analyse

Für die genauere Analyse des FE-Netzes oder des Importmodells können über „Analyse“ Informationen zu Knoten, finiten Elementen und Flächen angezeigt werden. Sie wählen im jeweiligen Pickingmenü das Objekt aus und gehen zu „Tools → Analyse“. Mit „Messen“ kann die räumliche Orientierung zweier Knoten betrachtet werden.

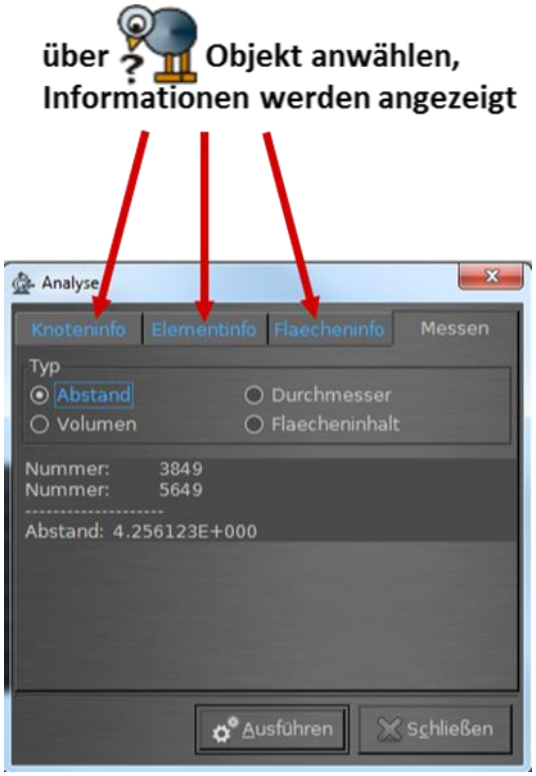


Abbildung 53: Analysetool

7.2 STL bearbeiten

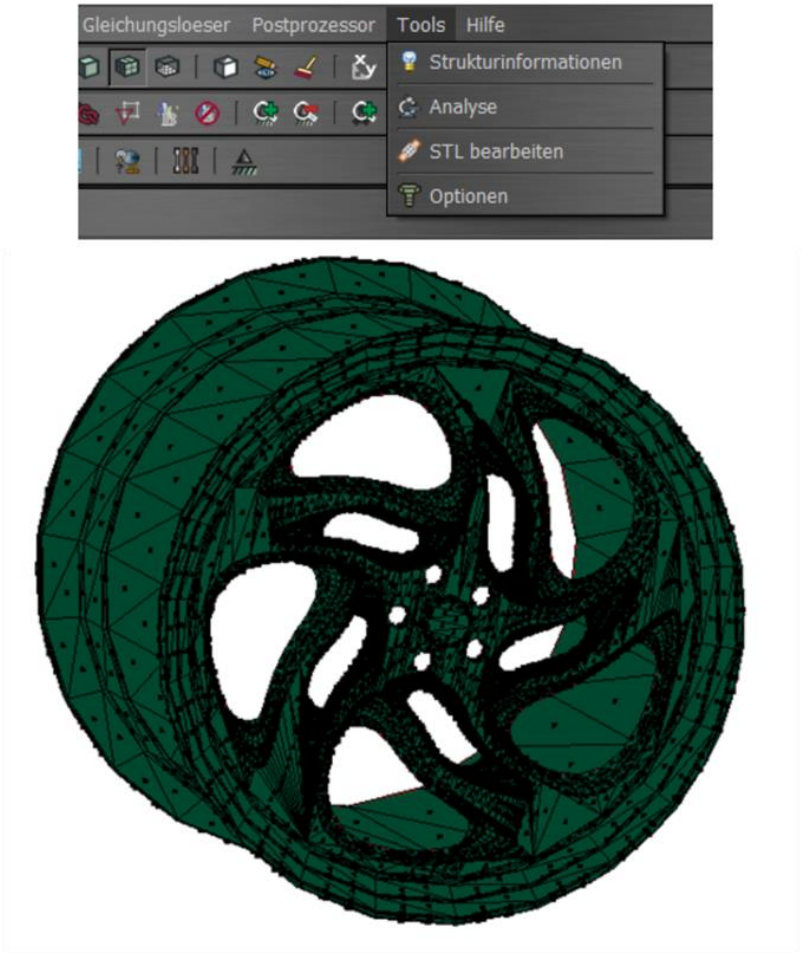


Abbildung 54: STL bearbeiten

Vertauschte Flächen in STL-Importdateien, die zu einem Vernetzungsabbruch führen, können über das Tool „STL bearbeiten“ gedreht werden. Hierzu in das Menü wechseln,

- die verdrehten Flächen werden rot dargestellt
    - ein grünes (!) Element anklicken
    - mit „Ja“ bestätigen

7.3 Optionen

Änderungen an der Benutzeroberfläche können im Optionsmenü vorgenommen werden. Hier werden die Sprache, die einzelnen Dateipfade für Hilfsprogramme, die Speichereinstellungen und die Ansichtseinstellungen getätigt.

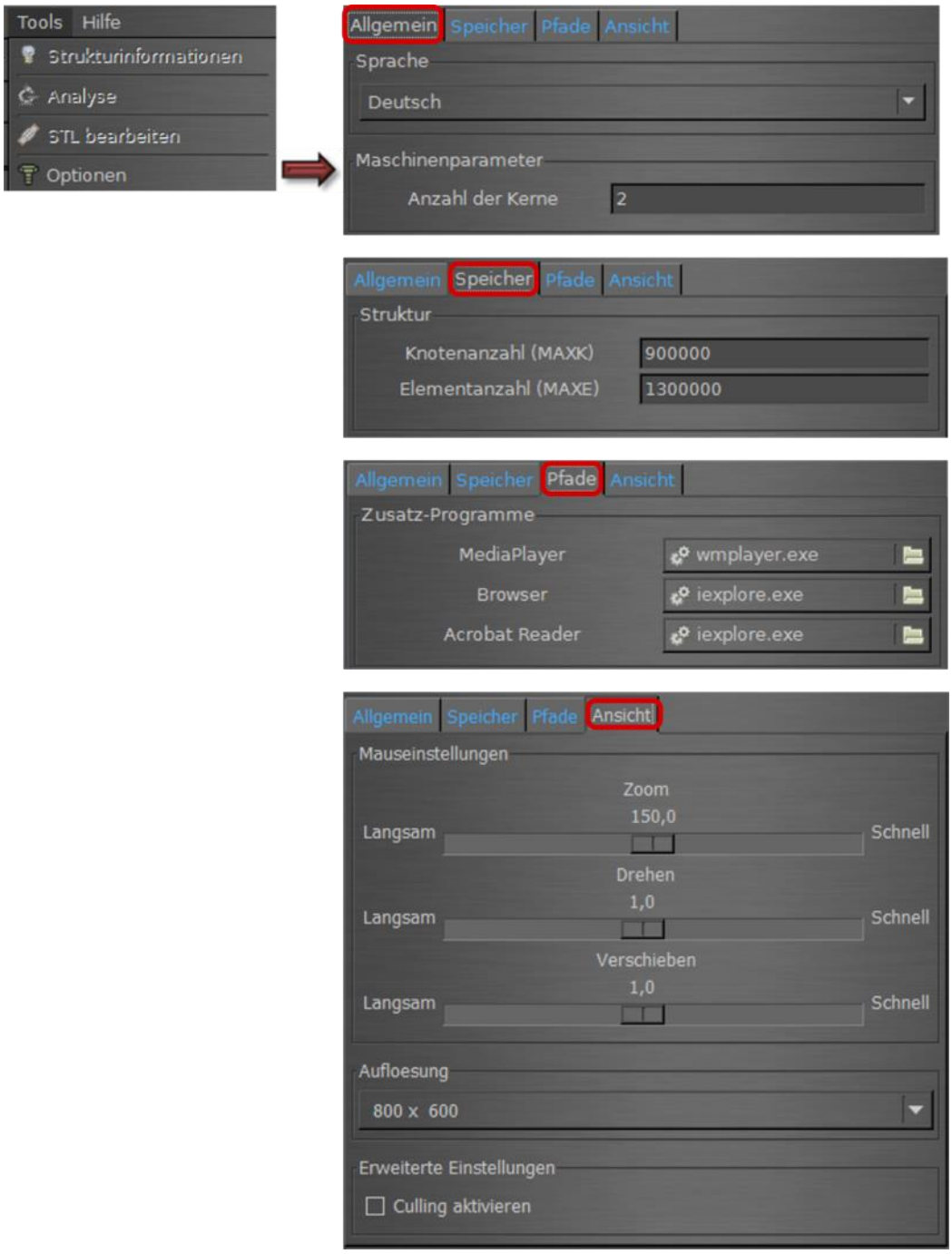


Abbildung 55: Optionseinstellungen

⚠ **Die hier getroffenen globalen Einstellungen für die CPU und den Speicher sind unabhängig von den lokalen Einstellungen im Solveroptionsmenü.**

⚠ **Die Änderungen werden erst nach einem Neustart von Z88Arion übernommen!**

Media Player

Auswahl des Media Players, mit dem die Z88Arion Anleitungsvideos abgespielt werden, z. B. Windows Media Player;

Standardpfad: „C:\Programme\Windows Media Player\wmplayer.exe“

Browser

Auswahl des Browsers, mit dem die Homepage und das Benutzerforum aus Z88Arion aufgerufen werden sollen, z. B. Internet Explorer;

Standardpfad: „C:\Programme\Internet Explorer\iexplore.exe“

PDF-Reader

Auswahl des PDF-Readers, mit dem die Z88Arion Handbücher aufgerufen werden können, z. B. Adobe Acrobat Reader;

Standardpfad: „C:\Programme\Adobe\Reader 9.0\Reader\AcroRd32.exe“

Sofern Änderungen vorgenommen wurden, erscheint folgendes Pop-Up und Z88Arion wird beendet, um die getroffenen Einstellungen umzusetzen.

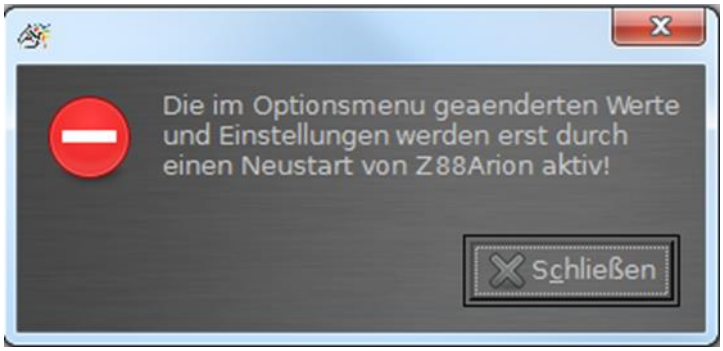


Abbildung 56: Pop-Up nach Veränderung der Einstellungen

Danach können Sie Z88Arion neu starten und die Änderungen sind aktiv.

8. Hilfe und Support

8.1 Hilfe

In Z88Arion stehen Ihnen mehrere unterschiedliche Hilfefunktionen zur Verfügung, die jeweils separat genutzt werden können. Es folgt ein Überblick über die einzelnen Hilfekomponenten.

Das Icon in der Iconmenüleiste öffnet das Popupmenü zur Auswahl der einzelnen Hilfemodule.

Abbildung 57: Hilfeoptionen

8.1.1 Videohandbuch

Zu allen Beispielen sind Videosequenzen zur besseren Verständlichkeit vorhanden. Die einzelnen Videos finden Sie auf unserer Homepage **www.z88.de**.

8.1.2 Benutzerhandbuch

Dabei handelt es sich um das vorliegende Handbuch. Der Abschnitt „Theorie“ geht auf die Berechnungsgrundlagen von Z88Arion ein. Die Module, die aus der Benutzeroberfläche aufgerufen werden können, werden hier ebenfalls beschrieben.

8.2 Über Z88Arion

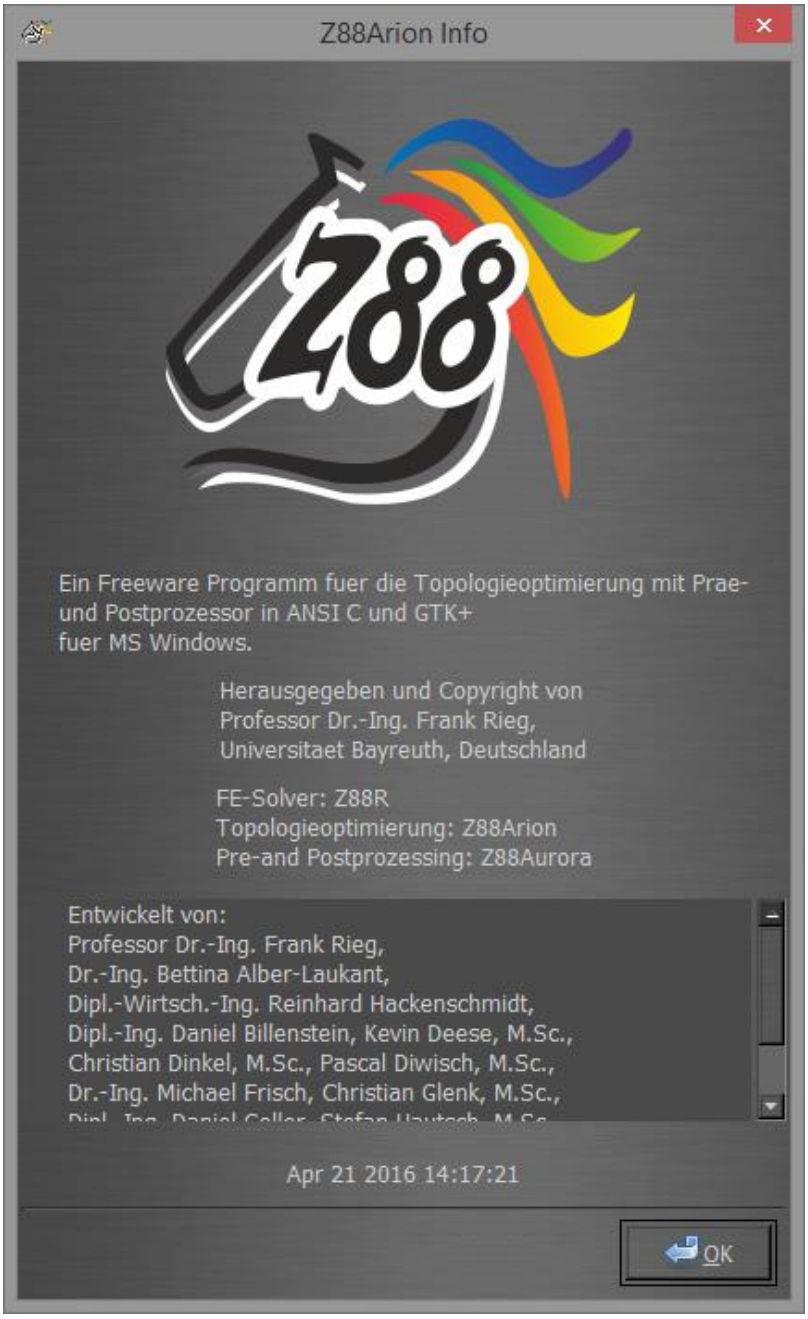


Abbildung 58: Versionsinformation Z88Arion

8.3 Support

8.3.1 Homepage

Für weitere Informationen besuchen Sie unsere Homepage **www.z88.de**.

8.3.2 Email

Oder schreiben Sie uns eine E-Mail an: **hilfe@z88arion.de**

8.3.3 Forum

Über unsere Homepage finden Sie ein Benutzerforum, in dem Sie mit anderen Anwendern über Z88 Themen diskutieren können. Alternativ können Sie über **http://forum.z88.de** direkt auf das Forum zugreifen.