WHITEPAPER

Der Antrieb hinter der Bewegung

Frameless-Torquemotoren für humanoide Roboter – Ihr Leitfaden für eine erfolgreiche Auswahl und Implementierung

© PAL Robotics

Inhalt

Die nächste Evolutionsstufe in der Robotik: Humanoide Roboter 3

Marktchancen und das Wettrennen um die Serienreife 3

Aktuatoren: Die Antriebskraft hinter der Bewegung 4

Faktoren zur Auswahl von Motoren für humanoide Roboter-Gelenke 4

Weitere relevante Faktoren für die erfolgreiche Fertigung von humanoiden Robotern 9

Ausblick 11

Humanoider Roboter TALOS von PAL Robotics. © PAL Robotics

Die nächste Evolutionsstufe in der Robotik: Humanoide Roboter

Humanoide Roboter sind mit ihrer Nachahmung des Menschen die nächste Evolutionsstufe in der Robotik und üben eine besondere Faszination aus. Humanoide Roboter haben eine menschenähnliche Form, sind ausgestattet mit gelenkigen Gliedmaßen – so genannte Freiheitsgrade, können durch die Steuerung mit Künstlicher Intelligenz autonom arbeiten und verfügen über Feinmotorik sowie Maschinelles Lernen.

All diese Fähigkeiten ermöglichen es, sie sehr flexibel einzusetzen, was im Vergleich zu Cobots und Industrierobotern aktuell allerdings noch mit höheren Kosten einhergeht. Humanoide Roboter sind zudem normalerweise modular aufgebaut, um Wartung, Reparatur und Nachrüstung zu erleichtern.[1]

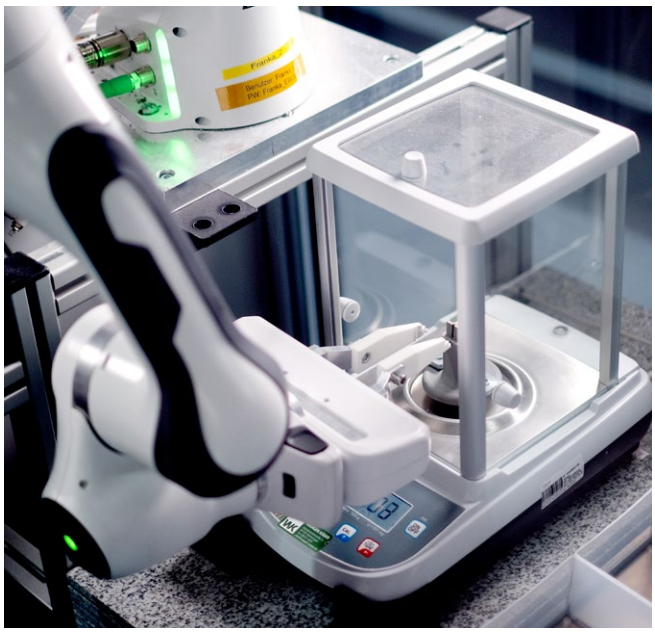
Marktchancen und das Wettrennen um die Serienreife

Das Wettrennen um den ersten serienreifen, humanoiden Roboter ist eines der spannendsten Trendthemen der Tech-Welt. Laut Analysen der Investmentbank Goldman Sachs könnte der Markt für humanoide Roboter bis 2033 ein Volumen von 35 Milliarden US-Dollar erreichen. Diese beeindruckende Zahl unterstreicht das immense Potenzial dieser Technologie für die Zukunft.[2]

Weltweit arbeiten derzeit sehr viele Unternehmen an humanoiden Robotern für den kommerziellen Einsatz. Viele davon fragen hierfür die Servomotoren von TQ an.

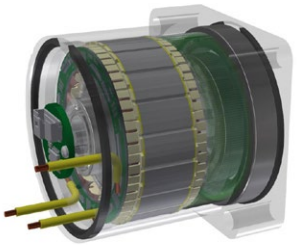
Eine Marktanalyse der Management-Beratung Horváth von März 2024 prognostiziert, dass die ersten menschenähnlichen Roboter bereits 2025 serienmäßig für den industriellen Einsatz produziert werden könnten.

Besonders vielversprechend erscheinen ihre Einsatzmöglichkeiten in Produktion und Logistik, insbesondere bei arbeitsintensiven, physisch anspruchsvollen und repetitiven Aufgaben.[3]



Cobots und Industrieroboter eignen sich für simple, repetitive Aufgaben.

Der Ursprung der RoboDrive-Technologie liegt im Institut für Robotik und Mechatronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Durch die große Hohlwelle und das rahmenlose, leichte Design sind die Motoren prädestiniert für Robotik-Antriebsmodule.



Rotationsaktuator für ein Robotergelenk

Aktuatoren: Die Antriebskraft hinter der Bewegung

Was die Hardware betrifft, sind so genannte Aktuatoren von zentraler Bedeutung für die Ausführung menschenähnlicher Bewegungen. Diese fungieren als robotisches Äquivalent zu menschlichen Gelenken und Muskeln: antriebstechnische Bauteile, die Bewegungen in einem System – rotierend oder linear – ermöglichen. Aktuatoren bestehen aus einer Kombination von Getrieben, Motoren, Sensoren, Kugellagern und Encodern. Je mehr Freiheitsgrade benötigt werden, desto mehr Aktuatoren sind erforderlich. Aktuell sind humanoide Roboter, die sich in der Entwicklung befinden, in der Lage, zwischen 16 und 60 Freiheitsgrade zu realisieren. Mit fortschreitender Entwicklung werden humanoide Roboter langfristig gesehen eine noch größere Anzahl von Aktuatoren benötigen, um ihnen eine höhere Bewegungsfreiheit für immer neue und komplexere Einsatzszenarien zu ermöglichen. Die Hardware-Konzepte können hierbei, je nach spezifischen Anforderungen an die Bewegungsfreiheit, das Design der Hände, die Sensorempfindlichkeit und andere Faktoren, erheblich variieren.[4]

Der humanoide Roboter-Körper besteht hauptsächlich aus den Aktuatoren und unterstützenden Systemen wie Sensorik, Batteriepacks, Strukturteilen und Kühlsystemen. Der nächste Abschnitt gibt einen Überblick über die Anforderungen, die eine humanoide Roboter-Applikation an ihren Motor stellt, um der menschenähnlichen Bewegung gerecht zu werden.[4]

Faktoren zur Auswahl von Motoren für humanoide Roboter-Gelenke

Humanoide Bewegungen lassen sich durch elektrische, hydraulische oder pneumatische Antriebssysteme steuern. Derzeit ist es die vorherrschende Praxis, in jedem Gelenk spezifische Aktuatoren bestehend aus Getriebe, Torquemotor, Encoder und Motorsteuerung zu verwenden.

Torquemotoren sind hochpolige, elektrische Servomotoren mit hohem Drehmoment bei gleichzeitig relativ kleinen Drehzahlen.

Im Folgenden werden die systemtechnischen Anforderungen aufgezeigt, die für die Motorauswahl bei einem humanoiden Roboter entscheidend sind.

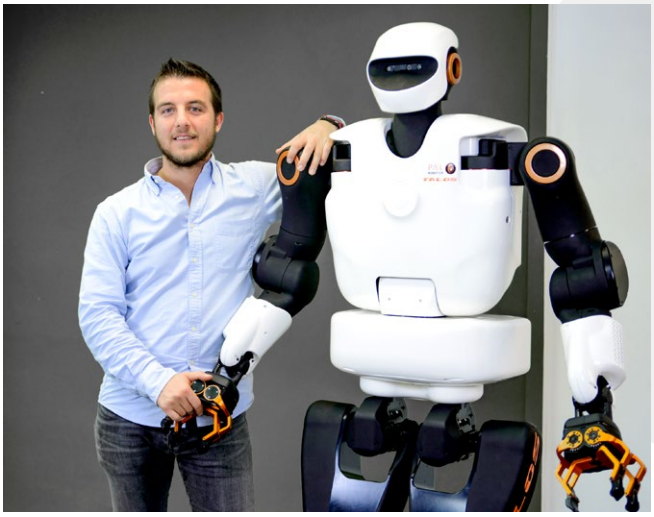
Präzision

Damit der Roboter kontrollierte, fließende und vielseitige Bewegungen ausführen kann, ist die Präzision des Motors äußerst wichtig. Je präziser der Antrieb ist, desto direkter wird die Verbindung zwischen der Bewegung des Roboters und dem „Sehprozess", bestehend aus Sensorik und Kameratechnik. Jeder Gelenkpunkt ist durch dreidimensionale Vektoren definiert. Für die höchstmögliche Präzision ist es sehr wichtig, dass die Motoren, gerade in der Summe von mehreren Gelenkpunkten, immer die „richtige" Position einnehmen. Denn selbst minimale Abweichungen in den einzelnen Gelenken, wie etwa Hüfte, Knie und Fußgelenk, akkumulieren sich sonst insgesamt zu gravierenden Fehlpositionierungen.

Die Präzision eines elektrischen Motors steigt dabei mit der sogenannten Polpaarzahl, die ein wesentlicher Faktor für das Verhalten des Motors ist, weil sie direkte Auswirkungen auf Steuerung, Positionierung und Regelbarkeit des Motors hat.

Beim Design ihrer Frameless-Servomotoren legt die TQ-Group ein besonderes Augenmerk darauf, eine hohe Polpaarzahl zu realisieren. Auch TQ-Kunde PAL Robotics weiß, dass die Präzision für den Markterfolg eines humanoiden Roboters ein ausschlaggebender Faktor ist.

Die Präzision eines elektrischen Motors steigt mit der Polpaarzahl.



Chief Technology Officer Luca Marchionni, PAL Robotics mit TALOS.
© PAL Robotics

„TQ-Elektromotoren bieten eine sehr präzise Positions- und Drehmomentregelung über ein breites Spektrum an Bedingungen, von niedriger Geschwindigkeit und hohem Drehmoment bis hin zu hoher Geschwindigkeit und niedrigem Drehmoment. Dies ist entscheidend für die natürlichen, fließenden Bewegungen, die von humanoiden Robotern erwartet werden. Diese Gleichmäßigkeit trägt besonders in Umgebungen, in denen Roboter mit Menschen interagieren, zur Akzeptanz der Technologie bei."

(v. l. n. r.) Robert Vogel und David Hastings, TQ-Group mit Jonathan Hurst, Chief Robot Officer, Agility Robotics auf der Robotics Summit 2024

Reaktionszeit und Dynamik

Die Umwelt, in der sich Menschen und folglich auch humanoide Roboter bewegen, ist volatil und verändert sich ständig. Auf jede Veränderung der Umwelt (z. B.: Ein Roboter tritt in ein nicht vorhersehbares Loch oder der Untergrund gibt nach) muss der Motor entsprechend reagieren können bzw. dementsprechend angesteuert werden. Damit ein humanoider Roboter wie ein Mensch flexibel und schnell auf Veränderungen in der Umwelt reagieren kann, sind eine ausgezeichnete dynamische Kontrolle und Ansteuerbarkeit sowie eine schnelle Reaktionszeit ausschlaggebend.

Die Dynamik eines Elektromotors beschreibt die Fähigkeit des Motors, auf Veränderungen in der Belastung oder Steuerung schnell und präzise zu reagieren. Sie bezieht sich im Wesentlichen auf das Verhalten des Motors unter wechselnden Bedingungen und wie gut er in der Lage ist, Geschwindigkeit, Position oder Drehmoment zu ändern.

Man spricht hier auch von einem dynamischen Gleichgewicht. Dabei gilt es, die Stabilität des Roboters aufrechtzuerhalten, während er sich bewegt (z. B. beim Gehen, Laufen oder Ausführen komplexer Aufgaben). Dies erfordert ausgefeilte Steuerungsstrategien, um sich sofort an schnell ändernde Bedingungen anzupassen. Agility Robotics, ein Hersteller humanoider Roboter, zeigt in diesem Video anschaulich, wie relevant Beine mit Gelenken für den Einsatz von Humanoiden sind.

Wie erreicht ein elektrischer Aktuator nun diese hohe Reaktionszeit und Dynamik? Um in Echtzeit reagieren zu können, werden für eine kurze Zeit sehr hohe Drehmomente benötigt, um beispielsweise die Fußbewegung schnell zu antizipieren und an das Loch im Boden anzugleichen. Dieses Drehmoment ist dann für einen kurzen Augenblick um ein Vielfaches erhöht. Dies wird auch als Überlastfähigkeit eines Servomotors und als Spitzendrehmoment bezeichnet, also das maximale Drehmoment, das ein Motor kurzfristig erzeugen kann.

Der Spitzendrehmoment der TQ-Motoren ist etwa um ein Dreifaches höher als ihr Nenndrehmoment bzw. der konstante Wert, der langfristig erreichbar ist. Konkret erreichen die TQ-Motoren einen Spitzendrehmoment im zweistelligen Newtonmeterbereich (Nm) und verfügen damit über eine markführende Überlastfähigkeit.

Jonathan Hurst von Agility Robotics zeigt in diesem Video für welche Einsatzgebiete Beine bei humanoiden Robotern sinnvoll sind.

Durch die einzigartige Wicklungstechnologie erreichen TQ-Motoren sehr geringe Kupferverluste.

Effizienz und Energieverbrauch

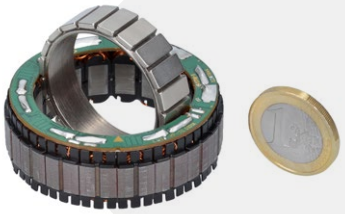
Die Effizienz, also wie hoch die Verlustleistung über die Akkulaufzeit ist, entscheidet darüber, wie lange ein batteriebetriebener humanoider Roboter arbeiten kann. Dabei gilt: Höchste Effizienz, aufgrund von geringem Kupferverlusten, verlängert die Akku-Laufzeit.

Kupferverluste beschreiben Verluste, die durch den elektrischen Widerstand der Wicklungen in einem Motor verursacht werden. Sie werden in Form von Wärme abgegeben und sind eine der Hauptverlustquellen in elektrischen Maschinen. Motoren mit einer hohen Verlustleistung brauchen viel Strom, was die Akkulaufzeit verkürzt und damit die Arbeitsdauer begrenzt.

Das bedeutet, dass der Faktor Effizienz bei einem mobilen, humanoiden Roboter eine wesentlich bedeutendere Rolle spielt als bei einem kollaborativen Roboter (Cobot), der am Stromnetz angeschlossen ist. Für den Einsatz von humanoiden Robotern in der Praxis, sei es in der Industrie, im Gesundheitswesen oder im Einzelhandel, ist eine hohe Effizienz mit ausschlaggebend für den kontinuierlichen Einsatz der Roboter. Die TQ-Torquemotoren haben einen Wirkungsgrad von 90 Prozent oder höher und erreichen besonders geringe Kupferverluste in Watt. In Datenblättern werden diese Werte typischerweise in Effizienz bzw. in Kupferverlusten bei Raumtemperatur angegeben.

Drehmomentdichte und Kompaktheit

Die Drehmomentdichte eines Elektromotors ist ein Maß dafür, wie viel Drehmoment der Motor pro Volumeneinheit oder pro Gewichtseinheit erzeugen kann. Sie ist ein entscheidender Faktor für die Leistungsfähigkeit und Kompaktheit eines Motors und insbesondere für diejenigen Anwendungen wichtig, bei denen das Gewicht ausschlaggebend ist – zum Beispiel in der Robotik.



Die TQ-Motoren sind besonders leicht und leistungsdicht. Damit können Robotik-Hersteller Gewicht und Bauraum bei gleichbleibender Leistung massiv reduzieren.

Das Gesamtgewicht eines humanoiden Roboters wird maßgeblich vom Gewicht der Achsen bestimmt. Je leichter die Motoren in den Achsen sind, desto geringer ist auch das Gesamtgewicht, was sich positiv auf Akku-Laufzeit, Traglast und Dynamik auswirkt. Das Gewicht wird in der Branche oft als „muskulär" bezeichnet.

Zusätzliches Gewicht und ein „muskulärer" Körperbau ist für einen humanoiden Roboter von Nachteil, denn ein schlanker Humanoider ist dynamischer, schneller und kann vor allem höhere Traglasten transportieren.

Der TQ-Kunde PAL Robotics nennt diesen Gewichtsvorteil als einen wesentlichen Faktor, weshalb sich der Hersteller für die Innenläufer-Motoren (ILM) von TQ entschieden hat.

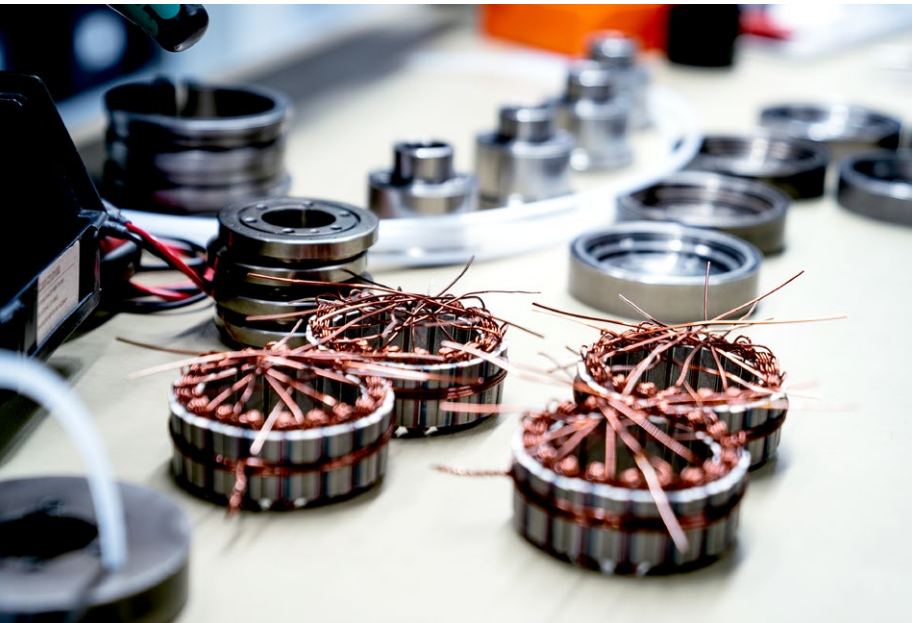
„Wir haben uns für ILM-Motoren entschieden, weil sie ein unübertroffenes Verhältnis von Drehmoment zu Gewicht aufweisen."
Luca Marchionni, CTO, PAL Robotics

Luca Marchionni CTO des 2004 gegründeten Robotik-Unternehmens aus Spanien erläutert: „Wir haben uns für ILM-Motoren entschieden, weil sie ein unübertroffenes Verhältnis von Drehmoment zu Gewicht aufweisen. Die verfügbaren Motorgrößen und -konfigurationen passten perfekt zu den Anforderungen, die wir bei der Konstruktion der verschiedenen Gelenke des Roboters vom Fußgelenk bis zum Hals hatten. [...] Die rahmenlosen Servokits von TQ ermöglichen es uns, die mechatronische Integration auf ein Minimum zu reduzieren, denn eines unserer Hauptziele ist es, das Volumen und Gewicht unserer Roboter so gering wie möglich zu halten. Ein zusätzlicher Vorteil der Motoren ist ihre große Hohlwelle, die sehr wichtig ist, um Kabelbäume intern zu verlegen und ein sauberes Roboter-Design zu erreichen."

Gemeinsam mit dem DLR gelang es TQ eine neue Motorentechnologie zu entwickeln mit höchster Leistungsdichte und höchstem Drehmoment bezogen auf Gewicht und Bauraum.

Die TQ-Motoren sind im Vergleich zu anderen Motoren besonders drehmomentdicht, das heißt sie können bei gleicher Größe das doppelte Drehmoment bzw. bei halber Größe das gleiche Drehmoment erzielen. Das erreicht TQ durch eine einzigartige Wicklungstechnologie, die den Kupferfüllfaktor im Vergleich zu herkömmlich gewickelten Elektromotoren maximiert. TQ ist derzeit der einzige Motoren-Entwickler am Markt, der dank bestimmter Fertigungsschritte in der Manufaktur die physikalischen Möglichkeiten komplett ausschöpft: In der jeweiligen Motorgröße ist es nicht möglich, noch mehr Kupfer unterzubringen. TQ-Motoren haben somit den höchsten Kupferfüllfaktor am Markt.

Das kompakte Design des Antriebs ermöglicht eine effiziente Raumausnutzung und Gewichtsreduzierung, senkt den Schwerpunkt des Roboters und verbessert die Stabilität. Ein Beispiel: In einem betriebsamen Lager in einer dicht besiedelten, städtischen Umgebung oder aber an einem Fließband ermöglicht es ein kompaktes Design dem Roboter, sich in engen Räumen zurechtzufinden und beim Manövrieren durch Menschenmengen das Gleichgewicht zu halten.



TQ-Motoren haben den höchsten Kupferfüllfaktor am Markt. In der jeweiligen Motorgröße ist es physikalisch nicht möglich mehr Kupfer unterzubringen.

Robustheit und Zuverlässigkeit

Auch die Robustheit und Zuverlässigkeit der Motoren sind wichtige Faktoren für Anwendungen der humanoiden Robotik. Insbesondere in der Testphase kommt es noch häufig zu Stürzen. Ein robustes, wartungsfreies Design stellt sicher, dass die Gelenke trotz der zu durchlaufenden Lernkurve intakt und funktionsfähig bleiben. Den größten Herausforderungen müssen sich Antriebe im Weltall stellen. Selbst bei Temperaturschwankungen von -40°C bis +125°C müssen sie hier zuverlässig funktionieren. Auf der ISS (International Space Station) kam ein ILM Motor von TQ unter anderem im Arm des Roboters ROKVISS zum Einsatz und führte präzise Arbeiten in der Schwerelosigkeit durch – über fünf Jahre hinweg in Hunderten von Tests, stets zuverlässig und mit höchster Leistungsfähigkeit.

Die TQ-Motoren wurden im robotischen Arm ROKVISS verwendet, welcher auf der Internationalen Raumstation ISS rund 500 erfolgreiche Tests über Jahre hinweg durchführte.

Auch in industriellen Anwendungsszenarien, zum Beispiel in einer Produktions- oder Lagerhalle kann es vorkommen, dass ein humanoider Roboter, der schwere Lasten heben muss, Gegenstände fallen lässt oder plötzlichen Stößen ausgesetzt ist. Die Robustheit der Gelenke des Roboters schützt vor Beschädigungen und gewährleistet einen kontinuierlichen und zuverlässigen Betrieb auch unter anspruchsvollen Bedingungen.

Weitere relevante Faktoren für die erfolgreiche Fertigung von humanoiden Robotern

Serienüberführung und die Integration des Motors in das Design

Im Hinblick auf das zu Beginn genannte, hohe Marktpotential, das der humanoiden Robotik prognostiziert wird, ist eine leicht umsetzbare Motorintegration in ein individuelles Design ein weiterer wichtiger Punkt, um als Roboter-Hersteller die Überführung von Prototyp in Serie zu meistern. „Mit TQ haben wir einen großartigen Partner in Bezug auf Qualität und Support gefunden. Das technische Team von TQ unterstützt uns bei der Auswahl von Motorbausätzen und der Überprüfung des Designs und trägt so dazu bei, dass die beste Integration zwischen mechanischen Teilen und Motorbausatz-Komponenten gewährleistet ist," sagt Marchionni von PAL Robotics.

TQ ist kein reiner Motoren-Lieferant, sondern integriert seine Motoren oft direkt in das kundenspezifische Gehäuse. Das heißt, dass sich TQ neben reinem Motoren-Vertrieb und kompletten Entwicklungsprojekten für gesamte Motor-Getriebe-Einheiten auch auf die Integration seiner Motoren in kundenspezifische Gehäuse spezialisiert hat.

Für einen namhaften US-amerikanischen Hersteller humanoiden Roboter realisiert TQ Motoren direkt mit einer kundenspezifischen Verschaltungsplatine, was deren Integration und Verbindung mit der Leistungselektronik erleichtert. Hier kommt dem Technologiedienstleister sein umfangreicher Erfahrungsschatz aus über 30 Jahren Elektronikentwicklung zugute.

TQ begleitet Kunden vom Motor über die Integration in das Gehäuse bis zur Entwicklung kompletter Motor-Getriebeeinheiten – alles aus einer Hand.

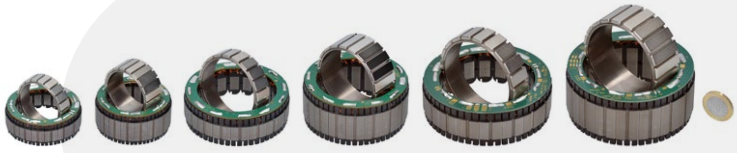
Standard-Motoren oder maßgeschneiderte Lösung?

Robotik-Hersteller stehen zudem vor der Frage, ob sie sich für einen Motoren-Hersteller entscheiden sollen, der Standard-Komponenten liefert, oder ob sie auf eine kundenspezifische Lösung setzen sollen. Bei TQ erhalten Kunden eine Auswahl an Standardgrößen, die sich auf Wunsch jedoch maßgeschneidert an die kundenspezifische Applikation anpassen lassen.

Der Vorteil der Frameless-Servokits von TQ ist dabei, dass sie in Durchmesser und ihrer sogenannten Stack-Länge modifizierbar sind und ihre Performance und Dimensionierung somit an die kundenspezifische Applikation anpassbar sind. Insbesondere bei Stückzahlen von mehr als ein paar Hundert Einheiten pro Jahr, kann eine kundenspezifische Lösung die beste Option sein. Sie ermöglicht die vollständige Kontrolle über Design, Materialien und den Herstellungsprozess.

Hardware is hard

Die Redewendung „Hardware is hard" ist bei der Entwicklung und Produktion von Roboterachsen und der dafür nötigen Komponenten treffend. Denn die Kernkompetenz einiger Hersteller humanoider Robotik findet sich eher in den Bereichen Künstlicher Intelligenz und Software, Erfahrungswerte in der Industrialisierung von Robotern und der Entwicklung von Mechatronik hingegen sind teilweise nicht vorhanden. Dazu kommt, dass die Entwicklung und Produktion eines derart komplexen Systems, wie eine Roboterachse, oft unterschätzt wird.



TQ-Frameless-Servokits sind in Durchmesser und Stack-Länge variabel

TQ ist in Deutschland einer der wenigen Anbieter, der komplette Roboter industrialisieren kann und das auch bereits unter Beweis gestellt hat.

Vor diesem Hintergrund kann es Sinn machen, auf die Technologieführer in ihrem jeweiligen Feld zurückzugreifen. So entwickelt TQ unter anderem ganze Motor-Getriebe-Einheiten für mobile Anwendungen.

Sensodrive, ein Hersteller von Robotik-Antriebsmodulen und Gewinner des Innovationspreis Bayern 2024, hilft, die Time-to-Market bei der Entwicklung von Medizinrobotern signifikant zu verkürzen.

Komplettantriebe können auch im aktuellen Wettrennen um den ersten, in Serie gefertigten humanoiden Roboter wertvolle Zeit sparen.

Sensodrive fertigt zertifizierte Komplettantriebe und verbaut dabei die Frameless-Motoren von TQ. © Sensodrive

Über den Autor

Robert Vogel ist Sales & Business Development Manager im Bereich TQ-RoboDrive, der maßgeschneiderte Antriebssysteme für anspruchsvolle Anwendungen entwickelt und produziert. Robert Vogel ist Wirtschaftsingenieur und seit über 20 Jahren in den Branchen Automatisierung und Robotik tätig.

TQ-Standort in Inning am Ammersee

Das **Technologie-Unternehmen TQ-Group** bietet das komplette Leistungsspektrum von der Entwicklung, Produktion und Service bis hin zum Produktlebenszyklusmanagement. Die Dienstleistungen umfassen dabei Baugruppen, Geräte und Systeme inklusive Hardware, Software und Mechanik. Kunden können bei TQ sämtliche Leistungen modular als Einzelleistungen wie auch im Komplettpaket entsprechend ihrer individuellen Anforderungen beziehen. Standardprodukte wie fertige Mikrocontrollermodule (Minimodule), Antriebs- und Automatisierungslösungen ergänzen das Dienstleistungsspektrum.

Die TQ-Group beschäftigt an den Standorten Delling, Seefeld, Inning, Murnau, Peißenberg, Peiting, Durach im Allgäu, Wetter an der Ruhr, Chemnitz, Leipzig, Fontaines (Schweiz), Shanghai (China) und Chesapeake (USA) insgesamt rund 2.000 Mitarbeiter.

Ihr Kontakt zu TQ

Sie möchten mehr darüber erfahren, wie TQ Sie bei Frameless-Torquemotoren unterstützen kann?

robert.vogel@tq-group.com

+49 176 10930915

tq-robodrive.com

Quellenangaben:

1 www.horvath-partners.com/de/media-center/studien/humanoide-roboter-inoperations

2 www.goldmansachs.com/intelligence/pages/the-global-market-for-robots-could-reach-38-billion-by-2035.html

3 www.horvath-partners.com/de/media-center/studien/humanoide-roboter-inoperations

4 Morgan Stanley & Co. LLC: Humanoids: Investment Implications of Embodied AI (June 26, 2024)

© TQ-Systems GmbH 2024 | Alle Daten dienen nur zur Information | Änderungen vorbehalten | DRVA_Whitepaper_RoboDrive_Frameless_DE_Rev0103