



Whitepaper

Weiterentwicklung der Regeln

des Massenträgheitsverhältnisses

KOLLMORGEN



Mit den heutigen schnelleren Prozessoren und fortschrittlichen Regelalgorithmen ist der allgemein anerkannte Grundsatz, den Motor auf das Lastträgheitsmoment abzustimmen, nicht länger sachdienlich.

Diese veraltete Methode erhöht die Kosten und fügt bei Anwendungen mit hohem Lastträgheitsmoment und niedrigen Anforderungen an das Dauerdrehmoment unnötige Masse hinzu. **Bei der Entwicklung einer optimal funktionierenden Lösung, die eine gute Bandbreite und Servosteifigkeit erfordert, ist die Motorträgheit nur einer von mehreren Aspekten.**

URSPRUNG DER REGEL

Man ging davon aus, dass das Massenträgheitsverhältnis für die stabile Regelung einer mit einem Servomotor verbundenen angetriebenen Last sorgt. In den 70ern, als die Hydraulik in der Werkzeugmaschinenbranche allmählich durch Gleichstrom-Servomotoren ersetzt wurde, berechneten Konstrukteure die Anforderungen an Lastträgheitsmoment, Drehmoment und Geschwindigkeit basierend auf der erwarteten Performance der Maschine. Um die nötigen Anforderungen an Drehmoment und Geschwindigkeit zu erfüllen, wurde bei der Motorauswahl der Austausch durch einen Motor mit höherem Lastträgheitsmoment oder die Verwendung eines Getriebes (was die Belastung des Servomotors durch das Trägheitsmoment verringern würde) in Betracht gezogen, falls das Verhältnis des Motor- zum Lastträgheitsmoment nicht nahezu 1:1 betrug. Dadurch wurden die Systemkosten in die Höhe getrieben. Obwohl durch die Abstimmung der Trägheitsmomente eine optimale Leistungsübertragung erzeugt wird, garantiert sie

kein effizient funktionierendes System. Idealerweise sollte die Gesamtträgheit des Systems zur Senkung des Energieaufwands reduziert werden. Ein größerer Motor erhöht jedoch die Drehmomentanforderungen zur Beschleunigung der zusätzlichen Motorträgheit.

Die Anwendungsdimensionierung umfasst neben dem Massenträgheitsverhältnis noch weitere Aspekte. Beim Übergang von hydraulischen zu elektrischen Motoren war eine schnelle Analyse der vollständigen mechanischen Systeme und Steuerungen aufgrund der verfügbaren Technologie nur eingeschränkt möglich. Die Konstruktion dieser Servosysteme mit geschlossenem Regelkreis umfasst Elemente wie den Motor, den angeschlossene Lagegeber, die Kupplung zur Last sowie die Möglichkeiten für das Tuning der Regelschleifen, die sich erheblich auf die Maschinen-Performance auswirken können. Um eine gute Leistung zu erzielen, werden die Regelschleifen so eingestellt, dass sie mit der gewünschten Bandbreite und Servosteifigkeit funktionieren,

wodurch die Antwort auf Steuerungsbefehle mit minimalem Überschwingen optimiert wird. Der Servomotor wird mithilfe von Strom-, Drehzahl- und Positionsregelschleifen durch einen Servoregler gesteuert. Jede Regelschleife wird so eingestellt, dass eine verbesserte Systemantwort durch Stabilität, schnelle Reaktionen auf Drehmoment- oder Geschwindigkeitsstöreinflüsse und gleichmäßiges Verhalten erzielt wird. In den ersten Jahren wurden bei der Einstellung der Regelschleifen diskrete Komponenten und Potentiometer verwendet, um die durch Experimente ermittelten Verstärkungsfaktoren einzustellen. Durch die eingeschränkten Analysewerkzeuge und die eingeschränkte Verarbeitungsleistung in Kombination mit Einzelkomponenten war ein enges Massenträgheitsverhältnis zwischen Motor und Last zwingend vorgegeben. Sogar nach der Verbesserung von Prozessoren und Analysetechniken und der Entwicklung digital abgestimmter Regelschleifen wurde die alte Regel eines optimalen Verhältnisses von 1:1 weiterhin aufrecht erhalten.



TECHNOLOGISCHER FORTSCHRITT

Mit dem Aufkommen der bürstenlosen Motortechnologie, hochenergetischer NeFeB-Magnete und digital abstimmbarer Regelschleifen wurde die Regel zum Massenträgheitsverhältnis mit neuen Komplikationen konfrontiert. Im Vergleich zu den bürstenbehafteten Vorgängern wurde das Motorträgheitsmoment durch auf dem Rotor befindliche Hochenergie-Magneten erheblich gesenkt. Bei Motoren, die die nötigen Anforderungen der Anwendung an Dauer- und Spitzendrehmoment erfüllten, lagen höhere Abweichungen zwischen Last- und

Motorträgheitsmoment vor. Während die digital abstimmbaren Schleifen des Servoantriebs die Anpassung von Verstärkungsfaktoren und Filtern zur Erzielung einer stabilen Steuerung wesentlich vereinfachten, führten niedrige Prozessorgeschwindigkeiten, Lagegebersysteme mit geringer Auflösung und weitere einschränkende Faktoren zur Entwicklung von bürstenlosen Motoroptionen mit höherem Trägheitsmoment.

Die gesteigerte Verarbeitungsleistung ermöglicht der komplexen Analytik die genaue mathematische

Modellerstellung und Simulierung von Systemantworten. Moderne Funktionen umfassen leistungsfähige integrierte Servoantriebs-Tools, die eine interaktive Analyse komplexer mechanischer Systeme erstellen und die Optimierung von Servosystemen vereinfachen. Die fortschrittliche Analyse ermöglicht es dem Maschinenkonstrukteur zudem, den Fingerabdruck des mechanischen Systems genau zu erfassen und auf Leistungseinschränkungen einzugehen.

Die gesteigerte Verarbeitungsleistung ermöglicht der komplexen Analytik die genaue mathematische Modellerstellung und Simulierung von Systemantworten.

NACHGIEBIGKEIT – DER FLUCH DER LÖSUNGEN MIT HOHER BANDBREITE

Bei der Nachgiebigkeit in einem mechanischen System handelt es sich um die natürliche Federkraft der Mechanismen zwischen der angetriebenen Last und dem Motor, die für verzögerte Reaktionszeiten sorgt, die wiederum zu einer reduzierten System-Bandbreite führen. Durch die Einführung einer großen Abweichung zwischen den Trägheitsmomenten, wie etwa bei einem kleinen Motor, dessen Drehmoment groß genug ist, um eine außerordentlich große Last zu bewegen, der jedoch über eine Kupplungsvorrichtung verbunden ist, wird dieses Problem verstärkt. Wenn der kleine Motor schnell Drehmoment auf die große Last aufbringt, wird die größere Last verzögert reagieren, da ein unbewegtes Objekt auch unbewegt bleiben will. Die Verzögerung ist Folge der Kupplungsnachgiebigkeit

zwischen Motor und Last, die zu einer Torsion führt, bevor sich die Last in Bewegung setzt. Wenn die Last schließlich mit dem Motor gleichzieht, übersteigt das hohe Trägheitsmoment die Zielgeschwindigkeit, woraufhin sich der kleine Motor durch Verlangsamung anpassen wird. Wenn das System nun die übermäßige Geschwindigkeit des hohen Trägheitsmoments anpasst, kommt es zu einer Unterschreitung der Zielgeschwindigkeit, auf die der kleine Motor mit einer erneuten Anpassung reagiert. Diese fortlaufende Wechselbeanspruchung führt zu Resonanzen und einem instabilen System.

Für die meisten mechanischen Systeme kann ein mathematisches Modell bzw. eine Simulation erstellt werden, bei der verschiedene

Anregungsfrequenzen verwendet werden, um die Frequenzantwort zu finden, die Resonanzen auslöst. Die Bandbreite eines Systems kann niemals die ursprüngliche Antiresonanzstelle des Systems überschreiten. Ziel der Bandbreitenerhöhung ist es, die ursprüngliche Resonanzfrequenz durch Ermittlung und Behandlung der Resonanzursache zu erhöhen. In einem nachgiebigen System sinkt die Frequenz der ursprünglichen Resonanzstelle, wenn die Nachgiebigkeit oder Federkraft steigt. Dadurch wird die Bandbreite verringert. Wenn die angetriebene Last zur Minimierung der Nachgiebigkeit direkt an den Motor gekoppelt wird, wird die Diskrepanz verschoben, wodurch die ursprüngliche Resonanzfrequenz erhöht und ein System mit höherer Bandbreite geschaffen wird.



$$J_e = \frac{J_{Mtr} J_{Last}}{J_{Mtr} + J_{Last}} \quad F_{Antires} = \sqrt{\frac{K}{J_{Last}}} \quad F_{Res} = \sqrt{\frac{K}{J_e}}$$

Durch die Vergrößerung des Verhältnisses zwischen J_{Last} und J_{Mtr} nähert sich J_e an J_{Mtr} an; wenn also J_{Mtr} sinkt, wird J_e verringert, wodurch die Resonanzfrequenz steigt. Durch die Erhöhung von K steigt auch die Frequenz. Da das Lastträgheitsmoment konstant ist, wird sich die Antiresonanzfrequenz nicht verändern, aber die Steifigkeit wird erhöht. Es ist zu beachten, dass die Frequenz (F) bei diesen Berechnungen in rad/sek angegeben wird.

ERHÖHTE STEIFIGKEIT UND REDUZIERTE SYSTEMTRÄGHEIT

Mathematische Modelle von mechanischen Systemen zeigen, dass die ultimative Lösung für eine höhere Bandbreite und ein kosteneffizientes System darin besteht, die mechanische Steifigkeit zu erhöhen und das Gesamtträgheitsmoment des Systems zu senken.

Stellen Sie sich eine Lösung mit Direktantrieb vor, bei der die Last mit einer Nachgiebigkeit

von beinahe null direkt an den Motor gekoppelt ist. Eine präzise Steuerung des Systems mit guter Bandbreite kann sogar dann erreicht werden, wenn die Abweichungen der Trägheitsmomente bei über 1000:1 liegen. Bei einem extrem steifen (unnachgiebigen) System sollte das Servosystem so dimensioniert sein, dass es das erforderliche Drehmoment bietet,

um das Systemträgheitsmoment auf die für die jeweilige Anwendung erforderliche Weise zu bewegen. Da Direktantriebslösungen nicht für alle Anwendungen geeignet sind, werden nachgiebige Elemente in das System eingefügt. Die derzeitigen fortschrittlichen Analysewerkzeuge erkennen umgehend nachgiebige Elemente, die die Systemleistung senken.

DAS BODE-DIAGRAMM

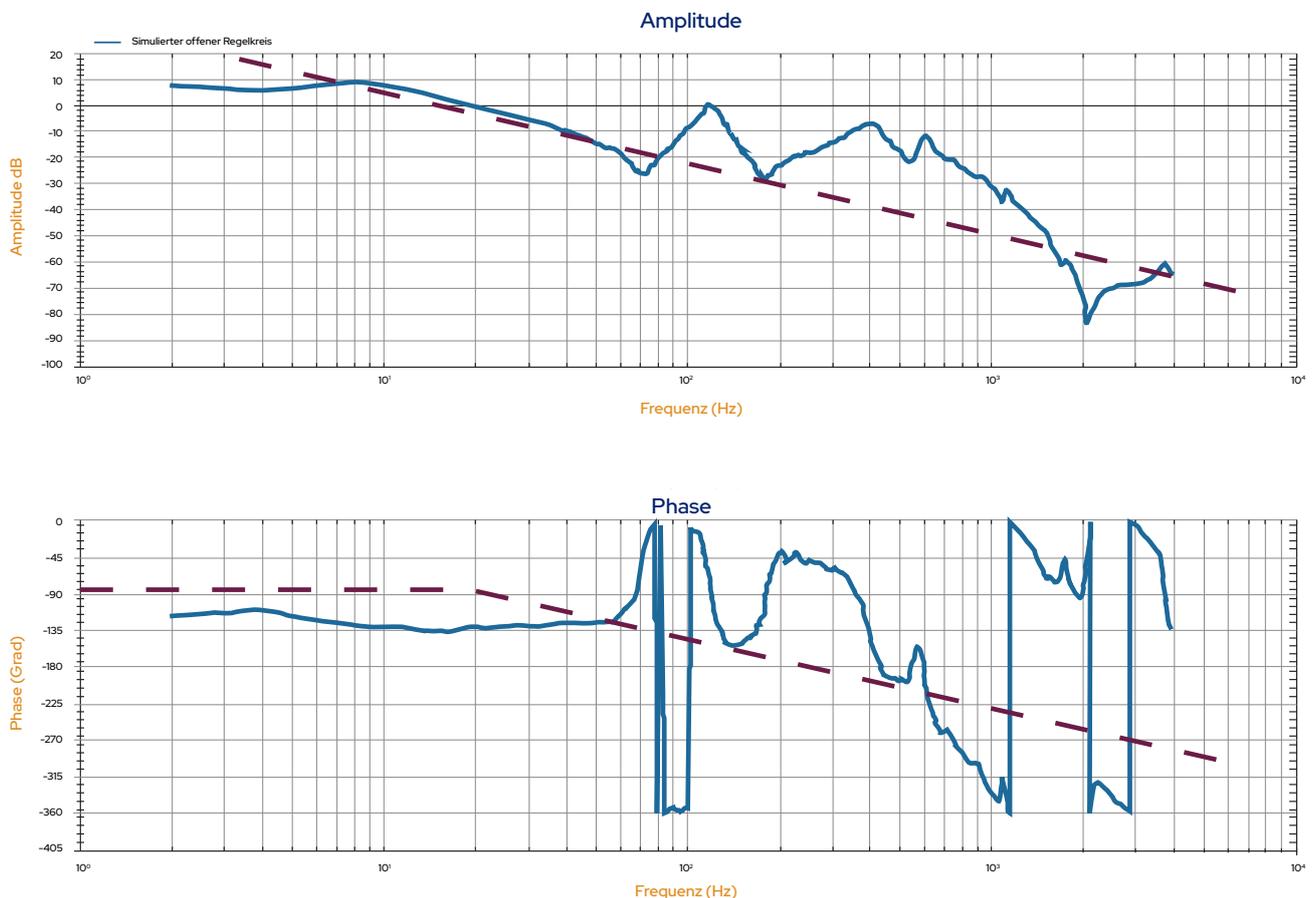
Das Bode-Diagramm ist ein leistungsstarkes Analysewerkzeug, das aus zwei Graphen besteht, die die Frequenzantwort eines eingegebenen Signals darstellen, um die Amplituden- und Phasenverschiebung eines Systems zu identifizieren. Bandbreiten-, Phasen- und Amplitudenreserven sowie

Resonanz- und Antiresonanzstellen sind nur einige Elemente, die durch ein Bode-Diagramm erfasst werden. Es gibt zudem Aufschluss über Abweichungen des Trägheitsmoments, die Anzahl der angeschlossenen Geräte sowie Reibungsniveaus und zeigt die Bandbreite offener und geschlossener Regelkreise,

Phasen- und Amplitudenreserven und Resonanzfrequenzen an. Diese Informationen sind von unschätzbarem Wert, um das System durch Anpassung der Schleifenverstärkungen, durch die Installation verschiedener digitaler Filter und durch Anpassung der Mechanik auf optimale Leistung einzustellen.

DIAGRAMM-MESSUNGEN

Bode-Diagramme bestehen aus einem Amplituden- und einem Phasengraphen und weisen die unten aufgeführten Eigenschaften auf.



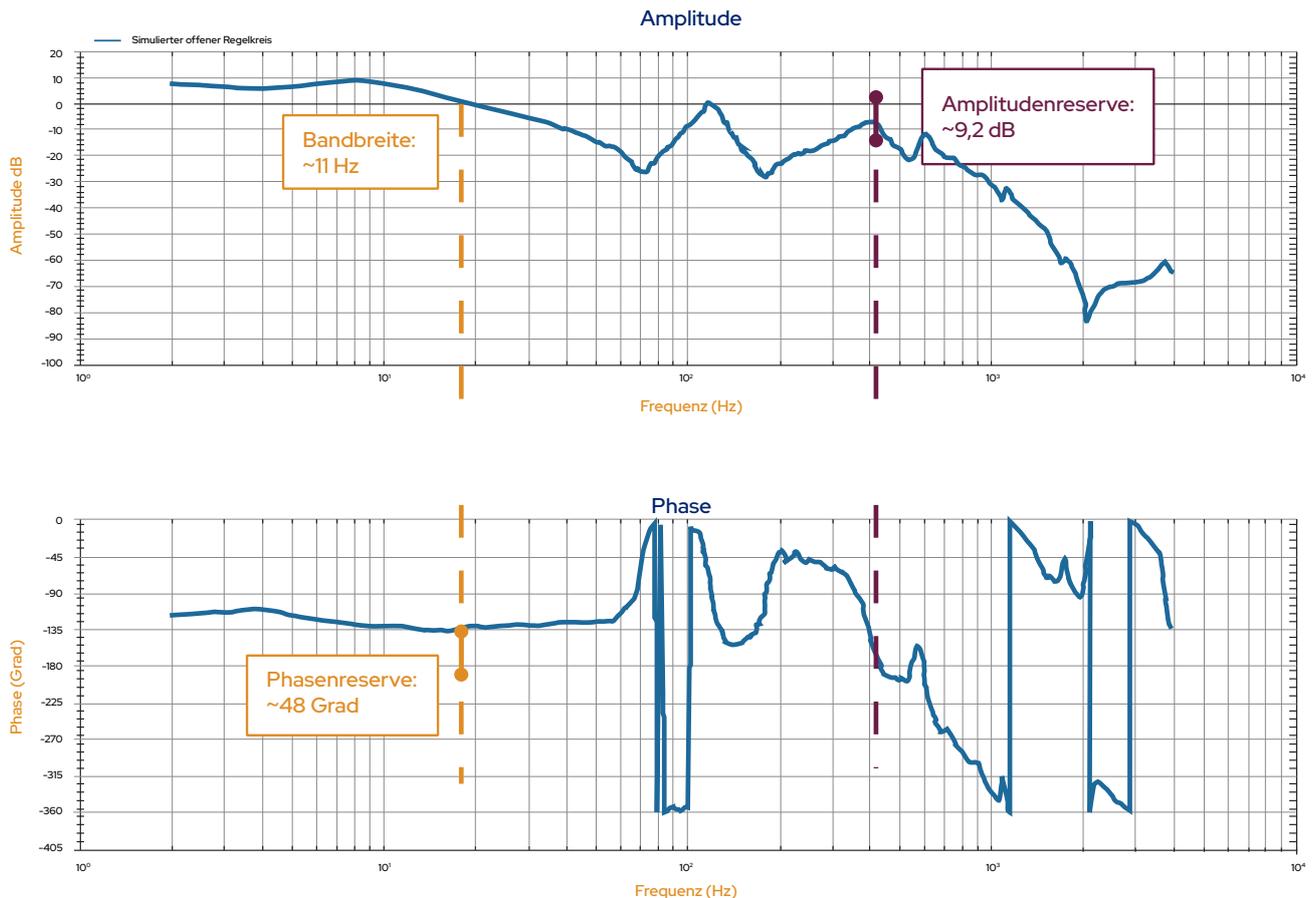
Bei einem perfekten System erwarten wir, dass der Amplitudengraph eine gerade negative Steigung von -20dB/Dekade darstellt. Der Phasengraph sollte bei -90° beginnen und ab dem Punkt, an dem die Amplitude 0 dB kreuzt, mit negativer Steigung abfallen.

BERECHNUNG DER BANDBREITE – PHASEN- UND AMPLITUDENRESERVE

Mithilfe eines gültigen Bode-Diagramms können die Bandbreite offener und geschlossener Schleifen sowie die zugehörige Amplituden- und Phasenreserve bestimmt werden. Die Bandbreite wird von der Frequenz wiedergegeben,

an der der Graph der offenen Schleife 0 dB (~11 Hz) erreicht. Die Phasenreserve ist die Anzahl der Grade über -180 Grad (~48 Grad) und die Amplitudenreserve ist die Amplitudenmessung, die einer Phase von -180 Grad (~9,2 dB) entspricht.

Das folgende Beispiel zeigt, wie durch eine verbesserte Systemsteifigkeit bei der Lösung sowohl Leistung als auch Kosten optimiert werden können – ohne Abweichungen der Trägheitsmomente.



Die Konstruktion einer 3-achsigen Laser-Schneidemaschine erfolgte unter Verwendung des Ansatzes zum Massenträgheitsverhältnis bei der Auswahl der Achsmotoren. Zur Senkung der Kosten und zur Verbesserung der Maschinenleistung wurde eine Neukonstruktion gewünscht. Eine Prüfung der Anwendungsanforderungen zeigte, dass andere Motorlösungen die Resonanzstelle des Systems anheben konnten, um so zusätzliche Amplituden- und Phasenreserven

sowie eine verbesserte Stabilität zu ermöglichen. Der ausgewählte Servomotor senkte das Gesamtträgheitsmoment des Systems, erhöhte die Achssteifigkeit mithilfe eines größeren Wellendurchmessers (höhere Resonanzfrequenz) und lieferte bei kompakterem Bau eine höhere Leistungsdichte. Die erhöhte Wellensteifigkeit senkte die Nachgiebigkeit, wodurch die Leistung verbessert wurde.

Das folgende Diagramm zeigt die verbesserte Leistung und die Kostenersparnis, die durch die Aufgabe des Ansatzes zum Massenträgheitsverhältnis zugunsten einer höheren mechanischen Steifigkeit und einem reduzierten Trägheitsmoment erzielt wurden.

ACHSE	Ursprüngliches Jm (kg-cm ²)	Neues Jm (kg-cm ²)	Lastträgheitsmoment (kg-cm ²)	Ursprüngliche Abweichung des Trägheitsmoments	Neue Abweichung des Trägheitsmoments	Anstieg in %	Kostensparnis in %
X	120	67,7	256,75	2,14	3,79	77 %	17 %
Y	17	4,58	9,56	0,56	2,09	273 %	34 %
Z	121,6	80	29,4	0,24	0,37	54 %	17 %

FAZIT

Durch moderne Servoregler mit fortschrittlichen Tuning-Funktionen und Hochleistungs-Servomotoren, die einen Lagegeber mit hoher Auflösung umfassen, muss man sich keine Sorgen mehr um

die Abweichung zwischen Last- und Motorträgheitsmoment machen. Eine angemessene Anwendungsdimensionierung und bewährte Vorgehensweisen bei der Konstruktion eines steifen

Mechanismus sorgen für ein Hochleistungs-Bewegungssystem, das zu höheren Bandbreiten, verbesserten Bewegungs- und Einschwingzeiten und einer robusten dynamischen Steuerung fähig ist.

Möchten Sie mehr erfahren?

Weitere ähnliche Themen umfassen Mechatronik, Regelungstechnik, digitale Filtertechniken, Tuning von Regelkreisen, mathematische Modellerstellung und mechanische Resonanzen. Kollmorgen bietet einen mehrtägigen Kurs über Servo-Tuning für Fortgeschrittene an, der u. a. die praktische Anwendung von Bode-Diagrammen und Abstimmungstechniken mithilfe digitaler Filter umfasst. In diesen Veröffentlichungen werden ähnliche Themen behandelt:

Whitepapers (Zum Lesen hier klicken)

[Servo-Dimensionierung und -Auswahl](#)

[Energiemanagement eines Servomotors – Auswirkungen des Trägheitsverhältnisses](#)

[Auf integrierten Modellen basierende Maschinenkonstruktion](#)

[Vereinfachter Maschinenkonstruktionsansatz für optimale Servomotorsteuerung](#)

[Der Mythos vom Massenträgheitsverhältnis](#)

Für Antworten, kooperieren Sie mit Kollmorgen.

Kollmorgen ist mehr als nur ein Zulieferer. Wir sind ein Partner, der sich Ihrem Erfolg verschrieben hat. Wir ermöglichen Ihnen den direkten Kontakt von Ingenieur zu Ingenieur, nämlich zu den Konstrukteuren, die unsere Motion-Systeme erstellen und die wissen, wie man mit speziellen Anforderungen an die Materialformung umgeht. Unser benutzerfreundliches Konstruktions-Tool hilft Ihnen dabei, Ihre Produkte online zu entwerfen, auszuwählen und zu optimieren. Dank unseres weltweiten Netzwerks an Fertigungs-, Konstruktions-, Anwendungs- und Servicezentren haben Sie immer Zugang zu verlässlicher Versorgung, Fachwissen zu Co-Engineering und persönlichem Support, den Ihnen kein anderer Partner bieten kann. Egal, ob Sie eine vorhandene Maschine aufrüsten oder eine Maschine der nächsten Generation entwickeln, die für Ihre Kunden neue Maßstäbe setzen wird: Wir können Ihnen dabei helfen, Außergewöhnliches zu konstruieren.

Sind Sie bereit herauszufinden, wozu Ihre Maschine fähig ist? Besuchen Sie www.kollmorgen.com