

Abbildung 1: Überblick über das XTS-Gesamtsystem

Lineares Transport System für hochdynamische Maschinenkonzepte

# XTS: Hoher Performancegewinn und vereinfachtes Engineering mit TwinCAT

Das Lineare Transport System XTS (eXtended Transport System), kombiniert die Vorzüge rotatorischer und linearer Antriebsprinzipien in einem System. Wo bisher die Einsatzmöglichkeiten von rotatorischen Motoren endeten, addiert XTS die Eigenschaften eines linearen Antriebssystems und eröffnet damit völlig neue Lösungsansätze bei der Realisierung von hochdynamischen Maschinenkonzepten. Durch die kompakte Bauform des XTS erhält der Maschinenbauer außerdem die Möglichkeit, seine Maschine wesentlich platzsparender zu konstruieren. Ein einfaches Engineering gewährleistet die Automatisierungssoftware TwinCAT. Alle „Mover“ des XTS-Systems sind als „normale“ Servoachsen abgebildet. Funktionen, wie automatisches Aufstauen, Kollisions- und Ruckvermeidung, sind in TwinCAT integriert.

In der Anwendung von Servotechnik unterscheidet man im Maschinenbau hauptsächlich zwischen rotatorischen und linearen Servomotoren mit jeweils spezifischen Eigenschaften.

Mit rotatorischen Motoren und entsprechender Mechanik, wie Zahnriemen oder Förderkette, ist es verhältnismäßig einfach, eine unendlich umlaufende, lineare Transportbewegung zu erzeugen. Ein solcher Aufbau hat den Nachteil, dass der rotatorische Motor den Riemen oder die Förderkette in allen Bereichen immer gleichmäßig bewegt. Eine Variation der Geschwindigkeit in verschiedenen Bereichen, um z. B. eine Varianz in einem Produktfluss auszugleichen, verschiedene Produktgruppierungen vorzunehmen oder unterschiedliche Prozesszeiten in einem kontinuierlichen Produktfluss zu berücksichtigen, ist nicht möglich. Weitere Nachteile sind der Verschleiß und die geringere Steifigkeit der mechanischen Komponenten, welche die mögliche Dynamik, Performance und Lebensdauer reduzieren können.

Mit Linearmotoren hat man den Vorteil einer direkten Kraftkopplung zwischen dem Motor und dem zu bewegenden Produkt bzw. der Antriebsaufgabe und kann diese gegebenenfalls auch mit mehreren, voneinander unabhängig beweglichen Schlitten ausführen. Ein großer Nachteil ist allerdings der endliche Fahrweg, der eine Rückstellbewegung der beweglichen Elemente des Linearmotors erfordert. Dies stört den kontinuierlichen Produktfluss einer hochdynamischen Maschine erheblich und reduziert die Produktionstaktrate. Auch aus energetischer Sicht ist dieser doppelte Brems- bzw. Beschleunigungsvorgang unvorteilhaft.

### Stand der Technik

Schon länger gibt es Überlegungen und Ansätze, das Linearmotorprinzip dergestalt zu nutzen, dass man auf einer aktiven, durch bestrombare Spulen gebildeten Strecke passive, kabellose Schlitten bzw. Mover fahren lässt. Die Mover werden dabei auf einer zweiten Strecke zurückbewegt, so dass sie nicht gegen den Produktstrom der Maschine bewegt werden müssen. Die bisherigen Ansätze haben aber oft folgende technische Einschränkungen:

- Eine Servoelektronik bestromt und regelt einen festen Streckenabschnitt mit einem einheitlichen Feld für alle Mover auf dieser Strecke. Auch bei einem Übergang zwischen den Teilstücken werden beide Abschnitte gleich bestromt.
- In den Bögen erfolgt die Bewegung der Mover über einen rotatorischen Motor und eine Hilfsmechanik.
- Eine geschlossene Positionsauswertung ist nicht möglich, so dass in einigen Bereichen nur gesteuert gefahren wird.

Das neue Lineare Transport System, das hier im Folgenden vorgestellt wird, verbindet die Vorteile rotatorischer Motoren mit denen von Linearmotoren und eliminiert gleichzeitig die Nachteile und Einschränkungen bisheriger Lösungsansätze.

### Konzept des Linearen Transport Systems XTS

Bei dem Konzept des XTS sind Einzelspulen des Linearmotors entlang des Fahrweges angeordnet, und die beweglichen Mover sind mit Permanentmagnetplatten versehen. Über die dynamische Ansteuerung der einzelnen Spulen entlang des Weges wird für jeden Mover ein eigenes drehstromäquivalentes Wanderfeld erzeugt, das ihn bewegt. Dabei wird die bisherige feste Verknüpfung (Verdrahtung) zwischen Umrichter und Motorwicklung aufgebrochen und stattdessen über Software, auf einem zentralen Industrie-PC, hergestellt.

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht des gesamten Systems. Signale aus dem Positionssensor sind über eine schnelle EtherCAT-Kommunikation mit dem IPC verbunden. Dort wird per Servoachs-Software die Position und Geschwindigkeit des Movers berechnet - mit anschließender Ausführung der Regelung und der Phasentransformation. In der Phasentransformation werden aus dem Sollstrom des Geschwindigkeitsreglers die sinusförmigen Phasenströme aller Spulen unterhalb des Movers berechnet und über EtherCAT als Sollwert dynamisch an die Stromregelung der entsprechenden Spulen übertragen. So erhält jeder Mover exakt die Ansteuerung, die er für sein eigenes Wanderfeld aktuell benötigt. Es werden nur die Spulen angesteuert und bestromt, über denen sich ein Mover befindet. Das System erlaubt, jeden einzelnen Mover, zeitlich synchron innerhalb von 250 µs, lage- und geschwindigkeitsgeregelt exakt zu positionieren.

### Motormodule

Abbildung 2 (S. 22) zeigt jeweils ein gerades und ein bogenförmiges Motormodul. Die Module werden aneinander gereiht, wobei alle 3 m eine Einspeisung der 24-V-Steuer- und der 48-V-Leistungsversorgung sowie eine EtherCAT-Anbindung erfolgen. Das Motordesign beruht auf einer Aneinanderreihung von Einzelspulen, die jeweils von einer integrierten, als H-Brücke aufgebauten Leistungselektronik angesteuert werden. Dies gilt auch für den 180°-Bogen, so dass die freie Positionierfähigkeit jedes Movers auch für den Bogen gewährleistet ist.

Da die Antriebsleistung bei diesem System nicht von einer zentralen Achse, z. B. einem rotatorischen Motor und einer verbundenen Kette, aufgebracht wird, sondern sich auf die einzelnen Mover verteilt, kann auch auf eine geringere Zwischenkreisspannung von 48 V mit effizienten MOSFET-Transistoren gewechselt

werden. Diese Transistoren bieten den Vorteil von geringen leitenden Verlusten und kurzen Schaltzeiten, so dass eine Leistungselektronik mit einem Wirkungsgrad von > 99 % möglich wird. Die H-Brücke wird dabei mit einer Schaltfrequenz von 32 kHz und einem FPGA-basierten Stromregler, mit einer Update-Rate von über 300 kHz, betrieben. Die Leistungselektronik ist rückspeisefähig und erlaubt einen Energieaustausch zwischen Bereichen, in denen Mover abbremsten und generatorisch Energie zurückspeisen, und solchen, in denen motorische Energie entnommen wird. Durch die Integration der Leistungs- und Wegerfassungselektronik in die Motormodule wird auch der im Schaltschrank benötigte Platz deutlich reduziert.

Beim Motordesign wurde ebenfalls auf die Minimierung von Verlusten Wert gelegt: So ist der Magnetkreis des Motors mit einem eisenbehafteten Doppelluftspalt ausgeführt. Dies ermöglicht eine effiziente Spulenausnutzung und die Reduzierung der Reibungsverluste in der Führung. Für die auf die Führung einwirkende Kraft gilt:

$$F_{\text{Luftspalt}} \sim 4 \cdot F_{\text{Vorschub}}$$

Hieraus folgt, dass etwa das Vierfache der motorischen Vorschubkraft als Kraft in Richtung des Luftspaltes wirkt. Bei einem Aufbau mit einem einfachen Luftspalt muss die Führung der Mover diese Kräfte aufnehmen und abfangen, was zu erhöhten Reibungsverlusten und Verschleiß der Führung führt. Bei einem Aufbau mit Doppelluftspalt, wie er für das XTS gewählt wurde, heben sich die Kräfte idealerweise auf – mit der Einschränkung von Toleranzen in der Mechanik und

der Permanentmagnete. Insgesamt kommt diese Anordnung bei einer Nenngeschwindigkeit von 4 m/s und einer Nennkraft von 30 N sowie Verlusten von etwa 12 W auf einen Wirkungsgrad von:

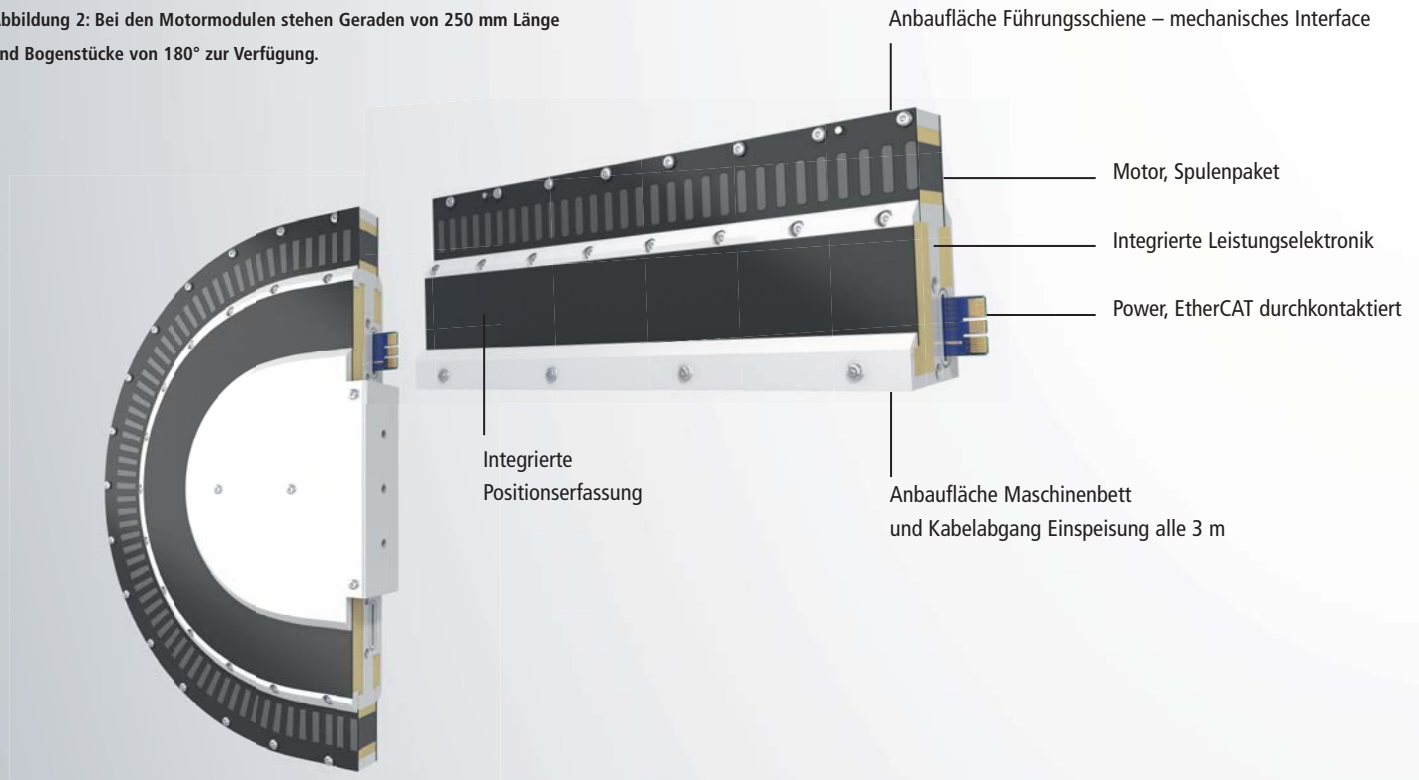
$$\eta = \frac{F_R \cdot v_R}{F_R \cdot v_R + 12W} \cdot 100\% = 90,9\%$$

Einen mechanisch kritischen Punkt bei einem umlaufenden Transportsystem zeigt Abbildung 3 (S. 23), am Übergang zwischen Gerade und Bogen. Verläuft dieser Übergang auf einer Kreisbahn, ergibt sich dort ein sinusförmiger Anstieg der Geschwindigkeit in y-Richtung. Als Folge der Beschleunigung entsteht ein sprungförmiger Verlauf, der wiederum einen theoretisch unendlich hohen Ruck zur Folge hat und insbesondere die Führung stark belastet. Aus diesem Grund wurde das 180°-Bogen-Motormodul, inklusive der Führung, als Klothoide ausgeführt<sup>[1]</sup>. Eine Klothoide (blauer Verlauf in Abbildung 3) ist ein Kreisbogen, dessen Radius sich verändert. Am Anfang des Übergangs ist der Radius größer und wird dann bis zum Scheitelpunkt des Bogens kontinuierlich kleiner, bevor sich die Klothoide zur zweiten Gerade hin wieder öffnet. Dies führt zu einem kontinuierlichen Anstieg der Beschleunigung, wodurch sich die Lebensdauer der Mechanik erhöht.

Um die Mover gegebenenfalls austauschen zu können, enthält das System eine einfach zu öffnende Schleuse. Damit sich mit diesem System – bestehend

[1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Klothoide> (abgerufen am 3.9.2012)

Abbildung 2: Bei den Motormodulen stehen Geraden von 250 mm Länge und Bogenstücke von 180° zur Verfügung.



aus einigen wenigen Standardkomponenten – möglichst viele Einsatzbereiche abdecken lassen, haben die Motormodule zusätzlich ein mechanisches Interface zur Führung, bestehend aus Passstift- und Schraubverbindungen. So lassen sich auch für die Standardmotormodule verschiedene spezifische Führungen entwickeln und anbauen, die Spezialanforderungen erfüllen. Auch die Einbaulage des Systems ist nicht vorgegeben, sondern frei wählbar.

### Wegerfassung

Die Wegerfassung ist in das System integriert und erlaubt die Berechnung der absoluten Position jedes Movers im System ohne aktive Bauelemente auf dem selbigen. Das hier eingesetzte Prinzip des induktiven Wegsensors ist sehr robust gegenüber EMV-Störungen, und man kann es sich wie einen abgewickelten Resolver vorstellen: Auf eine ebene Fläche werden eine Erregerwicklung und mehrere innenliegende sinus- und cosinusförmige Empfangsleiterschleifen aufgebracht. Auf dem Mover fährt parallel, mit einem Luftspalt von 0,5 mm zum feststehenden Wegsensor, eine Geberfahne aus einem leichten, robusten und faserverstärktem Material mit. Auf dieser sind mehrere metallische Flächen aufgebracht. Hierdurch findet eine Wechselwirkung mit dem elektromagnetischen Feld der Erregerwicklung statt, und in den Sekundärwicklungen kann eine positionsabhängige Spannung gemessen werden. Diese Spannung hat einen zeitlich sinusförmigen Verlauf, wenn die Geberfahne beispielsweise mit einer konstanten Geschwindigkeit über den feststehenden Sensor bewegt wird. Aus den Spannungen, der inversen Tangensfunktion und einer festen Positionszuordnung der Sekundärwicklungen, bzw. deren Spannungen im System, kann im IPC zentral die absolute Position aller Mover berechnet werden. Die Positions-

messung ist damit kontaktlos und absolut für alle Mover, so dass keine weitere Referenzfahrt oder Bewegung zur Kommutierungsfindung notwendig ist.

Im Übergang zwischen zwei Modulen ist in einem kurzen Überlappungsbereich eine Positionsberechnung aus beiden Modulen möglich. So kann nach dem Einschalten die Position aller Mover sofort und sicher, geschlossen berechnet werden. In automatisierten Messfahrten kann nach dem Zusammenbau des Systems in der Maschine ein eventueller Positionssprung, hervorgerufen durch mechanische Einbautoleranzen, eingelernt und ausgeglichen werden. Das induktive Verfahren ist – im Gegensatz zu einem optischen Messprinzip – unempfindlich gegenüber elektrisch nichtleitenden Verschmutzungen. Durch eine geeignete Geometrie lassen sich hohe Genauigkeiten erreichen, wie z. B. eine Stillstands-Wiederholgenauigkeit von weniger als 10  $\mu\text{m}$  bei einer Positionsauflösung von ca. 0,2  $\mu\text{m}$ . Die Erregung, Abtastung und Digitalisierung erfolgen, von einem FPGA gesteuert, innerhalb einer Zykluszeit von 10  $\mu\text{s}$ . (Abbildung 4)

Die Flächen einzelner Geberfahnen lassen sich so anpassen, dass, ohne Reduzierung der Genauigkeit, ihre Hardware-Identifikation und damit eine eindeutige Zuordnung der Servoachsen in der Applikationssoftware zu den realen Movern gegeben ist.

### EtherCAT verbindet die Elemente zu einem System

Eine wesentliche Voraussetzung zur Realisierung des Linearen Transport Systems XTS ist die schnelle und synchrone EtherCAT-Kommunikation zwischen IPC und Hardware. Ein Motormodul mit einer Länge von 250 mm umfasst 132

Abbildung 3: Vergleich zwischen einem Kreisbogen und einer Klothoide

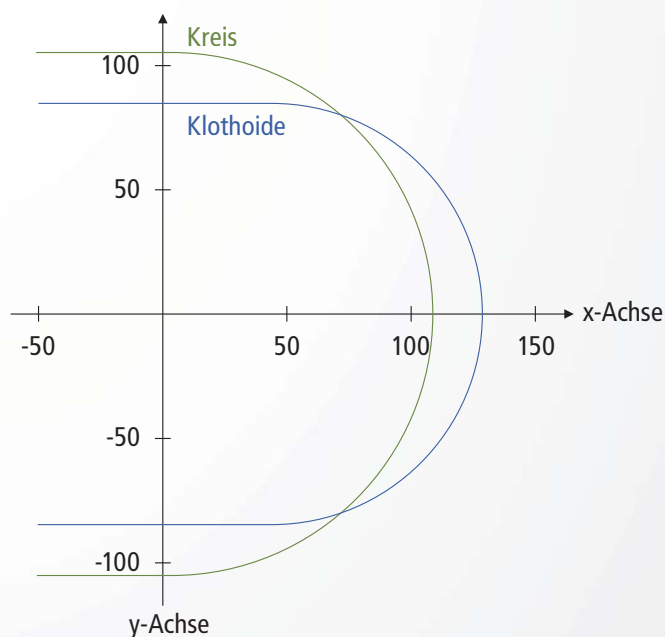
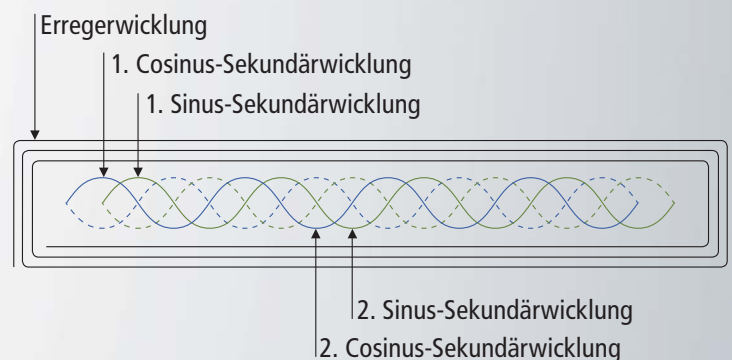


Abbildung 4: Ausschnitt aus der Wegerfassung



Byte Prozessdaten, bestehend aus Stromsoll- und Istwerten, Wegmessdaten sowie Steuer- und Statuswörtern. In einem 2 m langen Transportsystem mit einer abgewickelten Länge von 5 m, bestehend aus Bögen sowie Hin- und Rückweg, entstehen rund 2640 Byte Prozessdaten, welche takt synchron, mit einer Zykluszeit von 250  $\mu$ s, in zwei EtherCAT-Strängen übertragen werden. Dies entspricht einer Datenmenge von 84 Mbaud. Das System kann auf verschiedene 100-MBaud-EtherCAT-Stränge aufgeteilt werden, so dass die Übertragung der Daten maximal die Hälfte der Zykluszeit von 250  $\mu$ s benötigt. Gegebenenfalls bündelt ein Port-Multiplier die Prozessdaten der 100-MBit-Stränge zu einer 1-GBaud-EtherCAT-Verbindung zum IPC und übernimmt – per Distributed-Clocks<sup>[2]</sup> – auch die nanosekundengenaue Synchronisation der angeschlossenen Hardware in den Strängen. In der restlichen Zykluszeit von mindestens 125  $\mu$ s finden die folgenden Berechnungen der Servo-Algorithmen aller Mover statt:

- Achsverfolgung der verschiedenen Signale des Wegmesssystems
- Positionsberechnung
- Geschwindigkeitsberechnung
- Feininterpolation der Achssollwerte
- Positionsregelung
- Geschwindigkeitsregelung
- Lastfilter höherer Ordnung
- Phasentransformation des Stromsollwertes auf die entsprechenden Hardwarekanäle

Durch die kurzen Verzögerungszeiten in den FPGA-basierten Hardwarekomponenten (Wegerfassung und Leistungselektronik) werden in diesem zentralen System trotzdem vergleichbare Verzögerungs- und Zykluszeiten wie bei einer dezentralen Lösung erreicht; jedoch mit dem entscheidenden Vorteil, dass die einer Achse zugehörige Hardware über eine Achsverfolgungssoftware kontinuierlich weiterbewegt und umgeschaltet wird. Eine zusätzliche Kommunikation – und die dadurch bedingte Verzögerungen zwischen intelligenten Modulen – ist nicht erforderlich. Abbildung 5 zeigt den zeitlichen Ablauf im System.

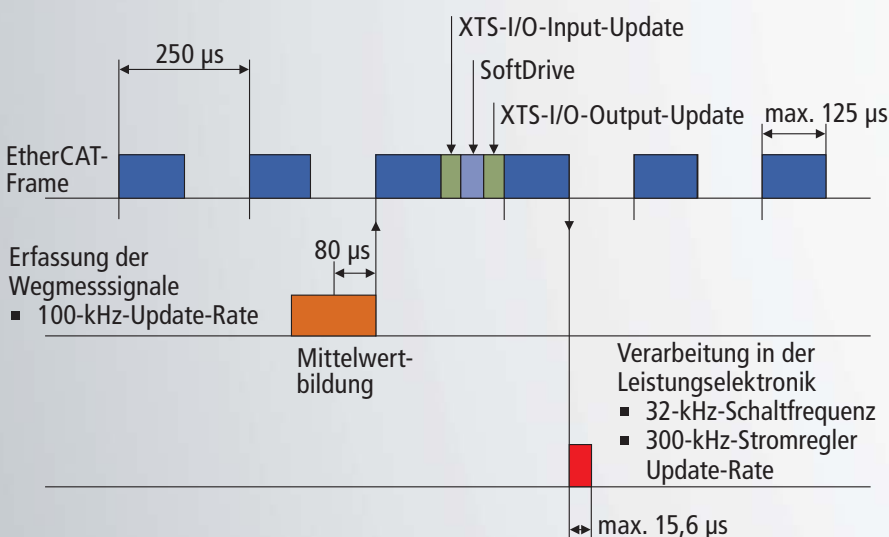
### Konfiguration und Maschinenprogrammierung

Die Systemänderung – weg von Achsen mit fester Zuordnung zwischen Regelung, Leistungselektronik, Motor und einem eigenen Bewegungsraum – erscheint, insbesondere aufgrund der Fülle von Daten, die im System übertragen und zugeordnet werden müssen, auf den ersten Blick abschreckend und kompliziert. Aus diesem Grund ist bei der Entwicklung ein besonderes Augenmerk auf die Einfachheit und Bedienbarkeit für den Anwender gelegt worden. Die Hardware wird zusammengesteckt und über EtherCAT an den PC angeschlossen. Mit einem einfachen Scan-Kommando – in der Steuerungssoftware TwinCAT<sup>[3]</sup> –, abgesetzt per Mausklick, werden alle Hardwarekomponenten im System erkannt und in die Konfiguration aufgenommen. In der Hardware muss nichts weiter eingestellt werden. Der Stromregler ist bereits optimal auf die Einzelspulen und Mover abgestimmt. Die Zuordnung der einzelnen Prozessdaten im System

[2] [http://www.ethercat.org/pdf/ethercat\\_d.pdf](http://www.ethercat.org/pdf/ethercat_d.pdf) (abgerufen am 3.9.2012)

[3] <http://infosys.beckhoff.com/> (abgerufen am 4.9.2012)

Abbildung 5: Zeitliche Abfolge und Übertragung im System



Autor: Jan Achterberg,  
Entwicklung Grundlagensoftware/  
Antriebstechnik, Beckhoff

erfolgt über einen XTS-I/O-Wizard. Dieser erkennt die angeschlossenen Systemkomponenten in der Konfiguration nach einem weiteren Scan-Kommando automatisch, zeigt sie grafisch an und bietet die grafische Möglichkeit, die Stränge untereinander zu verschieben. Nach der Anordnung der Module erzeugt ein weiterer Mausklick alle Zuordnungen und Verknüpfungen, so dass alle I/O-Daten in einem Servoachs-Interface zur Verfügung stehen. Die entsprechende Anzahl von Steuerungsachsen, inklusive ihrer Verknüpfung mit den Achs-Interfaces der Hardware, wird dann als SoftDrive aus einer Parameterdatei angelegt. Diese XML- bzw. tmc-Datei kann jeder Anwender auch selbstständig editieren, um die für seine Mechanik ermittelten Werte der Regelung einzustellen. Auch eine unterschiedliche Parametrierung, z.B. aufgrund von unterschiedlichen Massen in bestimmten Positionsbereichen, ist möglich. So wird der neue „Unterbau“ dieses Systems auf herkömmliche und langjährig bewährte TwinCAT-NC-Achsen in der Steuerung sehr einfach abgebildet und konfiguriert (siehe Abbildung 6).

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass sich alle Mover abwechselnd in demselben Fahrweg bewegen. Hierfür wurde eine XTS-Gruppe als Softwarekomponente entwickelt, welche die Abhängigkeiten der Mover untereinander überwacht, ohne dass sich der Applikationsprogrammierer weiter darum kümmern muss. Mit einer Kollisionsüberwachung ist auch das Weiterfahren im Stau automatisch möglich. Ein Mover hat beispielsweise an einem Abgabepunkt ein Produkt an einen weiterführenden Produktionsschritt abgegeben. Nun bekommt

er – kurz vor der Aufnahme eines neuen Produktes – als Zielposition eine Warteposition zugewiesen. Wenn nun mehrere Mover in einer Art Warteschlange stehen, erkennt der neu heranfahrende Mover dies und bremst automatisch – bestmöglich, entsprechend den eingestellten Dynamikparametern – vor dem Ende der Schlange ab. Sobald der erste Mover einen neuen Auftrag bekommt und von der Warteposition losfährt, um sich auf ein neu einlaufendes Produkt zu synchronisieren, fahren alle Mover in der Warteschlange, unter Einhaltung der eingestellten Dynamikparameter, weiter. Erst wenn der Mover seine Zielposition erreicht hat, meldet er, dass die Bewegung abgeschlossen ist. Jeder Mover kann aber jederzeit einen neuen Fahrauftrag bekommen. Die Kollisionsüberwachung ist dabei auf dem gesamten Fahrweg und in allen Bewegungen permanent aktiv. Die Programmierung der einzelnen Fahrbefehle erfolgt aus TwinCAT PLC mit Standardbausteinen gemäß PLCopen. Die bekannten Motion-Sollwertgeneratoren einer modernen Steuerung, wie Roboter-Kinematik, „fliegende Säge“, Kurvenscheibe oder PTP-Positionierung sind ohne Einschränkung anwendbar.

weitere Infos unter:

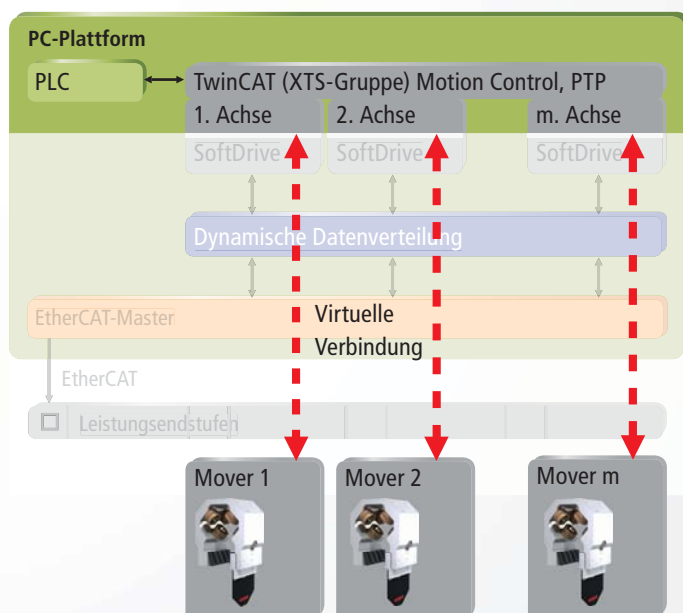
[www.beckhoff.de/XTS](http://www.beckhoff.de/XTS)

#### Produktankündigung

Voraussichtliche Markteinführung:

1. Quartal 2013

Abbildung 6: Zusammenspiel der XTS-Softwaremodule



## XTS – Vorteile für den Maschinenbau

Anwendungsbeispiele und weitere Analysen von Maschinen aus dem Verpackungs-, Druck- oder Produktionsbereich zeigen den hohen möglichen Performancegewinn und die Vereinfachung durch dieses neuartige System. Auswirkungen für den Maschinenbau sind insbesondere:

- Die Maschinen werden kleiner und effizienter.
- Die Funktionalität nimmt zu.
- Die Konstruktion wird überschaubarer und schneller.
- Bau und Montage vereinfachen sich durch weniger Einzelteile.
- Hochspezialisierte Mechaniken sind nicht mehr notwendig.
- Formatverstellungen werden deutlich einfacher.
- Es gibt weniger und einheitlichere Verschleißteile.