



## Antriebe für Flugkörper: Optimierung der Leistung

**Flugkörpersysteme werden laufend an die immer spezieller werdenden Anforderungen angepasst. Ob taktische Lenkflugkörper oder strategische Langstreckenraketen: Beide werden von einer entsprechenden Plattform abgeschossen und sollen ein bestimmtes Ziel erreichen. In der heutigen Welt sind derartige Waffen erforderlich, um nationale und globale Sicherheitsinteressen zu schützen. In den aktuell unsicheren Zeiten werden Waffen in immer größeren Mengen benötigt und müssen mehr als je zuvor innovative Funktionen aufweisen.**

Laut Prognosen wird der weltweite Markt für Raketen und Flugkörper in den nächsten Jahren voraussichtlich eine jährliche Wachstumsrate von über 6 % erfahren und 2028 einen Wert von 77,4 Milliarden USD erreichen.<sup>1</sup> Ein Großteil dieses Wachstums ist auf den Bedarf an (und die laufende Entwicklung von) neuen, fortschrittlichen Systemen wie Hyperschallwaffen zurückzuführen, deren jährliche Wachstumsrate auf 7,4 % geschätzt wird.

Flugkörper sind zwar nur für kurze Flugstrecken konzipiert, dennoch müssen die Elektromotoren, die Ruderaktuatoren steuern, Suchkopf-Aufhängungen und andere elektromechanische Systeme mit höchster Zuverlässigkeit funktionieren. Diese Systeme müssen in Sekundenschnelle einsatzbereit sein und hohe Leistungen erbringen, da sie direkt vom Standbybetrieb aus starken Stoßbelastungen, Vibrationen und extremen Temperaturen ausgesetzt werden.

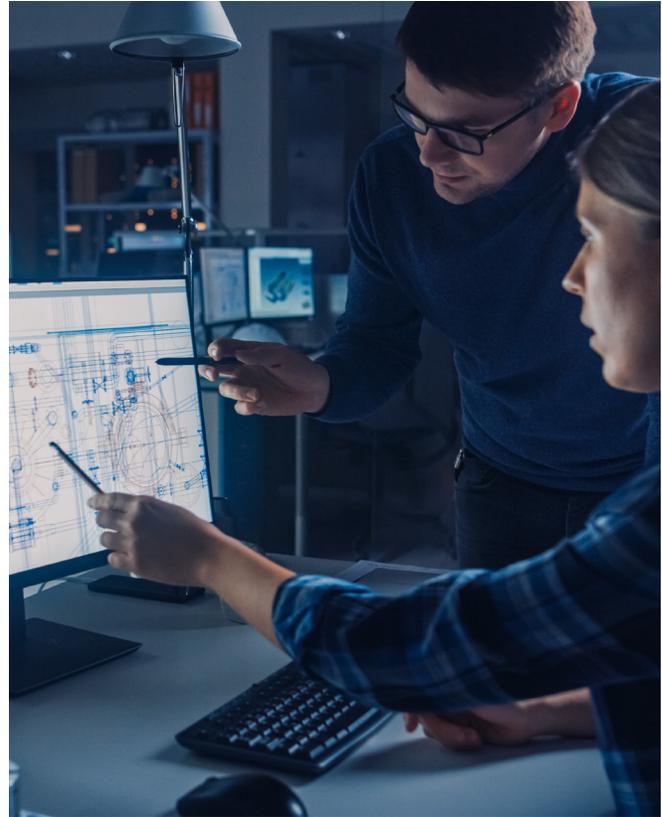
Raketentechniker und -konstrukteure stehen vor mehreren Herausforderungen: Sie müssen immer spezialisiertere Flugkörper entwerfen, der schnell wachsenden Nachfrage nachkommen und in manchen Fällen kompaktere Flugkörper für den Kampfeinsatz liefern, die ohne Leistungsverlust schneller und weiter fliegen können. Um diese Herausforderungen zu meistern, müssen Antriebssysteme so spezifiziert werden, dass sie die für jeden Verwendungszweck einzigartigen Anforderungen an Leistung, Strapazierfähigkeit und Bauweise erfüllen.

## Ein gemeinschaftlicher Prozess

Die Ingenieure von Kollmorgen arbeiten von Anfang mit den Kunden aus dem Bereich Luftfahrt und Verteidigung zusammen, um die für die jeweilige Anwendung geeignete Antriebslösungen zu entwickeln. Diese Zusammenarbeit stützt sich auf umfassende Branchenerfahrung und unser Fachwissen in den Bereichen elektromechanisches Design und Werkstoffkunde. Außerdem sind wir nachweislich in der Lage, Motoren innerhalb des für den Erfolg des Raketenprogramms erforderlichen Zeitrahmens und in den erforderlichen Mengen zu entwerfen, herzustellen, zu liefern und zu warten.

Am Anfang des kollaborativen Prozesses steht die Ermittlung und Dokumentation der technischen Anforderungen der einzelnen Anwendungen für elektrische Antriebe für den gesamten Flugkörper. Auf Basis dieser Informationen können dann Motorspezifikationen erstellt werden, einschließlich Montagefläche, Leistungsanforderungen, Komponentenmaterialien, Wärmegrenzleistung und mehr.

Hier finden Sie einen Überblick über den Spezifikationsprozess. Auch wenn diese Schritte in sequenzieller Reihenfolge dargestellt werden, so hängen sie doch eng miteinander zusammen. Da jede Entscheidung stets Auswirkungen auf die anderen Entscheidungen hat, muss bei der Entscheidungsfindung immer das große Ganze berücksichtigt werden.



## Welche Antriebssysteme benötigen Sie?

**Die größte Herausforderung – und gleichzeitig die beste Möglichkeit, den Erfolg des Programms zu gewährleisten – ist die Analyse aller Parameter, innerhalb derer die Antriebssysteme arbeiten müssen, und der erforderlichen Leistungskennzahlen. Beantworten Sie diese Fragen bereits in der Konstruktionsphase so ausführlich wie möglich.**

### Wie groß ist der verfügbare Platz?

Welche Länge und welchen Durchmesser soll der Motor haben? Beachten Sie dabei die Gesamtkonstruktion des Flugkörpers und den für die einzelnen Antriebsanwendungen verfügbaren Platz. Wie soll der Motor in das Aktuatorssystem integriert werden? Ist ein Gehäuse- oder ein gehäuseloser Motor die passendere Wahl? Bedenken Sie, dass ein Gehäusemotor einfacher zu installieren ist, ein gehäuseloser Motor, der direkt in die mechanische Konstruktion der Anwendung integriert ist, jedoch die größte Drehmomentdichte bei gleichzeitig hoher Kompaktheit bieten kann.

Ein gehäuseloser Motor eignet sich gut bei einem Wellgetriebe (Spannungswellengetriebe), einer extrem kompakten, spielfreien Antriebstechnik, die ideal für den Einsatz in Kardansystemen und anderen Raketenanwendungen ist. Ein gehäuseloser Motor bietet auch eine zentrale Durchgangsbohrung, um Komponenten wie Mikrowellen- und Schleifring-Drehgelenke unterzubringen, was eine kompaktere Konstruktion der Anwendung ermöglicht.

Wie groß muss die Durchgangsbohrung sein? Kollmorgen bietet eine umfangreiche Bandbreite an Technologien für gehäuselose Motoren, einschließlich Modellen mit einem maximalen Querschnittsverhältnis der Durchgangsbohrung, und verfügt über das notwendige Fachwissen, damit Sie die für Ihren Verwendungszweck optimalen Bauformen und Leistungskennzahlen auswählen können.

## Wie hoch ist die verfügbare Eingangsleistung?

Unabhängig davon, ob Ihr Flugkörper herkömmliche thermische Batterien oder eine alternative Energiequelle nutzt, sollten Sie wissen, welche Anwendungen diese Energiequelle nutzen und wie sich dies auf den Spannungsbereich sowie den Dauer- und Spitzenstrom auswirkt, die für die einzelnen Verwendungszwecke verfügbar sein werden. Kollmorgen verfügt über ein Angebot an Niederspannungsmotoren, die für batteriebetriebene Anwendungen entwickelt wurden und dieselbe dynamische Leistung wie Standardmotoren erbringen.

## Welche Leistungsprofile streben Sie an?

Welche Anforderungen an Geschwindigkeit und Drehmoment hat die Anwendung (sowohl im Dauerbetrieb als auch bei Lastspitzen)? Aufgrund der starken und unvorhersehbaren atmosphärischen Kräfte, die bei Unter-, Über- und Hyperschallflügen auftreten, können die Komponenten der Antriebssteuerung extremen Drehmomentspitzen ausgesetzt sein. Trotzdem müssen Kurskorrekturen sofort erfolgen können. Für Ruderaktuatoren werden Motoren benötigt, die schnell beschleunigen können – und das ohne bei hohen Geschwindigkeiten allzu stark an Drehmoment zu verlieren. Kollmorgen bietet Analysetools und Motoroptimierungen, mit denen Sie die ideale Leistungskurve für Ihre Anwendung erreichen.

## Welche thermischen Anforderungen hat Ihre Anwendung?

Flugkörper sind in der Praxis oft einem weitaus größeren Temperaturbereich ausgesetzt, als dies in typischen Fabrikumgebungen der Fall ist. Ein extremes Beispiel wäre etwa ein Hyperschallflugkörper, der in einer subarktischen Umgebung eingesetzt wird, wo am Boden  $-40\text{ °C}$  oder weniger herrschen, dessen Oberfläche aber beim Durchqueren der Atmosphäre eine Temperatur von mehreren hundert Grad erreichen kann.

Zwar sollte die Konstruktion eines solchen Flugkörpers einen Wärmeschutz für temperaturempfindliche Komponenten bieten, dennoch müssen

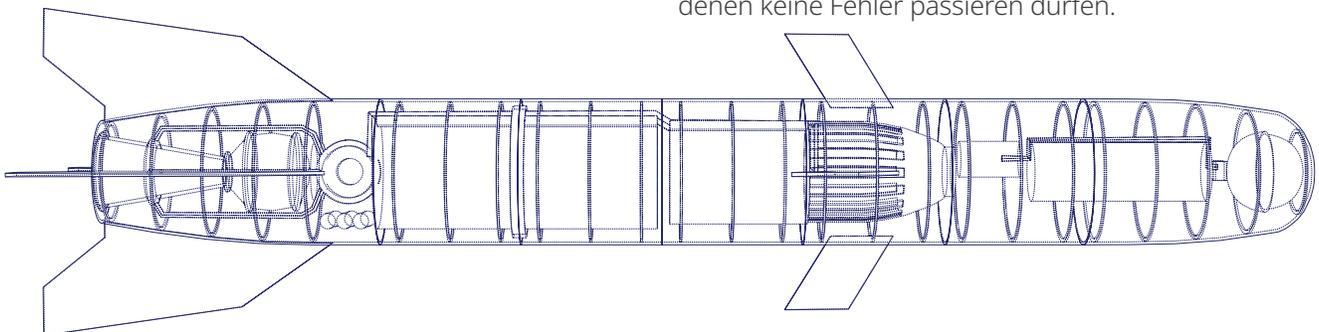
die Antriebssysteme über einen breiten Temperaturbereich zuverlässig funktionieren. Wie wirken sich diese extremen Temperaturen, wobei die im Motor entstehende Wärme noch hinzukommt, auf die Leistung aus? Kollmorgen berechnet auf der Basis Ihrer Anforderungen, wie gut ein bestimmter Prototyp bei den Temperaturextrema Ihrer Anwendung funktionieren würde. Außerdem verfügen wir über Anlagen, in denen wir die Leistung erster physischer Prototypen testen können.

## Wie hoch ist der tatsächliche Auslastungsgrad Ihrer Anwendung?

Raketentriebwerke müssen in den Sekunden oder Minuten zwischen Abschuss und Einschlag selbstverständlich einwandfrei funktionieren. Man könnte annehmen, dass aufgrund der kurzen Einsatzdauer nur ein geringes Fehlerrisiko besteht – jedenfalls im Gegensatz zu Motoren, die in Industriebereichen im Dauereinsatz sind. Es ist jedoch wichtig, den gesamten Lebenszyklus des Flugkörpers zu berücksichtigen und zu überlegen, was zwischen seinem ersten praktischen Einsatz bis hin zu seiner Verwendung oder Stilllegung passiert.

Diese Zeitspanne kann Tage, aber auch Jahrzehnte betragen. Während dieser Zeit muss der Flugkörper durchgehend in bestem Zustand sein. Auf der Grundlage einer genauen Vorstellung des Lebenszyklus ist es möglich, den richtigen Motor mit der optimalen Größe auszuwählen, ohne eine Über- oder Unterspezifikation zu riskieren. So sind beispielsweise Schiffsraketen ständig in Bereitschaft, wobei Steuerflossen, Lenksysteme und andere antriebsabhängige Komponenten regelmäßig auf ihre korrekte Funktion geprüft werden.

Wird Ihr Flugkörper täglich verwendet werden? Muss er rund um die Uhr einsatzbereit sein und sich im Standby-, Bereitschafts- oder Entriegelungsmodus befinden? Angesichts dieser Anforderungen (neben den tatsächlichen Flugbedingungen) ist zu überlegen: Wie lange müssen die Motoren voraussichtlich in Betrieb sein und dabei welche Lasten und Geschwindigkeiten bewältigen? Die Motoren von Kollmorgen sind für Anwendungsfälle konzipiert, in denen keine Fehler passieren dürfen.



## Spezifizieren Sie Motorkonstruktionen und -materialien, um Ihre Leistungs- und Umgebungsziele zu erreichen

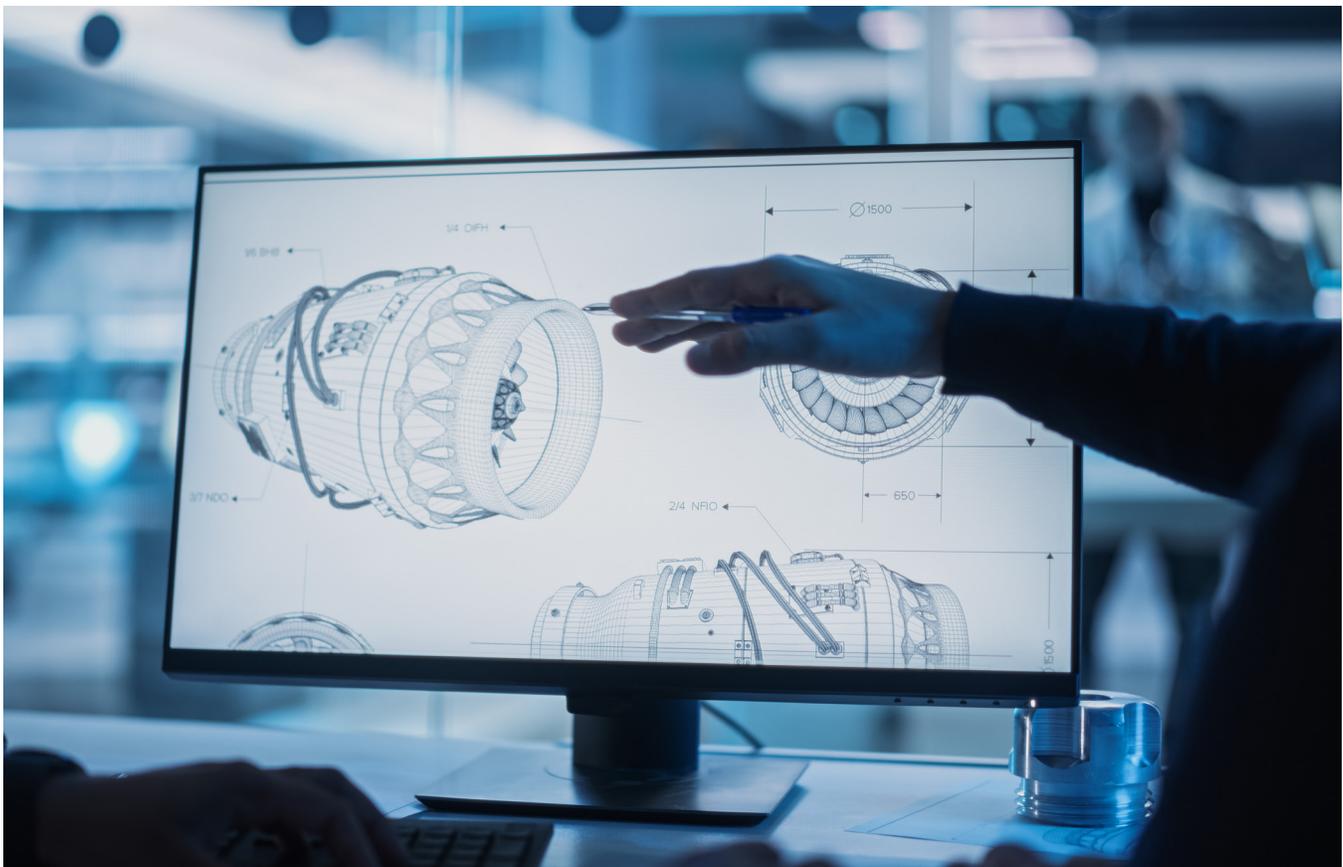
Jeder Aspekt der Motorkonstruktion und der Materialien kann optimiert werden, um bestimmte Leistungs- und Umgebungsziele zu erreichen. Flugkörperantriebssysteme haben ganz spezielle Anforderungen, da sie unter extremen Bedingungen extrem hohe Leistungen erbringen müssen. Die wichtigsten zu optimierenden Elemente sind daher das Stator-Lamellenpaket und die Wicklungen, die Rotor-Permanentmagneten sowie die Verkapselungs- und Isolierungsmaterialien.

Welche Nenntemperatur ein Motor hat, ist für den Einsatz in Flugkörpern entscheidend. Welcher Temperatur ein Motor insgesamt standhält, könnte allerdings unter der Nenntemperatur der einzelnen Komponenten liegen. So kann ein Motor mit einer Nenntemperatur von 155 °C beispielsweise aus Materialien bestehen, die für 180 °C oder sogar 200 °C ausgelegt sind. Dies bietet einen Sicherheitsspielraum, wenn der Motor über seine Nennleistung hinaus belastet wird, und gewährleistet, dass er extreme Leistungsanforderungen über einen begrenzten Zeitraum ohne Beeinträchtigung erfüllen kann. Beachten Sie auch, dass sich Nennleistungen für Motoren möglicherweise auf den Einsatz im Dauerbetrieb und nicht auf einen Raketenflug beziehen.

### Lamellen

Die Leistung des Motors hängt davon ab, ob der Hersteller hochleistungsfähige oder standardmäßige Stator-Lamellen verwendet. Die Konstruktion der Lamellen beeinflusst die Eigenschaften des magnetischen Flusses, der als Reaktion auf die wechselnden elektrischen Ströme in den Statorwicklungen erzeugt wird. Lamellen können so konstruiert werden, dass von den im Stator rotierenden Magnetfeldern produzierte Wirbelstrom minimiert wird.

Dünnere Lamellen können die Effizienz steigern und den Temperaturanstieg minimieren, indem die bei Wärmebildung auftretenden Energieverluste verringert werden – insbesondere dann, wenn hohe Schaltfrequenzen erforderlich sind, um den Motor mit höherer Drehzahl zu betreiben. Spezielle Lamellenmaterialien maximieren den Fluss, der ohne Sättigung des Stators erzeugt werden kann. Dadurch kann der Motor ein höheres Drehmoment erzeugen. Je nach den Erfordernissen der Anwendung kann eine der beiden oder auch beide dieser Techniken von Vorteil sein.



## Wicklungen

Statorwicklungen können genau abgestimmt werden, um die Motorleistung bei bestimmten Busspannungen, einschließlich bei Anwendungen mit batteriebetriebenen Raketen, sowie bei bestimmten Drehmoment- und Drehzahlwerten zu optimieren. Durch die genaue Abstimmung der Wicklungskonstruktion auf die verfügbare Eingangsleistung und die Leistungsanforderungen der Anwendung wird vermieden, dass ein zu kleiner Motor die dynamischen Belastungen im Flug nicht bewältigen kann oder ein zu großer Motor den Flugkörper unnötig sperrig und schwer macht.

## Isolierung und Permanentmagnete

Bei der Konstruktion von Flugkörpern stellt sich immer die entscheidende Frage, wie stark sich die Motoren an die von ihnen verlangten absoluten, kurzfristigen Leistungsanforderungen annähern können, bevor sie beschädigt werden. Dazu gehört die Maximierung der thermischen Zeitkonstante (d. h. die Zeit, die es dauert, bis die Temperatur des Motors 63 % des stationären Endwertes erreicht) bei gleichzeitiger Erreichung der Leistungskennzahlen des Motors, die von der Anwendung verlangt werden.

Je länger ein Motor über seine Nennleistung hinaus betrieben wird, desto größer ist die Gefahr, dass sich die Materialien abnutzen und möglicherweise ausfallen. Durch das Anwendungsszenario des Flugkörpers kann dieses Risiko verschärft, durch seine Konstruktion jedoch vermindert werden.

Wird die Rakete beispielsweise nur in der Atmosphäre bewegt oder wird sie unter Wasser gestartet, wo die Steuerflächen auf weitaus größeren Widerstand stoßen? Werden die Ruderaktuatoren, falls der Flugkörper von einem Flugzeug aus abgeschossen wird, durch Sogkräfte geschüttelt, oder gibt es eine mechanische Sicherung, die erst beim Start entriegelt wird?

Wenn Motoren über ihre Grenzen hinaus beansprucht werden, kann eine maximale Zuverlässigkeit durch die Verwendung von Lötmitteln sowie Verkapselungs- und Isoliersystemen mit höherer Einsatztemperatur und in manchen Fällen auch von Magneten mit höherer Einsatztemperatur erreicht werden. Spezielle Dauermagnet-Legierungen können ebenfalls das Drehmoment von Motoren erhöhen, ohne dass dessen Wärmegrenzleistung überschritten wird.

## Arbeiten Sie mit einem Experten für Antriebe zusammen

Die Auswahl des richtigen Partners ist ebenso wichtig wie die der richtigen Antriebstechnologie. Kollmorgen arbeitet mit Ihnen zusammen, um Ihre genauen Anforderungen in der ersten Designphase zu ermitteln. Anschließend erhalten Sie die technische Unterstützung, die Sie benötigen, um Produktauswahl, Dimensionierung, Konfiguration und Optimierung zu erleichtern. Eine schnelle Prototypenerstellung, Lieferung und iterative Weiterentwicklung Ihrer Lösung kann potenziell Monate in Ihrem Entwicklungsprozess einsparen.

Wenn das endgültige Design fertig ist, wendet Kollmorgens AS9100-zertifizierte Produktionsstätte schlanke Fertigungsverfahren, wiederholbare Prozesse

und Qualitätskontrollen an, um schnell vom Prototypen zur Serienproduktion überzugehen. Sie können darauf vertrauen, dass wir Ihre Antriebslösungen stets pünktlich liefern und Sie während des gesamten Lebenszyklus Ihres Raketenprogramms unterstützen – sowohl in der Region als auch für die Region.

Da Kollmorgen eine Marke von Regal Rexnord ist, ermöglicht Ihnen eine Partnerschaft mit Kollmorgen auch den Zugang zum Marktführer für hochspezialisierte Komponenten in der Luftfahrt- und Verteidigungsindustrie. Regal Rexnord verfügt über Fachwissen zu praktisch jedem Teilsystem von Flugkörpern sowie über qualitativ hochwertige Lager, Dichtungslösungen, elektrische Komponenten, Getriebesysteme und vieles mehr für die Luftfahrt.

## Machen Sie Ihr Raketenprogramm startklar

[Kontaktieren Sie Kollmorgen](#), um Ihre Anforderungen und Ziele mit einem Kollmorgen-Experten für Flugkörper und andere Luftfahrt- und Verteidigungsanwendungen zu besprechen.

1 „Rocket and Missile Market“, Markets and Markets, September 2023. Änderungen vorbehalten. Es obliegt dem Anwender, die Eignung des Produkts für den vorgesehenen Verwendungszweck festzustellen. Alle Marken sind Eigentum ihrer jeweiligen Inhaber.

## Wissenswertes über Kollmorgen

Kollmorgen, eine Marke von Regal Rexnord, verfügt über mehr als 100 Jahre Erfahrung in der Antriebstechnik, die sich in den leistungsstärksten und zuverlässigsten Motoren, Antrieben, FTS-Steuerungslösungen und Automatisierungsplattformen der Branche bewährt hat. Wir liefern bahnbrechende Lösungen, die in puncto Leistung, Zuverlässigkeit und Benutzerfreundlichkeit unübertroffen sind und Maschinenbauern einen unbestreitbaren Marktvorteil verschaffen.