

## ESCON2 und es läuft rund

### Technisches White Paper

**ESCON2 ist die neue Generation von maxon Servokontrollern. Die Produktlinie setzt auf die neueste Technologie in Halbleiter- und Leiterplattenfertigung und ein innovatives Verfahren zur Hallsensor-basierenden Drehzahlregelung mit FOC-Kommutierung von BLDC-Motoren. Dies resultiert in einer maximalen Leistungsdichte und einer beispiellosen Laufruhe dank optimierter Regelleistung für Drehmoment und Drehzahl.**

### ESCON2 - Eine Produktlinie für viele Anwendungsfälle

Die ESCON2 Produktlinie besteht aus unterschiedlichen Derivaten, welche die Nutzung einer breiten Palette an bürstenlosen BLDC und bürstenbehafteten DC-Motoren erlauben und sich einfach in unterschiedlichste Anwendungen integrieren lassen.

- Die «ESCON2 Module» inklusive miniaturisierter Micro- und Nano-Varianten sind als intelligente Plug-ins für kundenseitige Elektronikboards konzipiert, das heisst die ESCON2 fügt sich platzsparend direkt ins Kundendesign ein, was bei der Entwicklung von Klein- und Handgeräten in der Industrie- und Medizintechnik unverzichtbar ist. ESCON2 deckt dabei die Motion Control Funktionalitäten wie Drehzahl-, Strom- und Drehmomentregelung ab. Die eigentliche Gerätesteuerung (d.h. das kundenseitig entwickelte Elektronikboard) kann optimal auf die Platzverhältnisse, die geforderte Anschlusstechnik und übergeordnete Zusatzfunktionen angepasst werden und muss lediglich Steckplätze für die notwendige Anzahl an ESCON2-Modulen, Micro oder Nano vorsehen.
- Die «ESCON2 Compact» Steuerungen und Varianten im Gehäuse sind anschlussfertige Lösungen, die in einem Schaltschrank oder dicht beim Motor platziert werden können. Diese Bauform wird häufig im Maschinenbau oder auch für „Fast Prototyping“ favorisiert.

Das breite Leistungsspektrum erlaubt die technisch wie kommerziell optimale Wahl einer ESCON2 Produktvariante, welche ideal zu den Motoren von maxon, Parvalux oder auch Drittanbietern passt.

- Das «ESCON2 Module 60/30» und die «ESCON2 Compact 60/30» erlauben mit 1.8 kW Dauerleistung die Ansteuerung von leistungsstarken BLDC- und DC-Motoren, wie sie häufig im Maschinenbau bei Dreh-, Fräs-, oder Schraubanwendungen aber auch in drehzahlgeregelten Radantrieben von AGVs zu finden sind.
- Für Motoren im mittleren Leistungsbereich mit mehreren hundert Watt stehen die «ESCON2 Micro 60/5» sowie die gehäuste Variante, das Module und die Compact der «ESCON2 60/12» zur Verfügung, die meist im Gerätebau und in Power-Tools ihre Anwendung finden.
- Am unteren Ende des Leistungsspektrums zielt die «ESCON2 Nano 24/2» mit 48 W Dauerleistung auf eisenlose Motoren in Handgeräten wie beispielsweise in der Medizintechnik ab, die eine hohe Präzision, Laufruhe und Energieeffizienz fordern.

Die erste Zahl in der Produktbezeichnung aller ESCON2 Produktvarianten steht jeweils für die maximale Versorgungsspannung und die zweite Zahl für den dauerhaften Ausgangsstrom ohne zusätzliche Kühlung. Für die dynamische Beschleunigung und das Abbremsen stehen kurzfristig Spitzenströme mit dem doppelten bis dreifachen Nennwert während mehrerer Sekunden zur Verfügung.

Die flexible Kommandierung und Überwachung der ESCON2 erlaubt sowohl die Verwendung simpler, vorkonfigurierter I/O-Funktionen als auch die Einbindung in CANopen Systeme basierend auf dem CiA402 „Device Profile for Drives and Motion Control“.

## Hohe Leistungsdichte und kompakte Bauform

Kunden wissen die Leistungsdichte der ESCON2 zu schätzen. Massgeblich für diesen „minimale Grösse bei maximaler Leistung“ Ansatz sind ein ausgeklügeltes thermisches Design und die eingesetzten Komponenten, welche spezifisch unter dem Gesichtspunkt einer geringen Leistungsaufnahme bei hoher Ausgangsleistung selektiert wurden. Wiederkehrende Feedbacks der Entwicklungsteams von maxon-Kunden bestätigen diese Lösung:

*„Die starke Miniaturisierung der ESCON2-Derivate erhöht die Möglichkeiten zur direkten Integration in Ein- und Mehrachssysteme enorm - auch bei engen Platzverhältnissen wie bei Handgeräten.“*

*„Trotz des kleinen Volumens sind die ESCON2-Servokontroller sehr leistungsfähig und erreichen die spezifizierten Motorströme, beziehungsweise Drehmomente und Drehzahlen auch im Dauerbetrieb bei hoher Energieeffizienz“.*



Abbildung 1:

«ESCON2 Nano 24/2» (Art.Nr. 809635) 23 × 16 × 4.5 mm, 2.5 g  
«ESCON2 Micro 60/5» (Art.Nr. 809631), 36.8 × 23.8 × 6.5 mm, 6 g  
«ESCON2 Module 60/12» (Art.Nr. 854796), 49.5 × 31 × 12.4 mm, 12 g  
«ESCON2 Module 60/30» (Art.Nr. 783722), 67 × 43 × 7.8 mm, 19 g



Abbildung 2:

«ESCON2 60/12» (Art.Nr. 854806), «ESCON2 Compact 60/12» (Art.Nr. 854801),  
«ESCON2 Compact 60/30» (Art.Nr. 783734)

## Dynamische Regelung

Ein Hauptmerkmal von maxon Motoren ist die erzielbare hohe Motordynamik und Präzision der Bewegung. Dies stellt auch hohe Anforderungen an den Servokontroller. Die ESCON2 Produktlinie ist spezifisch danach ausgelegt. So erlaubt die Kombination von reaktionsstarken Motoren und der modernen ESCON2 Regelalgorithmen hohe Beschleunigungen bei geringster Regelabweichung. Dies bedeutet in der Praxis zum Beispiel schnellere Bearbeitungszyklen und einen gesteigerten Durchsatz von Produktionsmaschinen bei hoher Qualität und Masshaltigkeit bearbeiteter Güter.

Die Abtastung der zwei analogen Eingänge und die Taktung des Drehzahlreglers mit 10 kHz (100  $\mu$ s) stellen sicher, dass ESCON2-Servokontroller strikte Ansprüche an die Latenz erfüllen können und damit auch Anwendungen mit den dynamischsten Antrieben im maxon Katalog gerecht werden.

Die Abbildung 3 zeigt den Anstieg von Drehzahl und Motorstrom (auch begrenzt durch die mechanische und die elektrische Zeitkonstante des Motors) und das präzise Ausregeln im Millisekunden-Bereich bei einem schlagartigen Sollwertsprung.

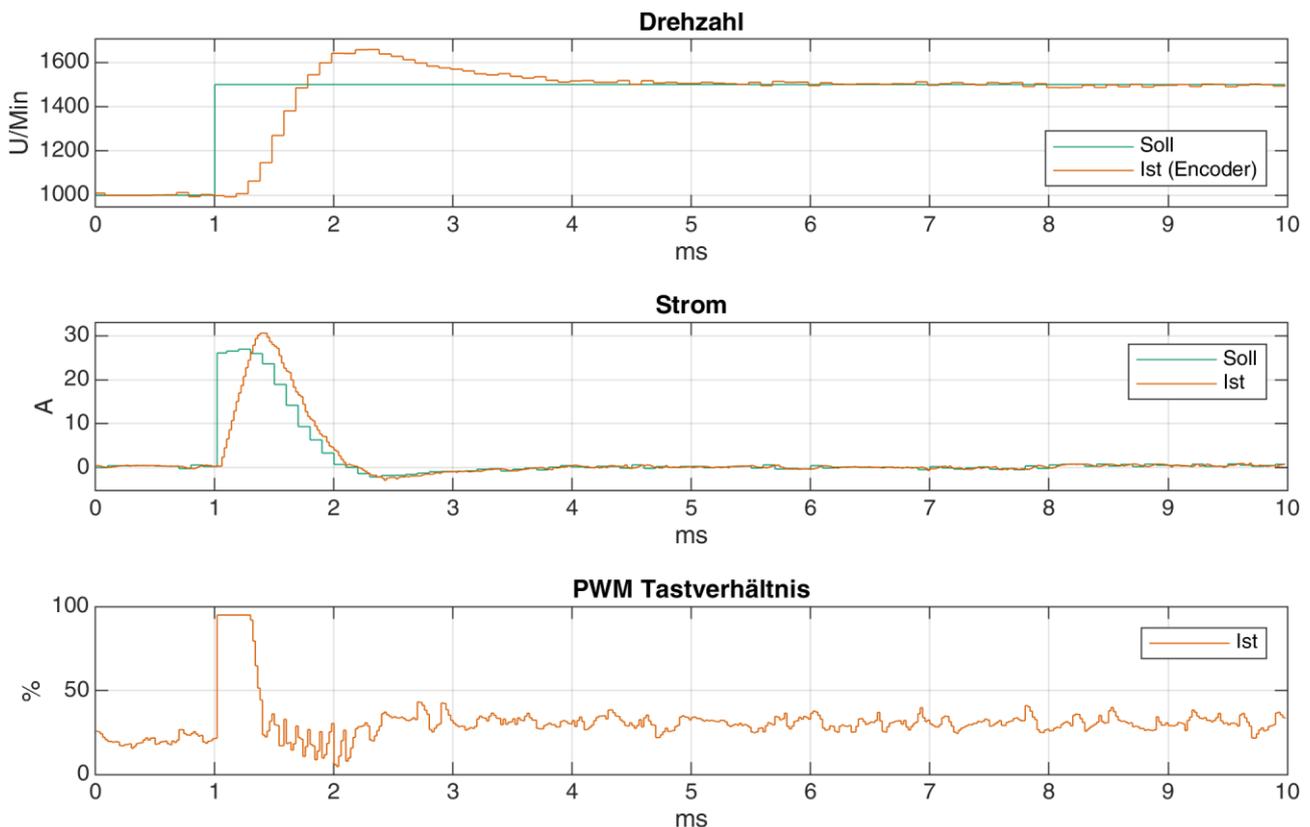


Abbildung 3: Sprungantwort bei einem auf kurze Einschwingzeit eingestellten Drehzahlregelkreis. Die limitierenden Faktoren sind die verfügbare Spannung und die elektrische Zeitkonstante der Motorwicklung. Das PWM-Tastverhältnis ist kurzzeitig gesättigt. «ESCON2 Module 60/30» mit «EC-i 52» (Art.Nr. 634043) und 4096 cpt inkrementellem Encoder.

## Grosser Drehzahlbereich bis zu 120'000 U/min

Insbesondere bei Bohrantrieben wie beispielsweise in der Dentaltechnik sind oft sehr hohe Drehzahlen gefordert. Dies setzt den Einsatz von BLDC-Motoren und einer geeigneten Ansteuerung voraus, welche die präzise elektronische Kommutierung (Umschaltung der Motorwicklungen) selbst bei höchsten Frequenzen und mehrpoligen Motoren sicherstellt. ESCON2-Servokontroller erlauben bei 1-Polpaar BLDC-Motoren bis zu 120'000 U/min an der Motorwelle. Diese Grenze liegt meist weit über der mechanischen Grenzdrehzahl von Motor und Getriebe. Der maximale PWM Duty Cycle von 95% trägt zusätzlich dazu bei, die vorhandene Versorgungsspannung optimal nutzen zu können.

## Perfekte Kommutierung und Laufruhe auch ohne Encoder

Wichtige Differenzierungsmerkmale von ESCON2 im Vergleich zu modernen als „Stand der Technik“ geltenden Servokontrollern sind die Kommutierungsperformance und die Regelgüte.

- ESCON2 nutzt eine feldorientierte Regelung (Field Oriented Control FOC) zur Erzeugung sinusförmiger Motorströme über den kompletten Drehzahlbereich unabhängig davon, ob ein Encoder oder nur Hallsensoren zur Verfügung stehen.
- Ein neues, von maxon zum Patent angemeldetes Verfahren ermöglicht eine Kommutierung und Drehzahlregelung in bisher unerreichter Güte und Laufruhe basierend rein auf Hallsignalen.

Bei BLDC-Motoren ohne Encoder stellt sich die Herausforderung, dass Hallsensoren einerseits nur eine geringe Auflösung pro Rotorumdrehung bieten und andererseits die Schaltflanken aufgrund üblicher Fertigungs-/Montagetoleranzen nicht gleichmässig symmetrisch mit 100% identischem Abstand über eine Motorwellenumdrehung verteilt sind. Letztendlich führt dies bei fast allen bekannten Servokontrollern zu einer suboptimalen Kommutierung und auch einer Varianz zwischen gemessener und effektiver Drehzahl. Das von maxon entwickelte Verfahren, welches bei der ESCON2 erstmalig zum Einsatz kommt, analysiert innert weniger Sekunden während der ersten kommandierten Bewegung die Schaltflankenverteilung der Hallsensoren und generiert daraus einen virtuellen, präzisen Sensor, bei welchem die Ungenauigkeiten der Schaltpunkte ausgeglichen sind. Dieser „perfekte“ Sensor wird im gesamten Drehzahlbereich für die Kommutierung und Drehzahlregelung genutzt. Die notwendigen Zwischenstufen für die FOC-Kommutierung innerhalb zweier Schaltflanken werden mittels Extrapolation ermittelt. Als Resultat ist bereits ab einer Drehzahl oberhalb von wenigen hundert U/min die Drehzahlkonstanz und Laufruhe des Antriebes so gut, dass häufig ein Encoder als Gebersystem vermutet wird.

Eine Aufzeichnung der relevanten Regelgrössen verdeutlicht die Wirksamkeit dieser Innovation in der Praxis am besten: In Abbildung 4 wird das Drehzahlverhalten von einem üblichen, modernen Drehzahlregler (links, blaue Kurve) mit jenem einer ESCON2 (rechts, orange Kurve) verglichen.

- Bei beiden Reglern wurde ein fixer Sollwert von 1000 U/min vorgegeben und ein eisenbehafteter maxon „EC-i 40“ Motor (Art.Nr. 449470) mit Hallsensoren als Feedback-Geber drehzahl geregelt betrieben.
- Die Drehzahl-Messung für die Beurteilung der Bewegung der Motorwelle erfolgte unabhängig über einen hochauflösenden Encoder (16384 CPT), welcher weder für die Regelung noch für die Kommutierung verwendet wurde.
- Die IST-Drehzahl der ESCON2 (rechts, orange Kurve) zeigt eine deutlich tiefere Schwankung und damit eine bessere Laufruhe entlang dem Sollwert als die Vergleichsteuerung (links, blaue Kurve).

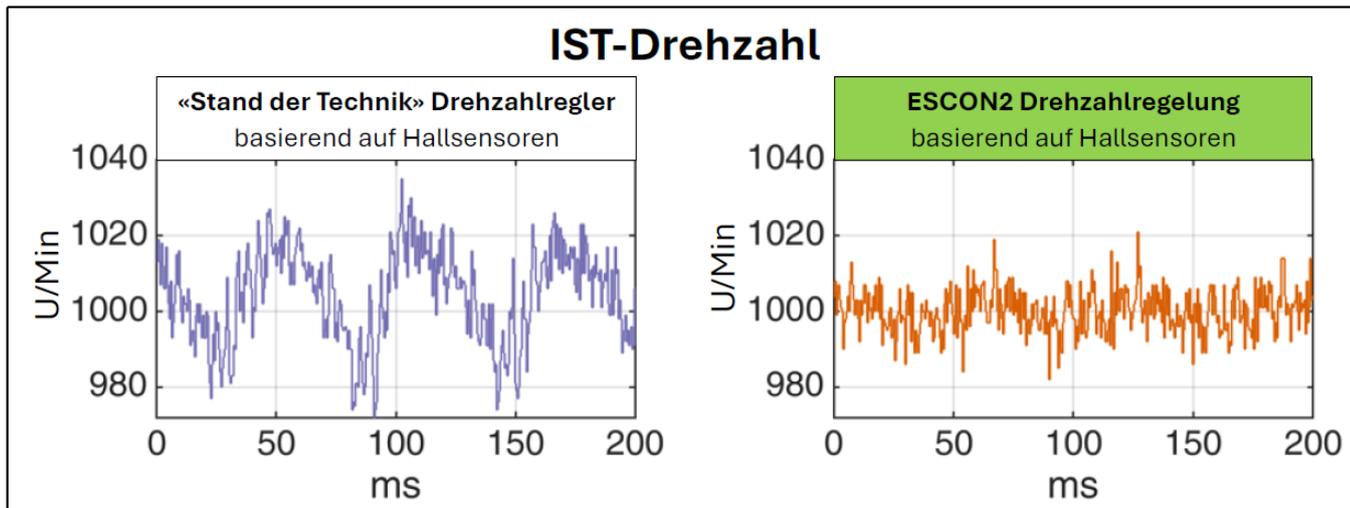


Abbildung 4: Vergleich der Drehzahlkonstanz zwischen einem modernen, „normalen“ Servokontroller und einer ESCON2 im drehzahlgeregelten Betrieb eines BLDC-Motors „EC-i 40“ mit Hallensensor-Feedback.

Die Abbildung 5 zeigt einen Vergleich der Laufruhe unter dem Aspekt des Motorstroms.

- Beide Servokontroller wurden identisch wie zuvor als Drehzahlregler betrieben und der Motorstrom verglichen. Zum Einsatz kam wiederum der „EC-i 40“ (Art.Nr. 449470) mit Hallensensor-Rückführung (ohne Encoder) für die Kommutierung und Regelung.
- Bei identischen Lastverhältnissen ergab sich ein gemittelter Motorstrom von circa 100 mA.
- Der IST-Motorstrom des „normalen“ Servokontrollers (links, blaue Kurve) zeigt deutlich grössere Stromschwankungen als der Motorstrom der ESCON2 (rechts, orange Kurve), welcher sehr gleichmässig und frei von zyklischen Oszillationen ist.

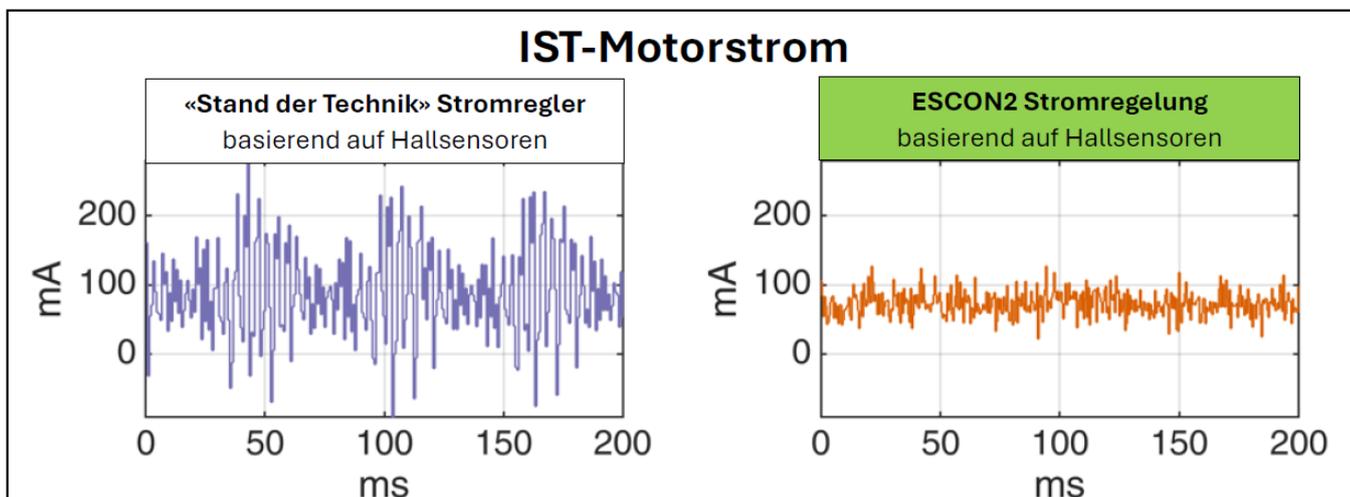


Abbildung 5: Vergleich des Motorstroms zwischen einem modernen, „normalen“ Servokontroller und einer ESCON2 im drehzahlgeregelten Betrieb eines BLDC-Motors „EC-i 40“ mit Hallensensor-Feedback.

Daraus ergeben sich folgende Vorteile einer ESCON2 Regelung:

- Erstens ist die Drehzahlregelung der ESCON2 mit Hallensensor-Feedback deutlich ruhiger als jene anderer Servokontroller. Dieser Unterschied, der auch akustisch wahrgenommen werden kann, führt zudem zu einer höheren Energieeffizienz.
- Zweitens besteht fast kein Unterschied zwischen der Drehzahlregelung von ESCON2 mit Hallensensor-Feedback im Vergleich zu Antriebseinheiten mit Encoder.
- Nicht zu vergessen ist, dass der Verzicht auf den Encoder bei der Nutzung einer ESCON2 eine Möglichkeit zur Kosteneinsparung und Reduktion des Verdrahtungsaufwands bietet.

Dadurch stellt sich fast automatisch die Frage, ob es bei einer ESCON2 überhaupt noch hochauflösende Geber braucht oder wann diese empfohlen werden. Die Verwendung eines Encoders birgt vor allem bei jenen Anwendungen Vorteile, bei welchen der Motor ausschliesslich oder überwiegend im sehr tiefen Drehzahlbereich bei wenigen hundert U/min betrieben wird. Solch tiefe Drehzahlgrenzen sind bei Direktantrieben aber eher selten. Generell muss berücksichtigt werden, dass das Hallsensor-basierende Verfahren zur Symmetrierung nach jedem Einschaltzyklus der Versorgungsspannung einige Sekunden für den Abgleich benötigt. Weiter ist zu bedenken, dass bei tiefen Drehzahlen die Extrapolation zwischen den Schaltflanken nicht mehr adäquat möglich ist, um auf plötzliche Sollwertsprünge oder lastbedingte Schwankungen zu reagieren. Es bleiben somit durchaus spezifische Anwendungsfälle mit tiefen Drehzahlen und hoher Dynamik, in welchen die Nutzung eines Encoders angezeigt ist.

## Offene Schnittstellen für Kommandierung und Datenaustausch

Baugrösse und Regelgüte stellen wichtige Faktoren beim Entscheid von Systemintegratoren für die Wahl von ESCON2 dar. Ein weiterer Aspekt ist jedoch auch die Frage der Ansteuerung durch eine übergeordnete Gerätesteuerung oder einen Mikrocontroller. Hier punktet die ESCON2 einerseits mit der Möglichkeit zur Kommandierung und Feedback durch analoge und digitale Signale. Zunehmend wichtiger ist aber selbst bei „einfachen“ Systemen die Möglichkeit zum Datenaustausch über eine Bus-Schnittstelle, zum Beispiel für die präzise Drehzahl- oder Motorstrom-Kommandierung und auch Überwachung der IST-Werte im Rahmen der IoT-Datenerfassung oder „Predictive Maintenance“. ESCON2 bietet hierfür mit USB, SCI (RS232) und CAN kostengünstige und etablierte Schnittstellen an.

Basierend auf dem CiA402 CANopen Device Profile werden „PVM – Profile Velocity Mode“, „CSV – Cyclic Synchronous Velocity“ und „CST – Cyclic Synchronous Torque“ Mode unterstützt. Zusätzlich stehen mit „IOVM - I/O Velocity Mode“ und „IOCM - I/O Current Mode“ zwei maxon-spezifische Betriebsarten zur Verfügung, welche die Kombination einer Ansteuerung über analoge und digitale Ein-/Ausgänge mit dem performanten Datenaustausch und Prozessfeedback via Feldbus kombinieren. Dies garantiert maximale Flexibilität, Kompatibilität und Skalierbarkeit für den Einsatz in einfachen Geräten mit analoger Ansteuerung bis zu voll-digitalen Systemen basierend auf CANopen.

Systemintegratoren fassten es so zusammen:

*„Dank der CAN-Schnittstelle können gemischte Systeme mit kosteneffizienten drehzahlgeregelten oder drehmomentgeregelten Achsen (ESCON2) und positionsgeregelten Achsen (EPOS4) mit einem gemeinsamen Bus vernetzt aufgebaut werden, was Aufwand und Komplexität verschiedener Schnittstellen erspart.“*

*„Das standardisierte “CiA402 – CANopen Device Profile for Drives and Motion Control“ der ESCON2 (wie auch bei der EPOS4) reduziert sowohl Integrations- und Entwicklungsaufwand als auch generell das Risiko der Inkompatibilität bei gemischten Systemlösungen - selbst beim Einsatz zusätzlicher CANopen-Slaves oder -Mastern von Drittanbietern.“*

## Updates und anwendungsspezifische Erweiterungen

Alle Funktionen sind über die komplette ESCON2-Produktlinie hinweg identisch. Dies ist die Basis für eine freie Wahl der optimalen Leistungsklasse und Bauform, ohne funktionale Kompromisse in Kauf nehmen zu müssen. Anwenderfeedbacks und Anfragen zu Funktionserweiterungen werden konsequent gesammelt, bewertet und nach agilen Methoden implementiert. Meist im Halbjahresrhythmus werden Firmware und Software-Releases kostenfrei zur Verfügung gestellt. Diese Updates bieten neue Funktionen, zusätzliche Betriebsarten und weitere Performanceoptimierungen. Dadurch altert ESCON2 nicht, sondern verjüngt sich stetig von Neuem, stellt aber gleichzeitig jederzeit die Rückwärtskompatibilität sicher.

In Projektgesprächen gibt es aber auch sehr spezifische Anwendungsanforderungen, welche für einen einzelnen Kunden einen echten Marktvorteil bedeuten aber als allgemeine Erweiterung keine ausreichend breite Basis besitzen. maxon bietet hierfür die Entwicklung kundenspezifischer Firmware und Hardware an. Diese stützt sich auf die bewährte ESCON2 Entwicklungsplattform ab, oder wie es ein ESCON2 Entwickler formuliert:

*„Die ESCON2-Plattform ist ein solides Fundament für kundenspezifische Erweiterungen. Sie verfügt über ausreichend Leistungsreserven, um auch komplexe Zusatzfunktionen und Wünsche integrieren zu können.“*

Der notwendige Entwicklungsaufwand lässt sich klar abschätzen und durch maxon verbindlich anbieten. Der Auftraggeber profitiert von Beginn an von einer klaren Kostentransparenz, einer etablierten Systembasis und einem tiefen Entwicklungsrisiko. Zudem hat er den Vorteil exklusiver Zusatzfunktionen, welche im Katalogprodukt für seine Mitbewerber nicht zur Verfügung stehen. Kundenspezifische Firmware-Erweiterungen stellen für Serienkunden so auch eine zusätzliche Absicherung ihrer IP in Bezug auf die Sonderfunktionalität und spezifischen Nutzung der ESCON2 mit eigener maxon Artikelnummer dar.

## **Einfachste Inbetriebnahme mit maxon's «Motion Studio»**

Für die Konfiguration eines Antriebssystems mit ESCON2 stellt maxon die PC Windows-Anwendung «Motion Studio» kostenfrei zur Verfügung. «Motion Studio» leitet den Benutzer intuitiv durch die wichtigsten Schritte und erlaubt es ihm, in kürzester Zeit zu einem betriebsbereiten System mit optimalen Parametern zu gelangen und den Motor testweise zu bewegen. Die erstellte Systemkonfiguration kann in einer Projektstruktur abgespeichert und auf weitere ESCON2 Controller übertragen werden.

Der initiale Ausgangspunkt jeder Inbetriebnahme einer neuen Antriebseinheit oder eines ganzen Systems ist der „Startup“ Wizard, mit welchem die Antriebsdaten, aber auch Systemgrenzen (wie Drehzahl- oder Strom-Limits) sowie die Zuordnung von Funktionen zu Ein-/ und Ausgängen schrittweise festgelegt werden.

Nach abgeschlossener Konfiguration können mit dem „Regulation Tuning“ Wizard alle Regelparameter komplett automatisch ermittelt werden. Bei diesem Vorgang werden kurze Motorbewegungen in schneller Abfolge ausgeführt und erweiterte Daten des Antriebs und der Last ausgemessen, um optimierte Werte für die Reglereinstellung finden zu können. Die Optimierungsverfahren beruhen nicht nur auf Theorie und Simulation, sondern beziehen umfangreiche Praxis-Erfahrung der maxon Ingenieure aus Hunderten von Antriebssystemen mit ein. Dieses geballte Knowhow zur Regleroptimierung steht dem Anwender des „Regulation Tuning“ mit einem Mausklick zur Verfügung. Anwendungsbezogene Optimierungen wie zum Beispiel weicher oder härter eingestellte Regler sind über Slider oder auch eine direkte Parameter-Eingabe jederzeit möglich. Um die Auswirkungen der automatischen oder manuellen Regleroptimierung zu beurteilen, besitzt der Wizard eine Verifikationsfunktion. Die Reaktion (Sprungantwort) des Strom- oder Drehzahlreglers auf ein kurzes, einstellbares Testsignal wird aufgezeichnet und grafisch wiedergegeben. Das Tuning wird so mit wenigen Tastendrücken zum Kinderspiel und die Daten werden in die ESCON2 übertragen.

«Motion Studio» stellt wie ein Schweizer Taschenmesser weitere Wizards und Tools zur Verfügung, die nach der Inbetriebnahme für initiale Antriebstests oder bei einer Fehlersuche eingesetzt werden können. Für Systementwickler oder Service-Mitarbeiter ist der in «Motion Studio» integrierte „Data Recorder“ besonders hilfreich. Seine Benutzeroberfläche erinnert an ein Oszilloskop, mit dem vier Kanäle aufgezeichnet, auf System- oder Bewegungszustände getriggert und die Datenaufzeichnung exportiert oder auch wieder importiert werden können.

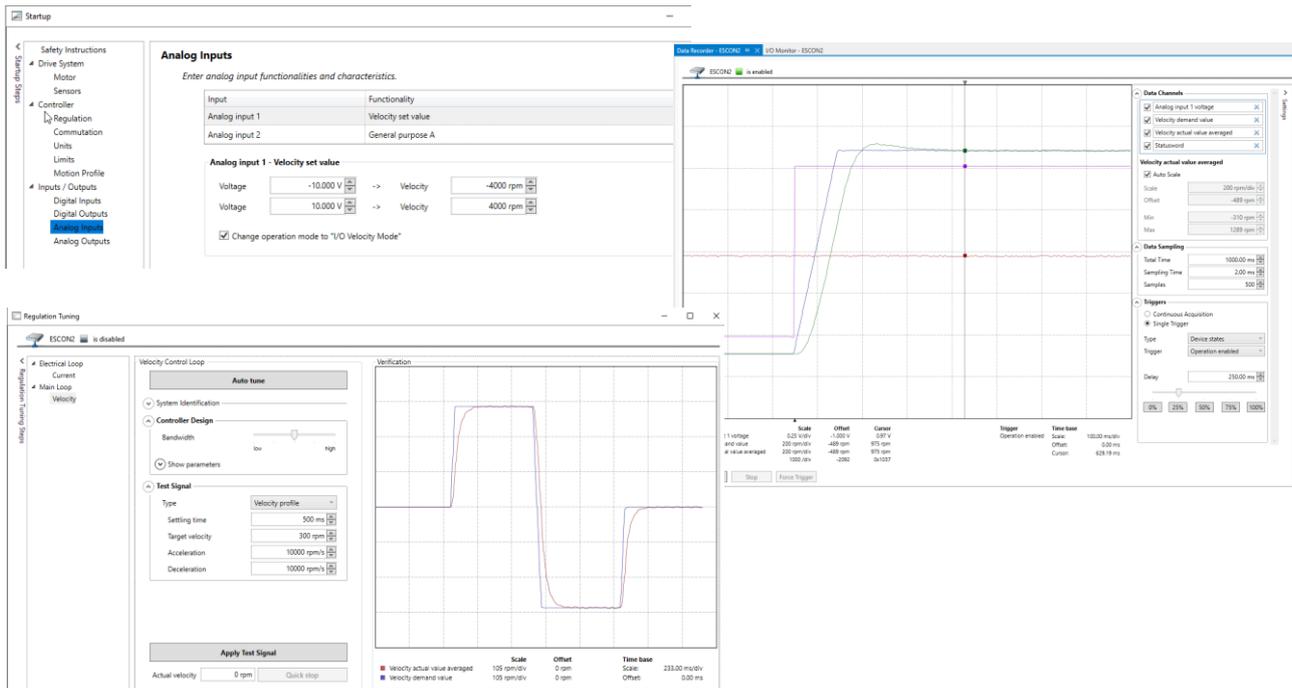


Abbildung 6: Motion Studio's „Startup“, „Regulation Tuning“ und „Data Recorder“ Funktion

## ESCON2 - Kurz und bündig

- ESCON2 sind Servokontroller für die Drehzahl- und Strom-/Drehmomentregelung mit maximaler Regelperformance.
- ESCON2 bietet FOC-Kommutierung bis 120'000 U/min bei einem Polpaar.
- Die Drehzahlregelung und FOC-Kommutierung basieren auf einem neuen maxon Verfahren (Patent pending) für eine bisher unerreichte Drehzahlkonstanz und Laufruhe von bürstenlosen Motoren mit Hallsensoren auch ohne Encoder.
- Die Kommandierung und Rückmeldung kann über I/O, USB, SCI (RS232) oder CANopen (CiA402) erfolgen.
  - CiA402 Betriebsarten PVM, CSV, CST und maxon-spezifische Betriebsarten IOVM und IOCM für den gemischten Betrieb via I/Os und CANopen.
- Ein umfangreiches Produktspektrum bezüglich Bauformen und Abgabeleistung steht zur Auswahl:
  - für Motoren von wenigen Watt bis 1.8 kW Dauerleistung
  - anschlussfertige „ESCON2 Compact“ Bauform oder im Gehäuse
  - miniaturisierte ESCON2 Module, Micro und Nano zum Einstecken in Elektronik-Platinen von kundenseitigen Klein- und Handgeräten oder Mehrachssystemen
- Einfachste Inbetriebnahme durch intuitives GUI mit automatischem „Regulation Tuning“.
- Zukunftssicher dank funktionaler, kostenfreier Updates.
- Kundenspezifische Funktionserweiterungen und Hardware-Designs sind problemlos möglich.

**Autoren:**

Federico Percacci, maxon motor AG, Regeltechnik-Experte, F&E Ingenieur «Advanced Systems»  
Juergen Wagenbach, maxon motor AG, Leiter Kundensupport «Motion Control»

**Statistics:**

*Wörter: 2549*

*Zeichen (ohne Leerzeichen): 17656*

*Zeichen (mit Leerzeichen): 20164*