

Gelenke einmal anders

Stoffschlüssige Gelenke könnten den Maschinenbau auf eine ganz neue technologische Basis stellen. Leichtere und leisere Mechanismen und Maschinen wären die Folge. Ohne Reibung und Verschleiß, günstig in der Herstellung und in der Wartung, sauber und präzise.

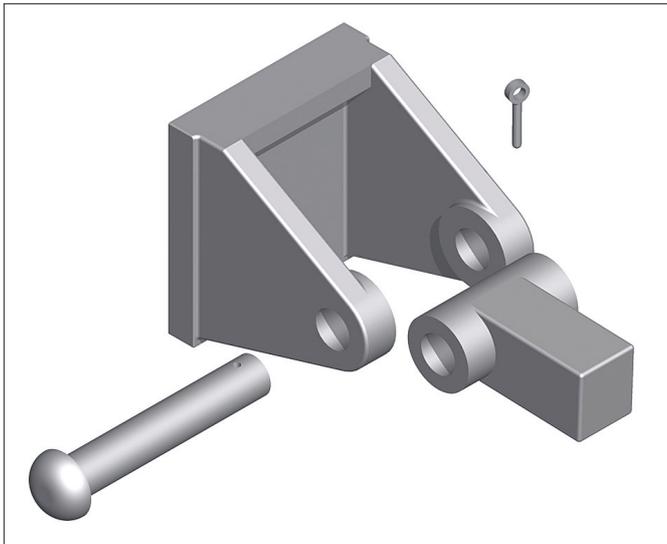


Bild 1

Eine klassische Gelenkkonstruktion (links) ist denkbar einfach konzipiert. Ein stoffschlüssiges Gelenk (rechts) ist im Entwurf komplexer, bietet aber im Betrieb eine Vielfalt von Vorteilen

Ein konventionelles Drehgelenk ist die Standardlösung für eine belastbare Schwenkverbindung in Mechanismen und Maschinen. Als eines der am meisten eingesetzten Konstruktionselemente ist das Drehgelenk allgegenwärtig. Es begleitet unseren Alltag von der ersten Stunde an, etwa als Scharnier im Küchenhängeschrank, aus dem wir unsere Kaffeedose holen, bis zur letzten Stunde des Abends, wenn wir den Wippenschalter der Nachttischlampe betätigen. Dazwischen

begegnen wir ihm praktisch überall, in der Türautomatik des Fahrstuhls oder der Straßenbahn, im Faltmechanismus unseres Regenschirms oder in der Schere auf dem Büroschreibtisch. Im Gelenk findet Bewegung statt und ohne das Gelenk würde alles erstarren: Die Lenkung unseres Wagens und der Bremshebel des Fahrrads; Bagger und Parkhausschranken. Und schließlich die industrielle Produktion, mit ihren Fertigungs-, Montage- und Verpackungsanlagen.

Und doch ist die konventionelle Art, Drehgelenke zu bauen, in den allermeisten Fällen suboptimal. Sie sind reibungs-, spiel- und verschleißbehaftet. Sie sind mehrteilig aufgebaut und deshalb aufgrund der Montagekosten verhältnismäßig teuer. Aufgrund ihres auf Roll- bzw. Gleitpaarungen basierenden Funktionsprinzips benötigen sie in den meisten Fällen einen Schmierstoff und sind anfällig gegen Verunreinigungen. Aber sie haben einen deutlichen Vorteil für den Inge-

Autoren

Flavio Campanile
Vorsitzender des Verwaltungsrates

René Jähne
Produktentwicklung

beide:
Monolitix AG
c/o Empa, Überlandstrasse 129
CH-8603 Dübendorf
Tel. +41 58/7 65-40 59
E-Mail: info@monolitix.com
www.monolitix.com

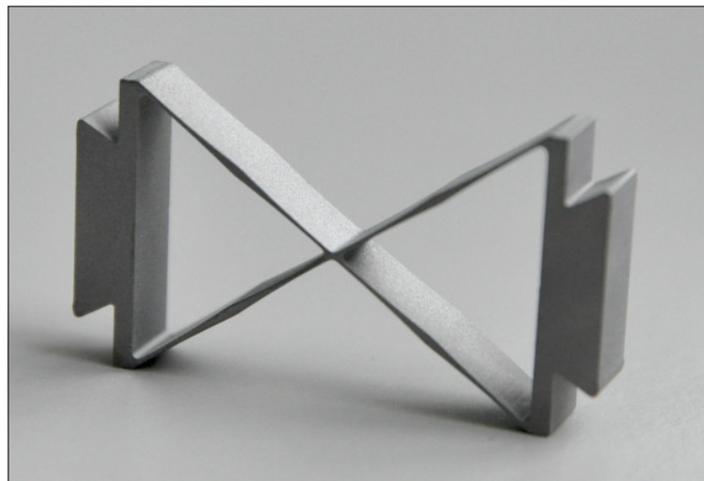


Bild 2

Das Hochlastgelenk der neuesten Generation: Dank optimierten Blattverläufen und superelastischen Werkstoffs ist das Gelenk mit bis zum 100 000-fachen des eigenen Gewichts belastbar



Bild 3

Mit den stoffschlüssigen Greifern von Monolitix wurden bereits Millionen Tarteletten hygienisch und sanft verpackt

neur: Sie sind denkbar einfach konzipiert (siehe Bild 1 links). Um eine klassische Gelenkverbindung zu entwerfen, muss der Konstrukteur erst einmal nur geometrisch bzw. kinematisch denken. Er hat im ersten Schritt nur mit Starrkörpern und deren Relativbewegung zu tun. Lasten, Spannungen und Dehnungen kommen erst in einem zweiten Schritt in Betracht, wenn es darum geht, die Konstruktion parametrisch zu dimensionieren.

Kein Wunder also, dass der mit Bolzen, Gabel, Auge und Gleit- bzw. Wälzlager aufgewachsene Konstrukteur kaum daran denkt, die Gelenkverbindung anderweitig auszuführen. Obwohl er – zumindest prinzipiell – die Alternative kennt: Ein stoffschlüssiges Gelenk, das heißt ein Gelenk, das nicht auf dem Rollen bzw. Gleiten zwischen Starrkörpern basiert, sondern auf dem kontrollierten, reversiblen Verformen flexibler Bereiche (siehe Bild 1 rechts). Und das, obwohl er weiß (oder zumindest ahnt), wie viele Vorteile die stoffschlüssige Lösung (auch Festkörpergelenk genannt) im Betrieb bietet: kein Spiel, keine Reibung. Eine einteilige, montagefreie Konstruktion. Keine Wartung. Kein Geräusch. Kein Abrieb und damit kein Freisetzen von Partikeln. Sauberer, schmierfreier Betrieb. Präziser in der Bewegung, schmutzunempfindlich und einfach zu reinigen.

Ein anderer Grund, weshalb der klassisch ausgebildete Konstrukteur die stoffschlüssige Variante nicht ernst nimmt, ist ein Irrglaube über die Belastbarkeit von Festkörpergelenken. Üblicherweise dort eingesetzt, wo die mechanischen Lasten nicht im Vordergrund stehen, etwa in der Präzisions- oder

in der Mikrosystemtechnik bzw. bekannt als „Filmgelenke“ bei den Verschlüssen von Kunststoffbehältern und -flaschen, gelten Festkörpergelenke oft als nur mäßig belastbar. Die Wenigsten wissen, dass mittlerweile, dank innovativer Werkstoffe (wie z. B. superelastischer NiTi-Legierungen) und optimierter Geometrie, Festkörpergelenke es in puncto Belastbarkeit – bei vergleichbarer Baugröße – mit den konventionellen Varianten durchaus aufnehmen können. Bezogen auf das Gewicht, sind die schlank ausgeführten Festkörpergelenke den konventionellen sogar überlegen, womit sie für Leichtbaumechanismen (etwa in der Luft- und Raumfahrt oder in der Robotik) prädestiniert sind.

Die schweizerische Firma Monolitix AG, eine Ausgründung der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) hat sich auf Analyse, Entwurf und Herstellung von Festkörpergelenken und -mechanismen spezialisiert und bietet sowohl Serienprodukte als auch kundenspezifische stoffschlüssige Gelenke aus verschiedenen Materialien für die unterschiedlichsten Anforderungsszenarien an. Ein vor kurzem entwickeltes Hochlastgelenk aus superelastischem Nickel-Titan mit optimiertem Blattfederdickenverlauf (siehe Bild 2) lässt sich beispielsweise um 50° schwenken, ist in der abgebildeten Ausführung (5 mm Breite) bis 1000 N radial belastbar und wiegt weniger als ein Gramm. Getestet wurde das Gelenk für mehr als fünf Millionen Schwenkzyklen. Durch Anpassung der Breite bzw. serielle Anordnung mehrerer Gelenke lassen sich die Traglasten problemlos auf mehrere kN steigern.



Bild 4

Nach Kundenwunsch gefertigt und trotzdem günstiger als konventionelle Seriengreifer: stoffschlüssige Greifer von Monolitix



Vom Festkörpergelenk zum monolithischen Mechanismus

Die Weiterentwicklung des stoffschlüssigen Prinzips für Einzelgelenke ist der nachgiebige Mechanismus, in dem starre Glieder und Gelenke zu einer Einheit verschmelzen. So lassen sich komplexere Baugruppen oder sogar ganze Mechanismen stoffschlüssig ausführen. Das größte Potenzial ist dabei für Mechanismen mittlerer Größe gegeben (100–500 mm), für die eine kostengünstige, monolithische Fertigung auf generativer oder abtragender Basis möglich ist. Je nach Baugröße und Material kommen dabei Spritzguss, selektives Lasersintern (SLS), selektives Laserschmelzen (SLM), Fräsen, Laserschneiden sowie Pulverspritzguss (MIM) in Frage. Besonders beim Ersatz handmontierter, mehrteiliger Baugruppen lassen sich mit der stoffschlüssigen Variante Kosteneinsparungen bis zu zwei Größenordnungen realisieren, wie die Monolitix AG im Rahmen ihrer Auftragsentwicklungen für die medizintechnische Industrie erfahren durfte.

Hygienisches Greifen

Ein Beispiel monolithischer Mechanismen sind stoffschlüssige Greifer. Spalt- und schmiermittelfrei, sind sie besonders leicht zu reinigen und damit ideal für Anwendungsbereiche mit hohen hygienischen Standards wie die Lebensmittel- und die Pharmaindustrie. Seit 2010 verpackt beispielsweise einer der größten Backwarenhersteller der Schweiz seine sogenannten Tarteletten mit stoffschlüssigen Greifern von Monolitix (Bild 3). Inzwischen vermarktet der

Hightech-Startup zusammen mit einem etablierten Anbieter von Automatisierungslösungen (der Firma Domino Modul AG) eigene Seriengreifer. Serienprodukte sind die Greifer von Monolitix allerdings nur, was die Gestaltung der Kinematik angeht. Die Greifbacken werden dagegen nach Kundenwunsch gefertigt, und das nach wie vor bei stoffschlüssiger Ausführung (Bild 4).

Die „Entfindung des Rades“

Die Entwicklung von den konventionellen zu den stoffschlüssigen Gelenken bzw. Mechanismen ist eine natürliche Entwicklung im wahrsten Sinne des Wortes. Wäh-

rend der Ingenieur aus pragmatischen Gründen dazu neigt, komplexe, zu entwerfende Systeme in einfache Subsysteme mit separaten Funktionen aufzuteilen, nimmt sich die Natur beim Entwerfen Zeit und ist dadurch in der Lage, komplexe Systeme ohne die örtliche Trennung der Funktionen zu realisieren. So verformen beispielsweise Meerestiere zur Fortbewegung ihren gesamten Körper, während Schiffe aus einem starren Rumpf und einem separaten Antrieb bestehen. Das Prinzip der Trennung der Funktionen wird oft mit Sir George Cayley in Verbindung gebracht, der gut 100 Jahre vor der Erfindung des Flugzeugs sich dafür aussprach, dem Auftrieb und dem Vortrieb zwei getrennte

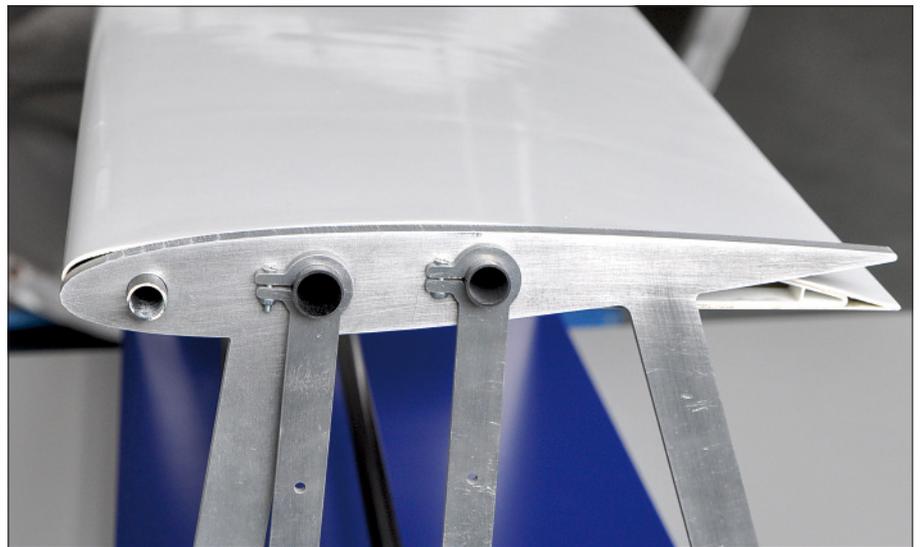


Bild 5

Zukunftstechnologie für den Leichtbau: Dank stoffschlüssiger Gelenke lassen sich Tragflächen bauen, die sich ganz nach dem Natur Vorbild auf vielfältige und sanfte Weise verformen lassen und dabei leicht und belastbar bleiben. An der Form der Alu-Endplatte lässt sich die Flügelkontur in unverformter Konfiguration erkennen

Subsysteme zuzuordnen, nämlich Tragflügel und Triebwerk, und sich von der klassischen Idee der strikten Nachahmung des Vogelfluges zu lösen. So trennt das konventionelle Gelenk nach dem uralten Prinzip des Rades starre und nachgiebige Freiheitsgrade und die entsprechenden Komponenten strikt voneinander. Gabel, Auge und Bolzen sollten idealerweise starr sein und die radialen sowie axialen Lasten aufnehmen, während die gleitende oder rollende Schnittstelle die Umfangsbewegung so widerstandsfrei wie möglich realisieren soll.

Das Cayley'sche Prinzip der Funktions-trennung vereinfacht zwar die Aufgabe des Ingenieurs, reduziert aber dabei die Optimierungsfähigkeit der Lösung, indem es den Entwurfsraum (also die Vielfalt der möglichen Lösungen) auf willkürliche Weise stark einschränkt. Mit anderen Worten: Wer Funktionen nicht von vornherein auf begrenzte Bereiche eingrenzt, sondern deren Verteilung auf das ganze System zulässt, kommt in der Regel zu besseren Lösungen. Das Zauberwort dazu heißt Multifunktionalität. Das Optimierungs- und damit Innovationspotenzial multifunktionaler Systeme ist der Hauptgrund, warum die heutige Ingenieurwissenschaft vermehrt auf multidisziplinäre Fachgebiete setzt, von der Mechatronik über die Adaptro-nik bis hin zur Bionik.

So entstehen stoffschlüssige Gelenke und Mechanismen multidisziplinär aus der Verbindung von Getriebelehre und Strukturmechanik. Frei von a priori-Einschränkungen, dürfen sich im Entwurfsprozess Beweglichkeit, Festigkeit und Steifigkeit über das ganze Bauteil verteilen und werden dort angebracht, wo sie gebraucht werden. Das dürfte erklären, warum Festkörpergelenke ihren konventionellen Konkurrenten in vielerlei Hinsicht überlegen sind.

Die Herausforderungen des gekoppelten Entwurfs

Wie oben bereits angedeutet, ist allerdings ein solcher gekoppelter Entwurfsprozess grundsätzlich komplexer. Beispielsweise entscheidet über die Kinematik eines herkömmlichen Gelenks nur die Geometrie der Bauelemente, nicht aber das Material. Anders verhält es sich beim Festkörpergelenk, dessen zulässiger Schwenkwinkel stark vom gewählten Werkstoff abhängig ist. Im Gegensatz zum herkömmlichen Gelenk sind außerdem Belastbarkeit und Lebensdauer eines stoffschlüssigen Gelenks mit dem Schwenkwinkel gekoppelt. Wird beispielsweise nur eine mäßige Schwenkung benötigt, so kann das Gelenk fester oder beispielsweise leichter ausgelegt werden. Das erfordert eine ganzheitliche Betrachtung des gesamten mechanischen Systems, bietet aber Gestaltungs-

und Optimierungsmöglichkeiten, die bei klassischen Systemen nicht gegeben sind. Die Konstruktion eines konventionellen Gelenks hat – bei gleicher Belastbarkeit – ungefähr die gleiche Masse, egal ob das Gelenk für eine Schwenkung um 5 oder 50° gebaut wird.

Aufgrund der großen Verformungen kann ausserdem das Verformungsverhalten der nachgiebigen Gelenke in aller Regel nicht mit linearen Modellen berechnet werden. Beim Einsatz spezieller Materialien wie superelastischer Legierungen wird die Betrachtung auch auf der Materialebene wesentlich komplexer: Die Verformungsmechanismen basieren auf einer Phasenumwandlung im Werkstoff und werden mit mathematischen Modellen beschrieben, die bisher für die Darstellung von Plastizitätseffekten genutzt wurden. Aufgrund der besonderen Geometrie der Gelenke treten vermehrt mehrdimensionale Spannungszustände im Material auf, die eine genaue Voraussage der Phasenumwandlung und somit des makroskopischen Verhaltens zusätzlich erschweren.

Aus diesen vielschichtigen Zusammenhängen schöpft Monolithix ihr Geschäftspotenzial: Ihre Kunden überlassen den Experten aus Dübendorf das Design der innovativen Gelenke und Mechanismen und profitieren von den zahlreichen Vorteilen im Betrieb.

Das Leichtbaupotenzial nachgiebiger Mechanismen

Bei klassischen Gelenkverbindungen erfolgt die Lastübertragung über Linienkräfte (Gleit-, Rollen- und Nadellager) oder gar über Punktkräfte (Kugellager). Das tragende Material wird damit nicht optimal beansprucht. Bei Festkörpergelenken wird der Stoffschluss nicht unterbrochen, und die Last wird immer über einen definierten Querschnitt übertragen. Die Struktur ist wesentlich schlanker und daher leichter.

Aufgrund ihres Leichtbaupotenzials sind nachgiebige Systeme die Schlüsseltechnologie bei der Realisierung des formadaptiven Flügels (engl. „morphing wing“). Es handelt sich dabei um Flugzeugtragflächen, die ähnlich zum Naturvorbild ihre Geometrie sanft und kontinuierlich verändern können und deshalb ohne konventionelle Klappen und starre Steuerflächen auskommen. Auf der Basis rechnergestützter Optimierungsverfahren entworfen, kann der gesamte Flügel stoffschlüssig und gleichzeitig verformbar gebaut werden. Anstatt der konventionellen Flügelrippen werden nachgiebige Mechanismen eingesetzt, welche die Verformung des gesamten Flügels kontrollieren. In Bild 5 wird der erste Prototyp eines solchen monolithischen, formveränderlichen Flügels gezeigt.