



(10) **DE 10 2020 126 705 A1** 2022.04.14

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 126 705.3**

(22) Anmeldetag: **12.10.2020**

(43) Offenlegungstag: **14.04.2022**

(51) Int Cl.: **C10M 171/02** (2006.01)

F16C 11/06 (2006.01)

F16C 11/00 (2006.01)

(71) Anmelder:
Hochschule Bremen, 28199 Bremen, DE

(74) Vertreter:
**BOEHMERT & BOEHMERT Anwaltspartnerschaft
mbB - Patentanwälte Rechtsanwälte, 28209
Bremen, DE**

(72) Erfinder:
**Dirks, Jan-Henning, 28201 Bremen, DE; Labisch,
Susanna, 28777 Bremen, DE; Sixt, Milan, 28205
Bremen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE 199 10 782 A1

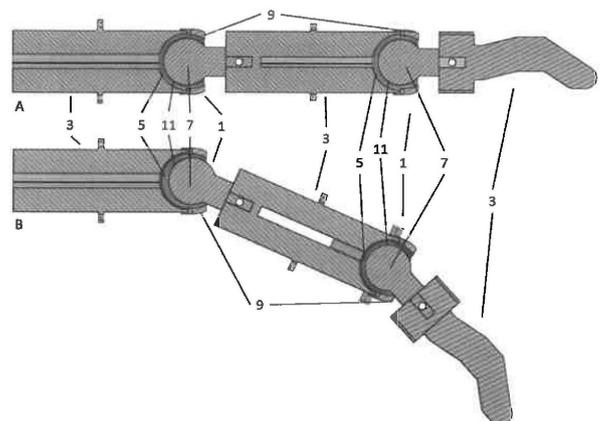
**Dresel, W. and Heckler, R.-P. (2011).
Lubricants, 8. Lubricating Greases. In Ullmann's
Encyclopedia of Industrial Chemistry, (Ed.).
https://doi.org/10.1002/14356007.o15_o10: S. 553,
„2.6 Temporarily Thickening Fluids“.
Downgeloaded am 9.2.2021**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Gelenk mit kontrollierbaren Freiheitsgraden**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft ein adaptives Gelenksystem, das mindestens ein Gelenk umfasst, das zumindest zwei starre Körper und einen Gelenkspalt umfasst, wobei das Gelenk in dem Gelenkspalt einen Gleitfilm mit kontrollierbaren viskoelastischen Eigenschaften umfasst und wobei die Beweglichkeit des Gelenks mittels des Gleitfilms reversibel einstellbar ist, indem die Viskosität des Gleitfilms zwischen mindestens einer ersten Viskosität und einer zweiten Viskosität, die höher als die erste Viskosität ist, einstellbar ist, und das Gelenksystem in seiner Position passiv haltbar ist.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein adaptives Gelenksystem, das mindestens ein Gelenk umfasst, das zumindest zwei starre Körper und einen Gelenkspalt umfasst, wobei das Gelenk in dem Gelenkspalt einen Gleitfilm mit kontrollierbaren viskoelastischen Eigenschaften umfasst und wobei die Beweglichkeit des Gelenks mittels des Gleitfilms reversibel einstellbar ist, indem die Viskosität des Gleitfilms zwischen mindestens einer ersten Viskosität und einer zweiten Viskosität, die höher als die erste Viskosität ist, einstellbar ist, und das Gelenksystem in seiner Position passiv gehalten werden kann.

[0002] Zur Konstruktion von komplexen beweglichen Strukturen ist der Einsatz von Gelenken essenziell. Klassische technische Gelenke funktionieren dabei zumeist auf dem Prinzip der Reibungsminimierung, bei gleichzeitig definierten Freiheitsgraden. Eine nachträgliche oder sogar reversible Modifikation der Freiheitsgrade ist schwer möglich. Gleichzeitig erfordert die minimierte Reibung zwischen den Strukturen eine permanente Regulierung der Position.

[0003] Zur Konstruktion von komplexen technischen Strukturen und Maschinen müssen Elemente entweder temporär oder permanent zueinander beweglich verbunden werden. Der klassische Lösungsansatz zur beweglichen Verbindung einzelner Elemente ist dabei die Nutzung von Lagern oder Gelenken. Die Form und Funktion dieser kinematischen Paare müssen hierbei im Vorfeld an die jeweils gewünschte Beweglichkeit (respektive Anzahl der Freiheitsgrade) in der fertigen Struktur angepasst werden. Dabei wird in der technischen Konstruktion oft auf erprobte und bekannte reibungsminimierte Lager und Gelenke mit definierten Freiheitsgraden zurückgegriffen (z. B. Kugelgelenke, Scharniere, etc.).

[0004] Bei vielen einfachen Strukturen und Bewegungsmustern sind diese „klassischen“ Gelenkkonzepte mit vordefinierten Freiheitsgraden und minimierter Reibung sinnvoll und ausreichend. Die Konstruktion und gezielte Bewegung von komplexeren zwei- oder dreidimensionalen Strukturen stellen jedoch deutlich höhere Ansprüche an die Verbindung von Elementen. Insbesondere in adaptiven Systemen im Flugzeug- und Fahrzeugbau und in der Produktionstechnik werden diese Anforderungen deutlich. Hier limitieren vordefinierte Freiheitsgrade die Einsatzmöglichkeiten von sogenannten morphenden Strukturen.

[0005] Zusätzlich erfordert geringe Reibung zwischen zwei beweglichen Elementen eine kontinuierliche komplexe Regulierung der „Ist“-Position durch Überwachung der Gelenkstellung. Bei Ausfall der

Regelung bzw. Energiezufuhr können solche Strukturen unkontrollierte Bewegungen durchführen und Anwender gefährden. Reibungsminimierte Gelenksysteme sind somit keine ideale Lösung für adaptive Strukturen.

[0006] Ein ideales Gelenk für eine morphende Struktur hat demnach eine einstellbare Anzahl der Freiheitsgrade, eine reversible Limitierung der Beweglichkeit und eine Ausfallsicherung bei Versagen der Regelung.

[0007] Insbesondere im Flugzeugbau ist das Konzept der „morphenden Strukturen“ bereits seit einigen Jahren bekannt (Mabe, J. H., Ruggert, R. T., Butler, G. W. and Sellmeyer, S. (2004). „Morphing Chevrons for Take Off and Cruise Noise Reduction.“; Barbarino, S., Bilgen, O., Ajaj, R. M., Friswell, M. I. and Inman, D. J. (2011). A review of morphing aircraft. J. Intell. Mater. Syst. Struct. 22, 823-877). Diverse Patentanmeldungen beschreiben grundlegende Designprinzipien für z.B. bewegliche Flügelspitzen oder adaptive Oberflächen zur Beeinflussung von Grenzflächen. Mit verbesserten Möglichkeiten zur Herstellung von komplexeren Materialien (z.B. Steifigkeitsgradienten) gab es in den letzten Jahren zunehmend Konzepte zur Konstruktion von biologisch inspirierten Gelenksystemen. Der Aufbau dieser reibungsminimierten technischen Gelenke ähnelt prinzipiell jedoch noch nahezu ausschließlich der Struktur endoskeletaler Gelenke. Dabei werden bewegliche Elemente mithilfe einer zusätzlichen Stützstruktur (Gelenkscapsel bzw. Umhüllung des Lagers) geführt und liegen direkt aufeinander oder sind über dünne Schmierfilme verbunden.

[0008] Ein evolutionär extrem erfolgreiches Beispiel für hochfunktionale Gelenksstrukturen mit definierten und reversibel kontrollierten Freiheitsgraden kann in der Haut von Echinodermata (Stachelhäuter), speziell des Seesterns gefunden werden. Über den genauen Aufbau dieser vielseitigen Gelenksstrukturen ist bislang relativ wenig bekannt. Viele kleine kalzifizierte Elemente verbinden sich zu einer Art Kettenhemd und bilden so eine stabile Außenhaut. Eine Besonderheit des Skeletts vieler Echinodermata ist die Fähigkeit, die Beweglichkeit einzelner Elemente ohne zusätzlichen Energieaufwand gezielt einzuschränken und reversibel wieder freizugeben. Diese Eigenschaft wird beispielsweise genutzt, um Beutetiere wie Muscheln mit geringem Energieaufwand zu öffnen. Erreicht wird diese kontrollierte Beweglichkeit durch das für Echinodermata einzigartige Kollagengewebe. Dieses kann über sogenannte „Juxtaligamentale Cells“ neuronal angesteuert werden und innerhalb sehr kurzer Zeit seine mechanischen Eigenschaften ändern. Die kalzifizierten Knöchelchen arretieren durch das Versteifen des dazwischen befindlichen, auf biophysischer Ebene veränderbaren, Kollagengewebes. Die Kollagenfasern

bestehen aus Homotrimeren, welche durch verschiedene Glykane und Proteine sowie weitere noch unbekannte Versteifungsfaktoren vernetzt werden können. Demnach verändern sich nicht die Kollagenfasern selbst, sondern die sie umgebende extrazelluläre Matrix. Der Versteifungsprozess ist reversibel, erlaubt die Fixierung einer Position in einer Vielzahl von Freiheitsgraden und verbraucht nach der Arretierung, da nicht muskulär, keine Energie mehr.

[0009] Unter Betrachtung der Fähigkeiten des Seesterns wurde versucht, die im Stand der Technik vorhandenen Nachteile und Hindernisse zu überwinden.

[0010] Es ist daher die Aufgabe der vorliegenden Erfindung eine Vielzahl von Freiheitsgraden bei gleichzeitig energiearmer Positionskontrolle und Reversibilität des Versteifungsprozesses zu ermöglichen.

[0011] Die Aufgabe wird gelöst durch ein adaptives Gelenksystem, das mindestens ein Gelenk umfasst, das zumindest zwei starre Körper und einen Gelenkspalt umfasst, wobei das Gelenk in dem Gelenkspalt und in Kontakt mit den zwei starren Körpern einen Gleitfilm mit kontrollierbaren viskoelastischen Eigenschaften umfasst und wobei die Beweglichkeit des Gelenks mittels des Gleitfilms reversibel einstellbar ist, indem die Viskosität des Gleitfilms zwischen mindestens einer ersten Viskosität und einer zweiten Viskosität, die höher als die erste Viskosität ist, einstellbar ist, und das Gelenksystem in seiner Position passiv haltbar ist.

[0012] Durch die Veränderung der viskoelastischen Eigenschaften des Gleitfilms kann die Beweglichkeit des mindestens einen Gelenks reversibel eingestellt werden. Die Art und Anzahl der Gelenke im erfindungsgemäßen Gelenksystem ermöglicht eine nahezu freie Wahl an Freiheitsgraden. Vorteilhafterweise behält das Gelenk bei Ausfall der Kontrolle seine mechanische Stabilität und kann damit seine Position passiv halten, d.h. ohne Energiezufuhr von außen. Das erfindungsgemäße Gelenksystem ist insbesondere einfacher konstruiert, regelungs- und ausfallsicherer, leichter und vielseitiger als konventionelle Gelenkssysteme.

[0013] Ein (technisches) Gelenk ist eine bewegliche Verbindung zwischen zwei starren Körpern und weist mindestens einen Freiheitsgrad auf.

[0014] Die Viskosität des Gleitfilms ist zwischen mindestens einer ersten Viskosität und einer zweiten Viskosität, die höher als die erste Viskosität ist, einstellbar. Bevorzugt weist der Gleitfilm eine erste Viskosität, bei der der Gleitfilm flüssig ist, und/oder eine zweite Viskosität auf, die höher als die erste Viskosität ist, bei der der Gleitfilm fest ist.

[0015] Die viskoelastischen Eigenschaften des Gleitfilms können mittels der Steuerung der Zuführung von thermischer, chemischer oder elektrischer Energie kontrolliert werden. Vorzugsweise werden die viskoelastischen Eigenschaften des Gleitfilms mittels thermischer Energie kontrolliert.

[0016] Die viskoelastischen Eigenschaften des Gleitfilms können ferner auch über Magnetfelder, elektrische Felder, elektromagnetische Strahlung (UV-Licht), Kristallisationsprozesse, Gasdruck, hydraulischen Druck oder den pH-Wert des Gleitfilms kontrolliert werden.

[0017] Die Arretierung ist vorteilhafterweise reversibel. Sie kann aber auch zumindest teilweise irreversibel sein. Irreversibilität kann beispielsweise durch eine UV-Bestrahlung, z.B. die Polymerisation von Epoxiden, oder Umkristallisierung erreicht werden.

[0018] Die Zusammensetzung und die Verteilung des Gleitfilms im Gelenkspalt sind vorzugsweise homogen. Die Zusammensetzung und die Verteilung des Gleitfilms im Gelenkspalt können aber auch unabhängig voneinander inhomogen sein. Durch eine entsprechende Auswahl der Art, Menge, Zusammensetzung (z.B. thermische Eigenschaften) und der Verteilung des Gleitfilms können so innerhalb eines Gelenks mit geringer externer Steuerung komplexe Freiheitsgrade erreicht werden. So kann beispielsweise bei einer einzigen Gelenktemperatur eine zusammengesetzte Gleitfilmschicht an verschiedenen Stellen unterschiedliche Viskositäten aufweisen, wodurch eine kontrollierte und komplexe Beweglichkeit des Gesamtgelenks entsteht. Dies kann z.B. erreicht werden durch einen „zellulären“ Aufbau der Gleitfilmschicht, bei welcher unterschiedliche Gleitfilmmaterialien ohne Durchmischung verwendet werden.

[0019] Gleiches kann auch durch Gelenksmaterialien mit unterschiedlichen thermischen oder physikalischen Eigenschaften erreicht werden. So kann sich z.B. ein Teil des Gelenkspalts schneller erwärmen und beweglich werden, während ein anderer Teil des Gelenks eine weiterhin erhöhte Viskosität aufweist. Dies kann erreicht werden durch zum Beispiel kontrollierte lokale Erhitzung, unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Materialien und/oder kontrollierte Steuerung der Spaltdicke.

[0020] Der Gleitfilm mit kontrollierbaren viskoelastischen Eigenschaften umfasst vorzugsweise ein Polymer, ein Öl, ein Fett, ein Wachs, eine Suspension, ein Festschmierstoff, flüssiges Metall oder Mischungen davon. Das Polymer kann ein Thermoplast oder ein elektroaktives Polymer sein.

[0021] Bevorzugte geeignete Thermoplaste sind Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polyamide (PA),

Polycaprolacton (PCL), Polylactat (PLA), Poly(meth)acrylate, wie z.B. Polymethylmethacrylat (PMMA), Polycarbonat (PC), Polyethylenterephthalat (PET), Polyolefin, insbesondere Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP), Polystyrol (PS), Polyetheretherketon (PEEK) und Polyvinylchlorid (PVC) und Mischungen davon. Polycaprolacton ist besonders bevorzugt.

[0022] Bevorzugte elektroaktive Polymere (EAP) sind elektroaktive thermoplastische Polymere aus der Gruppe der ionischen EAPs, z.B. leitfähige Polymere, ionische Gele, ionische Hydrogele, ionische Metall-Polymer-Komposite, ionische CNT-Komposite und Mischungen davon, sowie aus der Gruppe der elektronischen EAPs, z.B. ferroelektrische Polymere, elektrostriktive Polymere, elektrostriktive Graft-Elastomere, Flüssigkristall-Elastomere und dielektrische Elastomere.

[0023] Bevorzugte Öle sind alle Arten von tribologisch-geeigneten Schmierölen. Besonders bevorzugt geeignet sind Schmieröle mit einer nicht-linearen Änderung der Viskosität-Temperatur-Beziehung und einem geringen Viskositätsindex VI (nach DIN ISO 2909). Hierzu gehören bevorzugt mineralische Öle (Paraffine, Naphthene, Aromaten) und synthetische Öle (Polyetheröle, Carbonsäureester, Esteröle, Phosphorsäureester, Siliconöle und Halogenkohlenwasserstoffe). Weiterhin geeignet sind tierische und pflanzliche Öle.

[0024] Bevorzugte Fette sind alle Arten von tribologisch-geeigneten Schmierfetten mit einer temperaturabhängigen Fließgrenze. Besonders bevorzugt geeignet sind Fette aus der Gruppe der Natriumfette, Lithiumfette, Calciumfette, Aluminiumfette, Bariumfette und Komplexfette.

[0025] Bevorzugte Suspensionen sind alle Arten von tribologisch geeigneten mono-, iso- und polydispersen kolloidalen Stoffgemischen aus den Gruppen der Pasten, Gele und Flüssigkristalle mit einem flüssigen Dispersionsmedium und einer gasförmigen, festen oder flüssigen dispersen Phase. Besonders bevorzugt sind Emulsionen und Mikroemulsionen. Das Dispersionsmedium kann bevorzugt Wasser oder besonders bevorzugt alle Arten der in diese Text genannten Öle, Fette, Wachse und Schmierstoffe umfassen. Die disperse Phase kann alle in diesem Text genannten Feststoffe enthalten.

[0026] Besonders bevorzugt sind zudem Minerale aus der Gruppe der Silikate, z.B. Glimmer, Tonminerale, Amphibole, Granat, Olivin, Pyroxene und Quarz. Bevorzugt sind Partikelgrößen zwischen 0.05 und 2 mm. Ganz besonders bevorzugt sind Partikelgrößen zwischen 0.1 und 1 mm. Am meisten bevorzugt sind Partikelgrößen zwischen 0.4 und 0.8 mm.

[0027] Bevorzugte Festschmierstoffe sind temperaturabhängige Schmierstoffe aus den Gruppen der Dichalkogenide der Übergangsmetalle, z.B. Molybdänsulfid; Graphit, Graphitfluorid, hexagonales Bornitrid und Metallhalogenide, oxidische und fluorhaltige Verbindungen der Übergangs- und Erdalkalimetalle, z.B. Bleioxid, Molybdänoxid, Wolframoxid, Zinkoxid, Cadmiumoxid, Kupferoxid, Titandioxid, Calciumfluorid, Strontiumfluorid, Ceriumfluorid, Antimontrioxid, Lithiumfluorid, Natriumfluorid; und weiche Metalle, z.B. Blei, Indium, Silber und Zinn.

[0028] Bevorzugte Wachse sind natürliche, tierische, pflanzliche, mineralische, fossile, synthetische oder teilsynthetische Wachse und Mischungen davon, wie z.B. Stearin, Kerzenwachs oder Paraffin.

Gelenk

[0029] Das erfindungsgemäße Gelenksystem umfasst mindestens ein Gelenk. Das mindestens eine Gelenk steht in Kontakt mit dem Gleitfilm. Der Gleitfilm befindet sich vorteilhafterweise im Gelenkspalt. Durch die Erhöhung der Viskosität des Gleitfilms wird das mindestens eine Gelenk arretiert. Durch die Absenkung der Viskosität des Gleitfilms wird das mindestens eine Gelenk beweglich. Das Gelenk wird dadurch innerhalb seiner konstruktionsbedingten Grenzen frei beweglich. Durch die Kombination von Gelenk und Gleitfilm ist es möglich, die Beweglichkeit reversibel zu limitieren. Ferner ist die Arretierung des Gelenks auch dann gewährleistet, wenn z.B. elektronische Steuerungssysteme nicht mehr reagieren, da die Struktur durch den Gleitfilms mechanisch in ihrer Position fixiert ist, d.h. passiv ihre Position halten kann.

[0030] In einer Ausführungsform weist das Gelenk mindestens ein Heizelement auf, mittels derer der Gleitfilm erwärmt werden kann, sodass sich dessen viskoelastischen Eigenschaften verändern. Die Temperaturregelung kann mittels eines Mikrocontrollers und Temperatursensoren, z.B. DS18B20, erfolgen.

[0031] Ein erfindungsgemäßes Gelenkssystem mit zwei oder mehr Gelenken kann als kinematische Kette betrachtet werden. Bevorzugt kann ein erfindungsgemäßes Gelenkssystem bzw. eine kinematische Kette mehr als 3, mehr als 4, mehr als 5 Gelenke umfassen. Besonders bevorzugt umfasst das erfindungsgemäße Gelenkssystem 2-20 Gelenke, ganz besonders bevorzugt 3-10 Gelenke, am meisten bevorzugt 4-8 Gelenke. Durch die Kombination mehrerer Gelenke lassen sich beliebige ein- bis dreidimensionale kinematische Ketten mit unabhängig voneinander einstellbaren kontrollierbaren Freiheitsgraden erstellen.

[0032] Die Gelenke können unabhängig voneinander ausgewählt sein aus der Gruppe bestehend aus

Kugelgelenk, Scharniergelenk, Drehgelenk, Schubgelenk, Schraubgelenk, Plattengelenk, Sattelgelenk, Eigelock, Zapfengelenk und Drehschubgelenk.

[0033] Das Gelenksystem und/oder die Gelenke können aus Kunststoff, Holz, faserverstärkten Kompositen, Kohlenstofffasern, Metall, Metalllegierungen oder Keramikwerkstoffen hergestellt sein.

[0034] Geeignete Kunststoffe sind alle Arten von Kunststoffen mit für die jeweilige Anwendung ausreichender mechanischer Belastbarkeit. Hierzu gehören duroplastische und thermoplastische Kunststoffe sowie Elastomere. Besonders geeignet sind Thermoplaste aus den Gruppen der Acrylnitril-Butadien-Styrole (ABS), Polyamide (PA), Polylactate (PLA), Polymethylmethacrylate (PMMA), Polycarbonate (PC), Polyethylenterephthalate (PET), Polyolefine (PE, PP), Polystyrole (PS), Polyetheretherketone (PEEK) und Polyvinylchloride (PVC) sowie Mischungen daraus. Weiterhin besonders geeignet sind belastbare Duroplaste aus den Gruppen der Polyester, Polyurethane, Cyanat-Ester, Aminoplasten und Phenoplasten.

[0035] Geeignete Metalle sind alle Arten von Metallen, die entsprechend der mechanischen Anforderungen des Gelenks zu bearbeiten sind und über für die jeweilige Anwendung geeignete mechanische Eigenschaften verfügen. Besonders geeignet sind Metalle mit kontrollierbarer und spezifischer Wärmeleitfähigkeit. Hierzu zählen Aluminium, Kupfer, Silber, Gold, Platin, Eisen, Chrom, Zink, Zinn, Cäsium, Wolfram, Osmium, Lithium und Blei.

[0036] Geeignete Metalllegierungen sind alle Arten von Eisen- und Nichteisen-Legierungen mit für die jeweilige Anwendung ausreichenden mechanischen und thermischen Eigenschaften. Besonders geeignet sind Stahl, Messing, Bronze, Amalgame, Goldlegierungen sowie Formgedächtnislegierungen und Heuslersche Legierungen. Weiterhin geeignet sind alle Arten von Pseudolegierungen, welche durch Sinter-Prozesse beispielsweise im 3D-Druck entstehen.

[0037] Geeignete Keramikwerkstoffe sind alle Keramiken mit für die jeweilige Anwendung geeigneten mechanischen und thermischen Eigenschaften. Insbesondere geeignet sind alle Arten von anorganischer, nicht-metallischer und polykristalliner technischer Keramik aus den Gruppen der Oxid-Keramiken, z.B. Aluminiumoxid, Magnesiumoxid, Zirkoniumoxid, Titandioxid und Mischungen davon (Mullit, Piezokeramiken). Weiterhin geeignet sind Dispersionskeramiken (ZTA) und Nicht-Oxid-Keramiken (Carbide, Nitride, Boride, Silicide).

[0038] Geeignete Kompositwerkstoffe sind alle Arten von keramischen, polymeren, mineralischen, biologischen und metallischen Verbundwerkstoffen,

welche für die jeweilige Anwendung geeignete mechanische Eigenschaften aufweisen. Besonders geeignet sind Teilchenverbundwerkstoffe, Faserverbundwerkstoffe aus den Gruppen der Kurzfaserverbundwerkstoffe, Langfaserverbundwerkstoffe oder Endlosfaserverbundwerkstoffe (CFK, GFK, AFK, NFK, WPC), Schichtverbundwerkstoffe, Durchdringungsverbundwerkstoffe sowie Strukturverbundwerkstoffe.

[0039] In einer erfindungsgemäßen Ausführungsform können das Gelenksystem und/oder die Gelenke mittels 3-D-Druckverfahren hergestellt werden. Ferner können die Gelenke Gelenkkapseln und Gelenkpfannen umfassen. Die Gelenkkapseln können beispielsweise einen Durchmesser von 20 -40 mm haben, vorzugsweise 25-35 mm aufweisen. Die Gelenkkapseln können vorzugsweise Kupfer oder Silber enthalten oder aus Kupfer oder Silber bestehen. Zur Verbesserung der Haft- und Gleiteigenschaften des Gleitfilms können Gelenkkapsel und Gelenkkopf unterschiedliche Rauigkeiten aufweisen.

[0040] Das erfindungsgemäße Gelenksystem kann mindestens einen Aktuator umfassen.

[0041] Das erfindungsgemäße Gelenksystem kann mindestens einen Sensor umfassen.

[0042] Das erfindungsgemäße Gelenksystem kann eine Umhüllung und/oder Abdichtung umfassen, welche ein Auslaufen des Gleitfilms verhindern.

Verwendung

[0043] Das erfindungsgemäße Gelenksystem kann vorzugsweise in der Robotik, der Fahrzeugtechnik, dem Schiffbau, der Produktionstechnik und der Luft- und Raumfahrttechnik, z.B. dem Flugzeugbau, verwendet werden. Insbesondere eignet es sich für die Verwendung in morphenden Strukturen im Bereich der Aerodynamik, z.B. Flugzeuge oder Rotoren von Windkraftanlagen.

[0044] Das erfindungsgemäße Gelenkssystem eignet sich insbesondere zur kurz- und mittelfristigen Anpassung der dreidimensionalen Form von Flugzeugteilen, wie z.B. Tragflächen und Leitwerken. Adaptive Strukturen, wie sie das erfindungsgemäße Gelenkssystem ermöglicht, führen in diesen Anwendungsbereichen zu erhöhter Treibstoffeffizienz, verringertem Lärm und verbesserter Flugsicherheit. Das erfindungsgemäße Gelenksystem erfüllt in hohem Maße die Anforderungen an solche Flugzeugteile, wie die Einfachheit durch direkt bewegte Elemente, Redundanz durch viele gleichwertige Verbindungselemente und Ausfallsicherheit durch Aufrechterhaltung der Funktion auch nach Beschädigung eines Elements. Dabei wird insbesondere die Kontrolle der Beweglichkeit der Elemente ermöglicht.

[0045] Die adaptive Verformbarkeit des erfindungsgemäßen Gelenkssystems ermöglicht dessen Verwendung in Rotorblättern, Turbinenschaufeln oder Schrauben von konventionellen Schiffsantrieben und einen damit verbundenen Effizienzgewinn. Insbesondere ermöglicht das erfindungsgemäße Gelenkssystem die Optimierung der Blattgeometrie im laufenden Betrieb.

[0046] Sämtliche Kombinationen von bevorzugten Bereichen oder von Ausführungsformen sind besonders bevorzugt.

Figurenliste

Fig. 1 zeigt die Querschnittsansicht der CAD-Konstruktion des in Beispiel 1 verwendeten Prototypens samt zweier Kugelgelenke 1, die die Gelenkarme 3 verbinden. Die Kugelgelenke 1 bestehen jeweils aus den Gelenkkapseln 5 und den Gelenkköpfen 7 und sind mit den Manschetten 9 gesichert. Zwischen den Gelenkkapseln 5 und den Gelenkköpfen 7 befindet sich jeweils der Gelenkspalt 11, der mit dem Gleitfilm gefüllt ist.

[0047] Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden detaillierten Beschreibung von Ausführungsbeispielen.

Ausführungsbeispiele

Beispiel 1 - Gelenkssystem mit zwei Gelenken

Gelenkssystem

[0048] Das Kernelement von Beispiel 1 ist ein in einer Gelenkkapsel befindlicher Gleitfilm, welcher seine viskoelastischen Eigenschaften durch Zuführung von Wärme ändert. Diese Materialschicht verbindet die Gelenkkapsel mit dem Gelenkkopf. Über Heizelemente und Temperatursensoren kann eine gezielte Temperatur in der Gelenkkapsel eingestellt werden. Die veränderte Viskosität des Gleitfilms führt zu einer Beweglichkeit des Gelenkes, indem Kopf und Kapsel aneinander abgleiten können. Das Aushärten des Gleitfilms führt zu einer passiven Arretierung des in der Kapsel befindlichen Kopfes. Der Einsatz eines Materials veränderbarer Viskosität, als verbindendes Element des Gelenkes, ermöglicht es somit, die Beweglichkeit reversibel zu limitieren. Über Seilzüge kann der Prototyp gebeugt oder gestreckt werden.

[0049] Der Prototyp gemäß Beispiel 1 besteht aus zwei unabhängig voneinander kontrollierbaren Kugelgelenken, welche die Verbindung zu drei rohrförmigen Strukturen bilden. Diese werden im Folgenden als Gelenkarme bezeichnet. Die Köpfe des Kugelgelenks werden über Manschetten am Heraus-

rutschen aus der Gelenkkapsel gehindert. Die Bauteile wurden in Autodesk Fusion 360 (Autodesk Inc., Version 2020) konstruiert.

[0050] Die STL-Dateien der Elemente wurden mit der Open Source Slicing-Software Ultimaker Cura (Version 4.5) für den 3D-Druck vorbereitet. Gedruckt wurde mit dem Creality Ender 3 Pro (Shenzhen Creality 3D Technology Co., LTD) mit einer Düsenweite von 0,4 mm. Das Filament ist PLA (Polylactat), welches mit einer Schichthöhe von 0,16 mm bei einer Temperatur von 200 °C gedruckt wurde.

[0051] In den Gelenkarmen 2 und 3 wurden die Gelenkkapseln und damit die funktionellen Komponenten des Prototyps eingelassen. Die Heizelemente wurden für ein gleichmäßiges Erhitzen der Kapsel von hinten an die Kapsel verlegt. Im Gelenkarm 1 wurde das Heizelement entlang der Zylinderachse von hinten bis zur Kapsel geführt. Aufgrund der Position des Gelenkarmes 2 wurde das Heizelement durch eine Aussparung in das Innere des Zylinders verlegt. Beide Gelenkarme haben außerdem noch an gleicher Position eine Aussparung, um einen Zugang zur Gelenkkapsel für die Temperatursensoren zu ermöglichen. Die Gelenkarme verfügen über jeweils zwei Laschen, um einen Seilzug entlang der Längsachse zu führen. Dieser wurde am Gelenkarm 3 befestigt und ermöglicht die Bewegung des Armes.

[0052] Die Gelenkkapseln können den Gleitfilm durch Heizelemente in verschiedene Viskositätszustände bis zum festen Zustand bringen. Aufgrund seiner Wärmeleitfähigkeit sind die Gelenkkapseln aus Kupfer. Der mittlere Gelenkspalt beträgt 2 mm. Kupferrohre (Länge: 2 und 3 cm) dienen als Fassung der Heizelemente und Temperatursensoren und erhöhen die Kontaktfläche der Heizelemente und der Sensoren. Das Kupferrohr des Heizelementes wurde mit einer Lötlampe (CFH Kartuschenlötgerät Lötmeister PZ 5000, toom Baumarkt GmbH, Köln, Deutschland) an die konvexe Seite der Kupferhalbkugel gelötet. Das Kupferrohr der Temperatursensoren wurde mit Sekundenkleber (UHU blitzschnell MINIS, Dirk Rossmann GmbH, Burgwedel, Deutschland) an der Kupferkapsel befestigt. Die Sensoren sollen bestmöglich die Temperatur innerhalb der Kupferkapsel erfassen, weshalb sie nicht direkt an den Heizelementen platziert wurden. Zur weiteren Verbesserung der Wärmeübertragung zwischen den Kupferrohren und Heizelementen und Temperatursensoren wurden diese mit Wärmeleitpaste gefüllt. Die Gelenkarme 1 und 2 wurden mit einem Multifunktionswerkzeug (Dremel 3000, Dremel, Racine, USA) bearbeitet, um die Kupferkapseln passgenau in die Aussparung der Gelenkarme einsetzen zu können. Zusammengesetzt hat der Aufbau eine Länge von 33,5 cm. Ausgehend von einer gestreckten Position kann jedes Gelenk limitiert

durch die Manschette in einem 360° Radius um 240° knicken.

Elektronik und Ansteuerung

[0053] Jedes Heizelement wurde über MOSFETs an das Netzgerät und einen Arduino angeschlossen. Über diese Verschaltung konnte ausreichend Strom fließen, um die Heizelemente zu erhitzen ohne den Arduino zu beschädigen. Über das Gate des MOSFET wurde der Stromfluss reguliert und so eine Modulation zur Regelung der Temperatur ermöglicht. Das Netzgerät hatte eine eingestellte Spannung von 10 Volt, die Stromstärke in Ampere variierte durch den PID-Regler. Die Temperatursensoren wurden mit dem Arduino über eine Steckplatine verschaltet.

[0054] Der Arduino bildete die zentrale Ansteuerung der elektronischen Bauteile. Über den Mikrocontroller wurden mittels angeschlossener Temperatursensoren und Heizelemente gewünschte Temperaturen eingestellt und geregelt. Die Temperatursensoren maßen kontinuierlich die aktuelle Temperatur. Durch eine Pulse Width Modulation wurde eine Temperatur über die MOSFETs eingestellt. Diese konnte in den seriellen Monitor des Arduino eingegeben werden, welche dann mit der aktuellen Temperatur verglichen wurde. Um die Temperaturkurve zu glätten, wurde ein PID-Regler implementiert.

Gleitfilm mit kontrollierbaren viskoelastischen Eigenschaften

[0055] Insgesamt wurden in Beispiel 1 drei verschiedenen Materialien verwendet, die als Gleitfilm die Gelenkarme verbinden. Diese Materialien sind:

- Coolmorph (Thermoworx Ltd, Ardrossan, Großbritannien), angegebener Schmelzpunkt 42 °C;
- Polymorph (Thermoworx Ltd, Ardrossan, Großbritannien), angegebener Schmelzpunkt 62 °C; und
- Kerzenwachs (Rustikstumpen weiß 80 x 68 mm, Dirk Rossmann GmbH, Burgwedel, Deutschland), angegebener Schmelzpunkt ca. 45 °C.

[0056] In Vorversuchen wurde geprüft ob die Materialien für die Anwendung in der Gelenkkapsel geeignet sind. Im ausgehärteten Zustand konnten Belastungen des Armes von 5 N gehalten werden.

[0057] Für die Charakterisierung des Gelenkes wurden jeweils alle drei Materialien untereinander verglichen. Um eine Vergleichbarkeit der Experimente zu gewährleisten, wurden alle Materialien mit dem gleichen Gelenk, zwischen Gelenkarm 2 und 3, getestet. Das Befüllen der Kapsel und der Zusammenbau des Gelenkarmes waren ebenfalls identisch. Der Gelenk-

arm 2 wurde in einer vertikalen Position in einem Bohrschraubstock (Güde GmbH & Co KG, Wolpertshausen, Deutschland) befestigt und anschließend die Kapsel zur Hälfte mit dem jeweiligen Material befüllt. Die Gelenkkapsel wurde kontinuierlich erhitzt bis die Polymere transparent und viskos waren, beziehungsweise das Wachs verflüssigt war. Danach wurde der Kopf 2 in die Kapsel gesetzt und die Heizelemente ausgestellt. Nach dem Aushärten der Materialien wurde der Gelenkarm 3 montiert. Alle Versuche wurden jeweils mit den drei ausgewählten Materialien durchgeführt. Der Stichprobenumfang für jedes getestete Material betrug $n=10$.

Temperatur-Zeit-Winkel-Messung

[0058] Verschiedene Parameter zur Charakterisierung des Gelenkes im Prozess des Aufheizens wurden ermittelt. Der Gelenkarm wurde in einem Bohrschraubstock horizontal arretiert und so positioniert, dass der Gelenkarm 3 über der Tischkante abknicken konnte. Ein auf dem Gelenkarm 3 befestigter Laserpointer (R400 Presenter, Logitech international S.A., Apples, Schweiz) gab durch die synchrone Bewegung, die Position des Armes wieder. In zwei Metern Entfernung traf der Laser auf eine vertikale Leinwand (Holzplatte) mit befestigtem metrischem Maßband. Eine Kamera (iPhone 8, 30 fps, Apple Inc, Cupertino, Kalifornien, USA) nahm den Laser auf der Leinwand auf.

[0059] Über den seriellen Monitor des Arduino wurden dabei die Temperatur, die Zeit, und der Output des Arduino aufgenommen. Der Gelenkarm 3 wurde einschließlich des Laserpointers mit einem Gewicht von 100 g belastet. Aufgrund der Hebelarme $r_1 = 3,2$ cm und $r_2 = 9,5$ cm ergab sich durch den allgemeinen Momentensatz ein Moment von 0,07 Nm.

[0060] Die Temperatur wurde kontinuierlich auf 50 °C erhöht bis das Gelenk vollständig abknickte. Die Aufnahme der Kamera lief während dieser gesamten Zeit. Anschließend wurde das Gelenk in die gestreckte Ausgangsposition zurückgesetzt und die Heizelemente ausgestellt. Ein erneuter Versuch wurde erst nach Abkühlen der Temperatur auf unter 21 °C durchgeführt.

[0061] Der Output des Arduino korrelierte linear mit dem fließenden Strom. Der maximale Output von 255 entsprach einer Stromstärke von 0,66 Ampere. Der Energieverbrauch des Gelenkes mit einem bestimmten Material wurde definiert als die benötigte Energieleistung, um das Gelenk von 21 °C zum vollständigen Abknicken zu bringen. Die elektrische Leistung wurde über $P = U \cdot I$ berechnet. Dabei ist P die elektrische Leistung in Watt und berechnet sich aus der Spannung U in Volt und der Stromstärke I in Ampere. Die Leistung über die Zeit und damit der ermittelte Energieverbrauch wurde über $J = P \cdot s$

berechnet. Die verbrauchte Energie in Joule berechnet sich aus der Leistung P in Watt und der Zeit in Sekunden.

Ergebnisse

[0062] Es konnte festgestellt werden, dass die Temperatur über der Zeit linear ansteigt, solange die Gelenkkapsel kontinuierlich geheizt wird. Die folgenden Mittelwerte und Standardabweichungen beziehen sich auf die Temperatur bei einer Winkeländerung von $0,5^\circ$.

[0063] Coolmorph ($39,9 \pm 0,7^\circ\text{C}$) knickt innerhalb eines schmaleren Temperaturbereichs als Polymorph ($46 \pm 2,2^\circ\text{C}$) und Wachs ($29,2 \pm 2,3^\circ\text{C}$) ab. Im Vergleich knickt Polymorph in den höchsten Temperaturbereichen ab, Wachs in den niedrigsten. Der Temperaturbereich von Coolmorph liegt dazwischen.

Kriechversuch

[0064] Zur Überprüfung, ob ein Kriechverhalten der Materialien bei bestimmten Temperaturen vorlag, wurde die Winkeländerung des Gelenkes über einen Zeitraum von einer Stunde getrackt. Dafür wurde der gleiche Versuchsaufbau und auch die gleiche Auswertung der Daten wie zur Temperatur-Zeit-Winkel-Messung genutzt.

[0065] Statt einer kontinuierlichen Temperaturerhöhung wurden konstante Temperaturen eingestellt. Diese Temperaturen wurden gewählt, um einen Sicherheitsbereich zu definieren, in dem bei einer kontinuierlichen Temperatur kein Abknicken des Gelenkes stattfindet. Bestimmt wurden diese als 90%, 95% und 98% der Temperatur bei der eine Winkeländerung von $0,1^\circ$ festzustellen ist. Die Temperatur bei der Winkeländerung von $0,1^\circ$ wurde wie bei der Temperatur-Zeit-Winkel-Messung bestimmt. Danach wurde die Temperatur kontinuierlich um 1°C erhöht bis 10 Messungen aufgenommen wurden. Die Kamera nahm alle 30 Sekunden ein Bild auf.

Ergebnisse

[0066] Bei Coolmorph und Polymorph wurde keine Winkeländerung gemessen. Ebenso konnte bei der 90% Messung bei Wachs keine Änderung festgestellt werden. Nur bei Wachs konnten größere Winkeländerungen von bis zu 120° festgestellt werden, die Polymere bewegten sich in Bereichen $< 0,2^\circ$.

[0067] Die in der vorstehenden Beschreibung, in den Ansprüchen sowie in den Zeichnungen offenbarten Merkmale können sowohl einzeln als auch in jeder beliebigen Kombination für die Verwirklichung der Erfindung in ihren verschiedenen Ausführungsformen wesentlich sein.

Patentansprüche

1. Adaptives Gelenksystem, das mindestens ein Gelenk umfasst, das zumindest zwei starre Körper und einen Gelenkspalt umfasst, wobei das Gelenk in dem Gelenkspalt und in Kontakt mit den zwei starren Körpern einen Gleitfilm mit kontrollierbaren viskoelastischen Eigenschaften umfasst und wobei die Beweglichkeit des Gelenks mittels des Gleitfilms reversibel einstellbar ist, indem die Viskosität des Gleitfilms zwischen mindestens einer ersten Viskosität und einer zweiten Viskosität, die höher als die erste Viskosität ist, einstellbar ist, und das Gelenksystem in seiner Position passiv haltbar ist.

2. Adaptives Gelenksystem nach Anspruch 1, das zwei oder mehr Gelenke umfasst.

3. Adaptives Gelenksystem nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die viskoelastischen Eigenschaften des Gleitfilms mittels der Steuerung der Zuführung von thermischer, chemischer oder elektrischer Energie, vorzugsweise thermischer Energie, oder mittels Magnetfelder, elektrischer Felder, elektromagnetische Strahlung (UV-Licht), Kristallisationsprozessen, Gasdruck, hydraulischem Druck oder des pH-Werts des Gleitfilms kontrollierbar sind.

4. Adaptives Gelenksystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Gleitfilm inhomogen im Gelenk verteilt ist.

5. Adaptives Gelenksystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Gleitfilm mit kontrollierbaren viskoelastischen Eigenschaften ein thermoplastisches Polymer, ein Öl, ein Fett, ein Wachs, eine Suspension, ein Festschmierstoff, flüssiges Metall oder Mischungen davon umfasst.

6. Adaptives Gelenksystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Gleitfilm mit kontrollierbaren viskoelastischen Eigenschaften ausgewählt ist aus der Gruppe bestehend aus Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polyamide (PA), Polycaprolacton (PCL), Polylactat (PLA), Poly(meth)acrylat, wie z.B. Polymethylmethacrylat (PMMA), Polycarbonat (PC), Polyethylenterephthalat (PET), Polyolefin, insbesondere Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP), Polystyrol (PS), Polyetheretherketon (PEEK) und Polyvinylchlorid (PVC) und Mischungen davon, oder mindestens ein elektroaktives Polymer (EAP) umfasst, vorzugsweise ein ionisches EAP oder ein elektronisches EAP.

7. Adaptives Gelenksystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Gleitfilm mit kontrollierbaren viskoelastischen Eigenschaften mindestens ein Schmieröl, vorzugsweise ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus mineralischen Ölen, synthetischen Ölen, tierischen Ölen, pflanzli-

chen Ölen und Mischungen davon, oder mindestens ein Schmierfett, vorzugsweise ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Natriumfetten, Lithiumfetten, Calciumfetten, Aluminiumfetten, Bariumfetten und Komplexfetten, oder mindestens einen Festschmierstoff, vorzugsweise ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Dichalkogeniden der Übergangsmetalle, Graphit, Graphitfluorid, hexagonalem Bornitrid, Metallhalogeniden, oxidischen und fluorhaltigen Verbindungen der Übergangs- und Erdalkalimetalle, und Metalle, die weicher als die umhüllende Gelenkstruktur sind, oder mindestens ein Wachs umfasst, vorzugsweise ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus mineralischen Wachsen, synthetischen Wachsen, tierischen Wachsen, pflanzlichen Wachsen, natürlichen Wachsen, fossilen Wachsen, teilsynthetischen Wachsen und Mischungen davon.

8. Adaptives Gelenksystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, das mindestens ein Heizelement umfasst.

9. Adaptives Gelenksystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das mindestens eine Gelenk unabhängig voneinander ausgewählt ist aus der Gruppe bestehend aus Kugelgelenk, Scharniergelenk, Drehgelenk, Schubgelenk, Schraubgelenk, Plattengelenk, Sattelgelenk, Eigelgelenk, Zapfengelenk und Drehschubgelenk.

10. Verwendung des adaptiven Gelenksystems nach einem der vorhergehenden Ansprüche in der Robotik, der Fahrzeugtechnik, dem Schiffbau, der Produktionstechnik oder der Luft- und Raumfahrtstechnik, insbesondere zur kurz- und mittelfristigen Anpassung der dreidimensionalen Form von Flugzeugteilen, wie z.B. Tragflächen und Leitwerken, oder in Rotorblättern, Turbinenschaufeln oder Schrauben von konventionellen Schiffsantrieben.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

