



Design- und Auslegungsprozess für eine additiv gefertigte Fahrradtrittkurbel

Tritt für Tritt mit Simulationen zum Ziel

GKN Powder Metallurgy, weltweiter Hersteller von pulvermetallurgischen Bauteilen und Metallpulver, beliefert die Automobilindustrie und auch andere Branchen. Sein wachsendes Engagement in der additiven Fertigung metallischer Bauteile reicht von der Pulverherstellung über die Prozessentwicklung und Bauteilfertigung im Auftrag bis zur Bauteilentwicklung mit modernen CAE-Werkzeugen.

An einer Tretkurbel für ein eBike wird hier exemplarisch gezeigt, wie der Freiraum, den die additive Fertigung hinsichtlich der Gestaltung bietet, genutzt werden kann. Ziel ist es, eine möglichst leichte Tretkurbel bei ausreichender Festigkeit zu entwerfen, die im Laserverfahren aus Aluminium additiv gefertigt wird. Das ist kaum möglich, ohne leistungsfähige Simulationen einzusetzen, in diesem Fall die ANSYS Softwarelösungen.

Die auf die Tretlagerwelle montierten Tretkurbeln sind rechtsseitig an einen Kurbelstern mit einem oder mehreren Kettenblättern montiert. Die Last auf die Pedale, die am Ende beider Kurbeln eingeschraubt sind, verursacht eine Biegung und eine Torsion auf den Kurbelarm. Abgeleitet wird die Last über den Kurbelstern und das Kettenblatt. Bei linksseitiger Belastung erfolgt eine Übertragung über die Tretlagerwelle auf den rechtsseitigen Kurbelstern und eine

anschließende Ableitung über ein Kettenblatt. Die Höhe der Last, die Belastungsposition und auch die zu ertragenden Lastzyklen entsprechen der gängigen Norm (45° geneigt, 1800N, 100.000 Zyklen).

Die für die Tretkurbel am besten geeignete Geometrieform entsteht in mehreren Schritten. Zunächst kann innerhalb eines Bauraums mit einer Topologieoptimierung eine möglichst steife Struktur ermittelt werden. Mit einem CAD-Modell, das auf der

Bild: Sergey, adobe stock

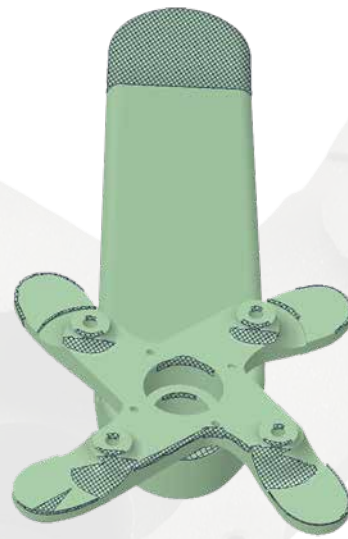


Bild 3: Unten die gestützte Kurbel und links die Kurbelunterseite mit den zu stützenden Bereichen.

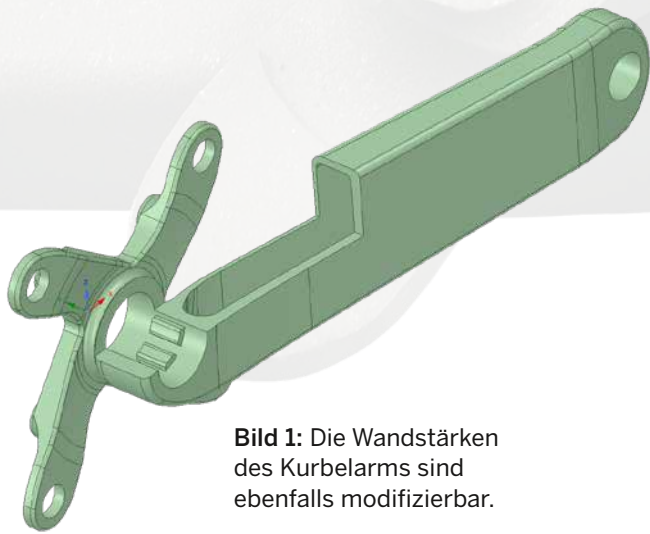
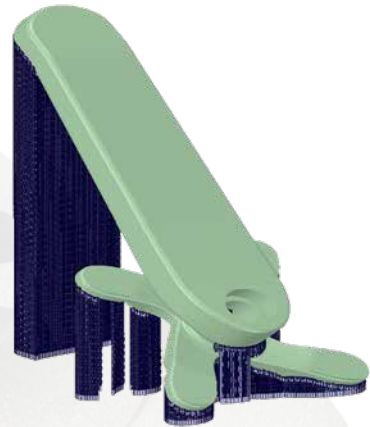


Bild 1: Die Wandstärken des Kurbelarms sind ebenfalls modifizierbar.



Bild 2: Höchstmögliche Steifigkeit bei reduzierter Masse.



Topologieoptimierung basiert, lassen sich einzelne Parameter leicht ändern, so dass nach einer Spannungsberechnung die Querschnitte optimiert werden können. Mit einer Lebensdaueranalyse lässt sich anschließend die Betriebsfestigkeit des Bauteils abschätzen, um sie abschließend mit einem Bauteilversuch zu validieren.

Die Topologieoptimierung

Die Topologieoptimierung erfordert zunächst das Festlegen eines Designraums. Innerhalb dieses Raums wird im Wesentlichen mit zwei unterschiedlichen Ansätzen eine geeignete Gestalt gesucht. Bei dem einen Ansatz wird die Masse auf einen willkürlich gewählten Wert reduziert und die Gestalt dabei möglichst steif gehalten (die compliance wird minimiert). Beim anderen Ansatz ist der Spannungsgrenzwert vorgegeben und die Masse wird reduziert bis der Spannungsgrenzwert erreicht ist. Beide Ansätze dienen dazu, sich einem lastgerechten Bauteilentwurf zu nähern, denn eine Massenreduktion muss nicht zum passenden Querschnitt führen und ein Spannungswert

alleine beschreibt keine Grenze für eine zyklische Belastung mit unbekannter Mittelspannung.

Außerdem kann bei beiden Ansätzen das Ergebnis durch die Wahl unterschiedlicher Randbedingungen erheblich variieren. Fertigungsrestriktionen – wie Entformbarkeit, Strangpressprofil, Symmetrien und besonders einzuhaltende kleinste und größte Strukturlängen – führen zu ganz unterschiedlichen Ergebnissen. Abhängig von der Wahl der Strukturlängen lässt sich beispielsweise entweder ein filigranes Gitterwerk oder eine geschlossenen Hohlstruktur erzeugen. Sehr wichtig ist auch, möglichst alle auftretenden Lasten in den Randbedingungen abzubilden, gegebenenfalls auch solche aus nachfolgenden Bearbeitungen oder dem Einspannen dafür.

Der für die Topologieoptimierung notwendige Bauraum hüllt den Kurbelstern in Form einer Scheibe ein. Zentral an diese Scheibe angebunden ist der Bauraum für den Kurbelarm. Für die Optimierung lassen sich design regions und exclusion regions im Bauraum festlegen. Die exclusion regions werden bei der Optimierung nicht be-

rücksichtigt, zum Beispiel die Gewindebohrungen für die Kettenblattmontage, das Pedal und die Aufnahme für die Tretlagerwelle.

Entsprechend den Randbedingungen kann die Kurbel um die Tretlagerwelle herum rotieren. Blockiert wird die Rotation durch Festhaltungen an den Kettenblattbohrungen. Außerdem ist für den Kurbelstern eine zyklische 90°-Symmetrie vorgegeben. Die Last wird auf der Pedalmitte eingeleitet, wodurch ein Biege- und ein Torsionsmoment auf den Kurbelarm entsteht.

Das parametrisierte CAD-Modell

Wird jetzt in einer Optimierung für eine Belastung der rechten Kurbel bei höchstmöglicher Steifigkeit die Masse auf 15% reduziert – was etwa dem Gewicht einer leichten Tretkurbel entspricht – ergibt sich die im Bild 2 gezeigte Geometrie. Dieses Ergebnis lässt sich im STL-Format exportieren und für eine Spannungsberechnung verwenden. Das Ergebnis aus dieser ersten Berechnung dient als Basis für weitere Modifikationen

zur Optimierung der Querschnitte und Minimierung der Kerbspannungen.

Wird die STL-Geometrie in einem CAD-System nachmodelliert und parametrisiert, können diese Parameter zur Geometriemodifikation genutzt werden. Mit dem ANSYS Design Explorer lassen sich die Parameter ebenfalls variieren und auf ihre Sensitivität bezüglich der gewünschten Eigenschaften hin untersuchen. Bei diesem Projekt wurden mit einem Spannungs- und einem Verformungsgrenzwert die Hauptabmessungen und die Wandstärken des Kurbelarms geändert, um so die günstigste Parameterkombination zu ermitteln. Als Folge vergrößerte sich die Wandstärke der äußeren Wand, wobei die der hinteren Wand sich verringerte (Bild 1).

Querschnittsübergänge mit hohen Spannungswerten wurden mit der Methode der Zugdreiecke (Prof. Mattheck) modifiziert und damit die Spannung effektiv gesenkt. Der einzuhaltende Spannungsgrenzwert ist die Oberspannung der schwellenden Last. Insgesamt entstand so in mehreren Schritten eine leichte und spannungsgünstige Kurbel.

Die schwingfeste Auslegung der Tretkurbel

Als zyklisch belastetes Bauteil muss die Tretkurbel schwingfest ausgelegt werden. Dabei gibt die Norm EN ISO 4210-8 die Belastung vor, hier 100.000 Belastungen mit 1800N bei einer Neigung von 45°. Die vorliegende Kurbel könnte einfach nach Norm geprüft werden und die Festigkeit so nachgewiesen werden. Langfristig sinnvoller ist es aber, die Werkstofffestigkeiten zu ermitteln, um die Bauteilfestigkeit rechnerisch vorhersagen zu können. Abschließend sollte ein Bauteilversuch als Validierung des rechnerischen Vorgehens durchgeführt werden.

Dazu wurden drei Werkstoff-Wöhlerkurven aufgenommen: an der glatten Probe eine Wöhlerkurve für Wechsellast, eine für schwellende Last und an der gekerbten Probe ebenfalls eine für Wechsellast. So lassen sich Mittelspannungs- und Kerbempfindlichkeit ermitteln. Mithilfe von Zugstäben wurde zusätzlich die Streckgrenze, die Zugfestigkeit und der E-Modul des Werkstoffs untersucht. Aus diesen Werten lässt sich ein Datensatz für nCode inside ANSYS ableiten, um eine vollflächige Berechnung der Lebensdauer des Bauteils durchzuführen. Insgesamt wurden 120 ungekerbte und 60 gekerbte Proben nach DIN3928 und 10 Zugstäbe nach DIN 2740 mit gleichen Fertigungsparametern und gleicher Wärmebehandlung wie die Kurbel gefertigt. Nur die Aufbaurichtung der Proben unterscheidet

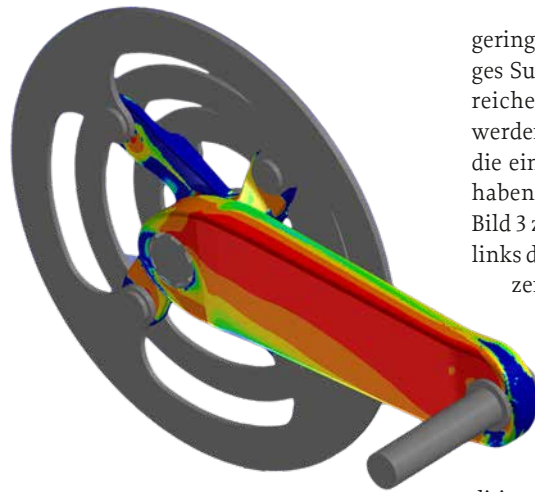


Bild 4: Die Lebensdaueranalyse mit einem Sicherheitsfaktor für 100.000 Zyklen.

sich von der der Kurbel, denn die Proben stehen senkrecht auf der Platte, die Kurbel ist um 45° geneigt. Somit bleibt eine eventuelle orientierungsabhängige Festigkeitsanisotropie unberücksichtigt.

Für eine Lebensdaueranalyse mit nCode inside ANSYS müssen die Umkehrpunkte des Spannungszyklus aus der Spannungsberechnung importiert werden. Ebenso ist zu berücksichtigen, dass der Kurbelstern auch durch Last auf der linken Kurbel belastet wird. Das Ergebnis ausgedrückt als Sicherheitsfaktor für 100.000 Zyklen zeigt das Bild 4.

Prozesssimulation mit der ANSYS Additive Suite

Mit Additive Print, eine Anwendung der ANSYS Additive Suite, kann eine sinnvolle Bauteilorientierung für den Fertigungsprozess gesucht werden. Dabei lassen sich verschiedene Ziele einstellen, zum Beispiel

Damit konnten alle Aufgaben – von der Topologieoptimierung, der Spannungsberechnung, der Lebensdaueranalyse bis zur Prozesssimulation – erfolgreich gemeistert werden, so dass optimierte Produkte schnell und kostengünstig ausgelegt und gefertigt werden können.

geringer Verzug, kurze Bauzeit und geringes Supportvolumen. Ebenso können Bereiche identifiziert werden, die gestützt werden müssen. Dies sind meist Flächen die einen Überhangwinkel von unter 45° haben, gemessen von der Bauplatte aus. Bild 3 zeigt unten die gestützte Kurbel und links die Kurbelunterseite mit den zu stützenden Bereichen, die schraffiert dargestellt sind. Die Supportstruktur selbst wird automatisch erstellt.

Ebenso kann der Verzug berechnet werden. Wie beim herkömmlichen Schweißen kommt es auch bei der laserbasierten additiven Fertigung zu Eigenspannungen, die zu Verzug führen. Der Verzug ist dabei umso größer, je länger die Laserbahnen in paralleler Orientierung zur Bauplatte verlaufen, also je größer die Projektionsfläche des Bauteils auf der Bauplattform ist. Verzug in der Größenordnung von Millimetern wird als durchaus typisch angesehen. Nach der Berechnung des Verzugs mit Additive Print, lässt sich der Verzug in der Bauteilgeometrie kompensieren, so dass das Bauteil im verzogenen Zustand der gewünschten Form entspricht. Jedoch ist zu beachten, dass das Bauteil verzogen bleibt, auch wenn es nicht zu erkennen ist. Im Fall der Kurbel konnte der Verzug durch die Bauteilorientierung während der Fertigung – kleine Projektionsfläche auf der Bauplattform – auf ein akzeptables Maß reduziert werden.

Zusammenfassung

Das Beispielprojekt zeigt anhand einer Fahrradtretkurbel, dass mit den Simulationslösungen von ANSYS die Entwicklung und Herstellung von additiv gefertigten Metallbauteilen umfassend unterstützt wird. Damit konnten alle Aufgaben – von der Topologieoptimierung, der Spannungsberechnung, der Lebensdaueranalyse bis zur Prozesssimulation – erfolgreich gemeistert werden, so dass optimierte Produkte schnell und kostengünstig ausgelegt und gefertigt werden können.



UNTERNEHMEN
GKN Powder Metallurgy
www.gknpnm.com

AUTOR
Robert Maassen
robert.maassen@gknpnm.com

ANSPRECHPARTNER | CADFEM
Keno Kruse
Tel. +49 (0) 511-39 06 03-27
kkruse@cadfem.de