

Handreichung:

Der digitale Zwilling als methodisches Instrument bei der Inbetriebnahme elektrischer Achsen

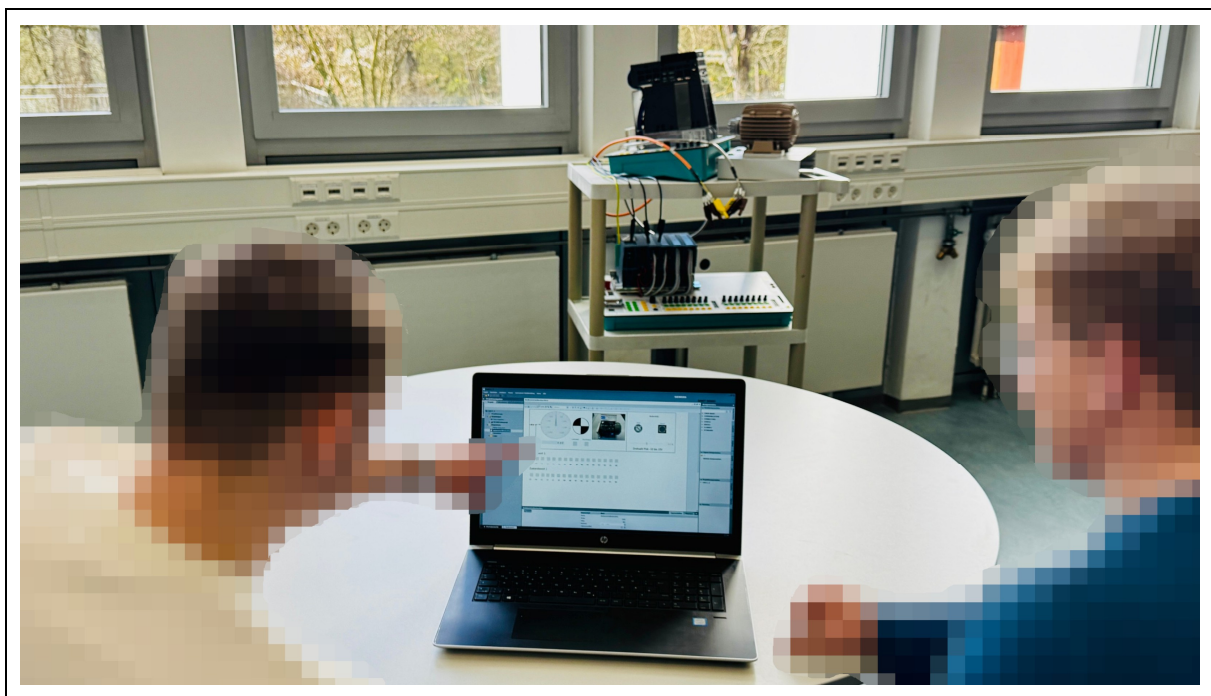


Abb. 1: Lernen am digitalen Zwilling, danach Transfer zur realen Anlage (Bildhintergrund)

1.	Einleitung	2
2.	Fachliche Grundlagen	7
3.	Lernformate und Aufgaben mit dem Digitale Zwilling	21
4.	Literatur-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	30

Stand: 7. Mai 2026

Autor: Martin Busse, M.Eng. und StR

Die Handreichung entstand in Abstimmung mit dem ISB (PIZ-Projektbegleitung).

1. Einleitung

Diese Handreichung richtet sich an Lehrende der beruflichen Bildung, die bereits im Rahmen ihres Studiums, durch ihre bisherige Unterrichtspraxis oder über einen Quereinstieg grundlegende Kenntnisse im Bereich elektrischer Achsen erworben haben. Sie versteht sich dabei ausdrücklich nicht als kleinschrittige „Klick-Anleitung“ für spezifische Softwareanwendungen. Vielmehr ist es das zentrale Anliegen dieses Dokuments, einen fundierten Eindruck davon zu vermitteln, welche didaktischen Herausforderungen, aber auch welche besonderen Vorteile der Einsatz eines digitalen Zwillings im Unterrichtsgeschehen – speziell im Kontext elektrischer Achsen – mit sich bringt.

1.1. Zielsetzung

Ziel ist es, den digitalen Zwilling bei der Inbetriebnahme elektrischer Achsen als methodisches Instrument so darzustellen, dass seine didaktischen Potenziale, seine technischen Voraussetzungen sowie seine Grenzen nachvollziehbar werden.

Unter einem digitalen Zwilling wird in diesem Kontext ein virtuelles, dynamisches Abbild eines realen technischen Systems verstanden (im Fall dieser Handreichung: ein elektrischer Motor mit allen notwendigen Teilen, welche ihn dazu befähigen zu drehen), das dessen Struktur, Funktion und Verhalten modellhaft nachbildet.

Der Einsatz eines digitalen Zwillings bietet im beruflichen Unterricht mehrere zentrale Vorteile. Zum einen können Kosten für den Sachaufwandsträger reduziert werden, da weniger reale Antriebsachsen, Steuerungen oder mechanische Komponenten beschafft werden müssen. Zum anderen wird das sicherheitstechnische Risiko deutlich verringert,

da Lernende erste Parametrierungen, Inbetriebnahmen und Fehlersuchen an virtuellen Modellen durchführen. Erst nach dieser Phase erfolgt die Übertragung auf reale Anlagen (siehe Abb. 1, S. 1). Dadurch lassen sich elektrische Gefährdungen, mechanische Fehlbewegungen und Beschädigungen von Komponenten vermeiden.

Darüber hinaus eröffnet der digitale Zwilling neue Möglichkeiten des zeit- und ortsunabhängigen Lernens. Inbetriebnahmeprozesse können in einem virtuellen Labor via Online-Training im Browser auch außerhalb des Präsenzunterrichts nachvollzogen und eingeübt werden. Dies trägt sowohl zur Vertiefung als auch zur nachhaltigen Sicherung fachlicher Kompetenzen bei.

Nicht zuletzt entlastet der digitale Zwilling die vorhandenen realen Unterrichtsmodelle. Durch die geringere Nutzung realer Anlagen sinken Verschleiß und Reparaturaufwand, was Lehrkräfte organisatorisch und zeitlich entlastet und Raum für eine intensivere pädagogische Begleitung der Lernprozesse schafft [vgl. 1, S. 4].

Die Handreichung ist im Rahmen des Projekts „Profilschule für Informatik und Zukunftstechnologien (PIZ)“ entstanden. Dieses Projekt verfolgt das Ziel, Schülerinnen und Schüler systematisch auf eine digital geprägte Arbeitswelt vorzubereiten und ihre Kompetenzen in Informatik und Zukunftstechnologien zu stärken [vgl. 2]. Die beteiligten Projektschulen wirken dabei als Multiplikatoren, deren Konzepte und Erfahrungen auch anderen Schulen zugänglich gemacht werden sollen. Die vorliegende Handreichung ist als ein Baustein dieser Transferidee zu verstehen.

1.2. Curriculare Einordnung

Der digitale Zwilling als methodisches Instrument lässt sich in der beruflichen Bildung zur Veranschaulichung komplexer technischer Zusammenhänge sowie zur strukturierten Einübung beruflicher Handlungskompetenzen einsetzen. In einschlägigen Lehrplänen sind hierfür Lernfelder vorgesehen, in denen sowohl theoretische Grundlagen als auch fachpraktische Inhalte der Antriebs- und Steuerungstechnik vermittelt werden.

In dieser Handreichung liegt der Fokus exemplarisch auf zwei Ausbildungsberufen, in denen der Einsatz digitaler Zwillinge im fachpraktischen Unterricht erprobt wurde. Für die Fachklassen der Mechatronikerinnen und Mechatroniker besteht ein direkter Bezug zum Lernfeld „Design und Erstellen mechatronischer Systeme“ [2, S. 18] in der Jahrgangsstufe 11. Dieses Lernfeld umfasst unter anderem Betriebskennwerte und Kennlinien von Antrieben, das Steuern und Regeln von Antriebssystemen, den Einsatz von Getrieben und Kupplungen, das Programmieren von Bewegungsabläufen sowie die Nutzung von Computersimulationen.

Ein vergleichbarer curricularer Bezug findet sich bei den Fachklassen der Elektronikerinnen und Elektroniker für Betriebstechnik. Im Lernfeld „Antriebssysteme auswählen und integrieren“ [3, S. 15] der Jahrgangsstufe 11 stehen Antriebssysteme, Stellglieder sowie Verfahren der Drehzahl- und Bewegungssteuerung im Mittelpunkt. Der digitale Zwilling ermöglicht es auch hier, theoretische Konzepte systematisch mit ihrer praktischen Umsetzung in der Steuerungs- und Antriebstechnik zu verknüpfen.

Der digitale Zwilling fungiert damit als verbindendes Element zwischen Theorie, Simulation und realer Praxis. Er unterstützt eine lernfeldorientierte, handlungsbezogene Unterrichtsgestaltung, ohne die reale Anlage zu ersetzen.

1.3. Didaktische Grundidee

Die didaktische Grundidee dieser Handreichung besteht darin, den digitalen Zwilling als vorbereitendes und ergänzendes Instrument bei der Inbetriebnahme elektrischer Achsen einzusetzen. Die reale Antriebsachse bildet dabei weiterhin den zentralen Bezugspunkt des Lernprozesses, während der digitale Zwilling zur strukturierten Vorbereitung und Analyse genutzt wird.

In einer ersten Phase werden Inbetriebnahme- und Bewegungsfunktionen an der virtuellen Achse erarbeitet. Parametrierungen, Bewegungsabläufe und Systemreaktionen können hierbei gezielt untersucht und variiert werden. Der digitale Zwilling dient in diesem Zusammenhang als Referenzsystem, an dem das erwartete Verhalten der realen Anlage nachvollzogen wird. Abstrakte fachliche Größen wie Geschwindigkeit, Beschleunigung oder Verzögerung werden durch die Simulation konkret erfahrbar.

In einer anschließenden Phase erfolgt die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf die reale Anlage. Das Verhalten der physischen Achse wird mit den zuvor beobachteten virtuellen Abläufen verglichen, und Abweichungen können fachlich eingeordnet werden. Der digitale Zwilling unterstützt diesen Prozess, indem er Orientierung bietet und die Analyse von Inbetriebnahme- und Fehlersituationen erleichtert.

Durch diese Abfolge wird die reale Anlage nicht ersetzt, sondern methodisch vorbereitet. Der digitale Zwilling trägt dazu bei, Inbetriebnahmeprozesse systematisch zu strukturieren und die Handlungssicherheit der Lernenden im Umgang mit komplexen Antriebssystemen zu erhöhen.

1.4. Neutralität und verwendete Materialien

Diese Handreichung folgt dem staatlichen Neutralitätsgebot und verzichtet bewusst auf konkrete Herstellerempfehlungen für Hard- oder Softwarelösungen im Bereich digitaler Zwillinge. Die dargestellten Konzepte sind herstellerunabhängig formuliert und auf unterschiedliche technische Plattformen übertragbar.

Der Schwerpunkt der Darstellung liegt auf konzeptionellen, methodischen und didaktischen Aspekten. Die beschriebenen Ansätze orientieren sich an einschlägigen Normen, Richtlinien und Standards der Automatisierungs- und Antriebstechnik, etwa aus dem Umfeld von VDE, VDI, PROFIdrive¹ oder PLCopen². Sofern Inhalte aus Fachliteratur oder Normendokumenten aufgegriffen werden, sind die entsprechenden Quellen kenntlich gemacht und im Literaturverzeichnis nachgewiesen.

¹ Anwender- und Herstellerverband (e.v.) für PROFIBUS/PROFINET Spezifikationen & Zertifizierung.

² Herstellerneutrale Organisation zur Standardisierung und Wiederverwendung von SPS-Software.

2. Fachliche Grundlagen

Um den digitalen Zwilling im Unterricht erfolgreich einzusetzen, ist ein fundiertes Verständnis der zugrunde liegenden Systemarchitektur erforderlich. Dieses Kapitel erläutert die grundlegenden Konzepte der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS), die Konfiguration von Technologieobjekten sowie die Prinzipien der Motion-Control. Ein zentraler Schwerpunkt liegt dabei auf der Kommunikation über Telegrammtypen (PROFIdrive) sowie der Definition der elektrischen Achse als mechatronisches Gesamtsystem. Diese fachliche Basis bildet die notwendige Voraussetzung für die Durchführung der darauffolgenden Lernformate.

2.1. Speicherprogrammierbare Steuerung

In Anlehnung an [5] wird im Folgenden das Konzept der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) erläutert. Eine SPS bildet seit mehreren Jahrzehnten das zentrale Element der industriellen Automatisierungstechnik. Sie dient dazu, technische Prozesse logisch zu steuern, indem sie Eingangssignale auswertet, diese nach festgelegten Programmanweisungen verarbeitet und daraus entsprechende Ausgangssignale ableitet. Im Unterschied zu fest verdrahteten Steuerungen erfolgt die Beschreibung der Steuerungsfunktion bei einer SPS vollständig in Software, was eine hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit ermöglicht.

In frühen Automatisierungslösungen beschränkte sich die Funktionalität von SPSen häufig auf das logische Verknüpfen digitaler Signale, etwa zum Schalten von Motorschützen oder Ventilen. Mit zunehmender Komplexität industrieller Maschinen und Anlagen wuchsen jedoch auch die Anforderungen an die Steuerungstechnik. Neben reinen Schaltaufgaben mussten zunehmend kontinuierliche Prozesse, Bewegungsabläufe

und zeitkritische Vorgänge beherrscht werden. Dies führte zur Integration leistungsfähigerer Prozessoren, erweiterter Peripheriemodule sowie spezieller Funktionsbaugruppen in die Steuerungssysteme.

Für die Ansteuerung elektrischer Antriebe bedeutet dies, dass die SPS nicht mehr lediglich Ein- und Ausschaltbefehle liefert, sondern komplexe Bewegungsanforderungen formuliert. Die Steuerung legt fest, wann eine Achse freigegeben wird, welche Bewegungsart ausgeführt werden soll und unter welchen Bedingungen ein sicherer Halt einzuleiten ist. Die eigentliche Umsetzung dieser Bewegungen erfolgt jedoch nicht unmittelbar auf Signalebene, sondern über strukturierte softwarebasierte Konzepte, die eine klare Trennung zwischen Steuerungslogik und antriebsspezifischer Funktionalität erlauben. Damit schafft die SPS die grundlegende Voraussetzung, um technische Systeme nicht nur zu schalten, sondern systematisch zu beschreiben und zu beherrschen. Sie stellt den logischen Rahmen bereit, innerhalb dessen komplexe Komponenten wie elektrische Achsen, Sensoren und Antriebe integriert werden können.

2.2. Technologieobjekte

Insbesondere bei der Ansteuerung von Antrieben, Messsystemen oder auch RFID-Systemen entsteht der Bedarf, funktional zusammengehörige Eigenschaften, Parameter und Kommunikationsmechanismen strukturiert zusammenzufassen. Zu diesem Zweck werden in modernen Automatisierungssystemen sogenannte Technologieobjekte (TO) eingesetzt. In der Fachliteratur und in einzelnen Dokumentationen findet sich hierfür teilweise auch die Bezeichnung Technologisches Objekt [5, S. 254]; im Folgenden wird durchgängig der Begriff Technologieobjekt verwendet.

Ein TO stellt in der Software der Steuerung ein abstrahiertes Abbild einer realen technischen Komponente dar. Es fungiert als softwareseitiger Stellvertreter der Hardware und fasst alle für den Betrieb relevanten Informationen in einer logisch geschlossenen Einheit zusammen. Dazu gehören unter anderem Parameter, Zustandsgrößen sowie die notwendigen Mechanismen zur Kommunikation mit angebundenen Baugruppen oder Antrieben. Die reale technische Komponente wird dadurch nicht direkt, sondern über ihr zugeordnetes Technologieobjekt angesprochen.

Ein zentrales Merkmal von Technologieobjekten besteht darin, dass sie konfiguriert und nicht klassisch programmiert werden. Die Erstellung eines TO erfolgt im Engineering-System in der Regel über geführte Assistenten, die den Anwender schrittweise durch den Konfigurationsprozess leiten. Dabei werden beispielsweise mechanische Kenndaten, Geberinformationen oder Kommunikationsparameter hinterlegt. Die resultierenden Daten werden anschließend in die Steuerung übertragen, sodass das Technologieobjekt seine Funktion eigenständig innerhalb der Steuerungsumgebung ausführen kann.

Durch diese Abstraktion wird die Steuerungslogik wesentlich vereinfacht. Antriebsspezifische Details werden im Technologieobjekt gekapselt, sodass der Anwender über eine klar definierte Funktionsschnittstelle mit der Komponente interagiert. Bewegungen, Kopplungen oder Zustandsabfragen werden damit auf einer funktionalen Ebene beschrieben, die dem realen technischen Prozess entspricht.

Technologieobjekte verbinden die allgemeine SPS-Logik mit den spezifischen Eigenschaften mechatronischer Komponenten und stellen dafür eine standardisierte, wiederverwendbare Struktur bereit. Sie bilden die Grundlage, um Bewegungen elektrischer

Achsen nicht nur auszulösen, sondern systematisch zu beschreiben und zu gestalten. Die konkrete Umsetzung dieser Bewegungsbeschreibungen ist Gegenstand des folgenden Abschnitts zur Motion-Control.

2.3. Motion-Control

Motion-Control bezeichnet die softwaregestützte Steuerung und Überwachung von Bewegungen elektrischer Achsen. Aufbauend auf der in Technologieobjekten gekapselten Achsstruktur ermöglicht Motion-Control, Bewegungen nicht nur auszulösen, sondern in ihrer zeitlichen und dynamischen Ausprägung gezielt zu beschreiben. Dabei wird festgelegt, wohin sich eine Achse bewegt, mit welcher Geschwindigkeit dies geschieht und wie Anfahren, Übergänge und Anhalten gestaltet sind.

Zur strukturierten Umsetzung solcher Bewegungsaufgaben haben sich standardisierte Funktionsbausteine etabliert, wie sie beispielsweise in der PLCopen-Spezifikation „Function Blocks for Motion Control“ [6, 6] beschrieben sind. Diese Bausteine stellen herstellerübergreifend einheitliche Schnittstellen zur Verfügung und erlauben es, typische Bewegungsfunktionen unabhängig von der konkreten Antriebsplattform zu realisieren. Grundlegende Funktionen sind dabei die Leistungsfreigabe der Achse, manuelle Verfahrbewegungen, Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit sowie der kontrollierte Stopp (siehe Tab. 1, S. 11).

Systembausteine für Motion Control				
MC_Power Axis Axis Enable Status EnablePositive Valid EnableNegative Error ErrorID			AXIS_REF AXIS_REF BOOL BOOL BOOL WORD	Diese Anweisung steuert die funktionale Freigabe des Technologieobjekts sowie den energetischen Schaltzustand der Achse.
MC_Stop Axis Axis Execute Done Deceleration Busy Jerk CommandAborted Error ErrorID			AXIS_REF AXIS_REF BOOL BOOL BOOL BOOL WORD	MC_Stop bewirkt den kontrollierten Stillstand der Achse unter Sperrung neuer Fahraufträge, wobei die Lageregelung aktiv bleibt.
MC_Jog Axis Axis JogForward Done JogBackward Busy Velocity CommandAborted Acceleration Error Deceleration ErrorID Jerk			AXIS_REF AXIS_REF BOOL BOOL BOOL BOOL WORD	Über MC_Jog wird die Achsbewegung im manuellen Tippbetrieb realisiert.
MC_MoveVelocity Axis Axis Execute InVelocity ContinuousUpdate Busy Velocity Active Acceleration CommandAborted Deceleration Error Jerk ErrorID Direction BufferMode			AXIS_REF AXIS_REF BOOL BOOL BOOL BOOL WORD	Diese Komponente dient der Verfahrensweise der Achse mit definierter, konstanter Geschwindigkeits- bzw. Drehzahlvorgabe.
Hinweis zu MC_Jog und MC_MoveVelocity: Die dynamische Profilierung erfolgt über die Parameter „Velocity“, „Jerk“, „Acceleration“ und „Deceleration“. Sind die Eingänge nicht belegt, werden automatisch die Parameter des Technologieobjekts übernommen.				

Tab. 1: Auszug relevanter Systembausteine für Motion Control [vgl. 6, S. 17, vgl. 7, 29,31,45]

Motion-Control übernimmt damit die Rolle einer vermittelnden Instanz zwischen der logischen Steuerungsebene der SPS und dem physikalischen Bewegungsverhalten der realen Achse. Die Qualität einer Bewegung wird nicht allein durch das Erreichen eines

Zielwerts bestimmt, sondern durch Parameter wie Beschleunigung, Verzögerung und Übergangsverhalten.

2.4. Elektrische Achse

Aus Sicht der Motion-Control wird eine elektrische Achse als funktionale Einheit betrachtet, die eine definierte Bewegung ausführt. Technisch handelt es sich dabei um ein mechatronisches Gesamtsystem, das aus mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Komponenten besteht. Erst das abgestimmte Zusammenwirken dieser Komponenten ermöglicht eine präzise, reproduzierbare Bewegung.

Zentrales Element der Achse ist der elektrische Motor, der die mechanische Bewegung erzeugt. Über die angeschlossene Mechanik, beispielsweise Getriebe, Spindeln oder Riemenantriebe, wird diese Bewegung in die gewünschte Bewegungsform umgesetzt. Die mechanischen Eigenschaften bestimmen dabei maßgeblich das dynamische Verhalten der Achse und gehen als Parameter in die Konfiguration der Steuerung ein. Diese Parametrierung erfolgt in der Regel einmalig und bildet die Grundlage für alle weiteren Bewegungsberechnungen.

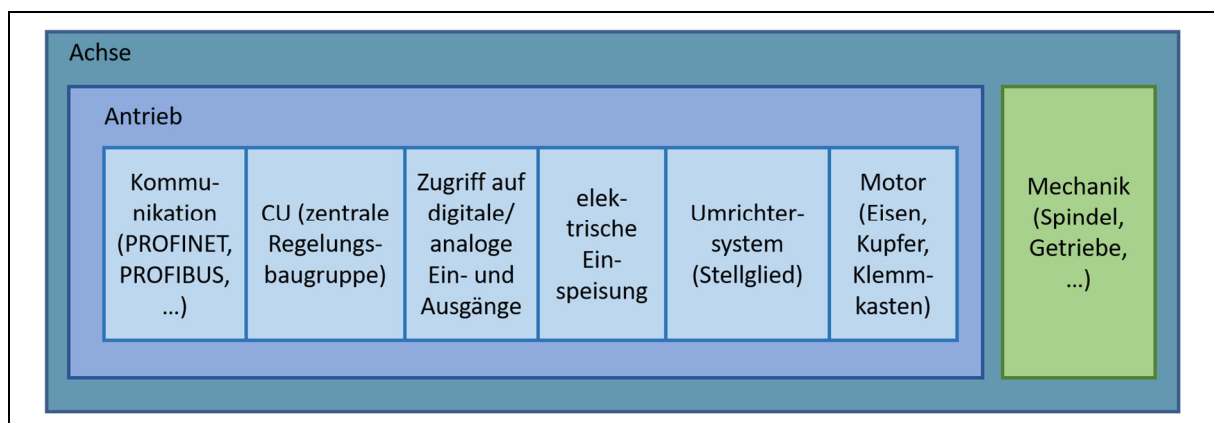


Abb. 2: Komponenten einer elektrischen Achse

Die Ansteuerung des Motors erfolgt über einen Umrichter, der die netzseitige elektrische Energie in mehreren Stufen aufbereitet. Zunächst wandelt ein Gleichrichter den zugeführten Wechselstrom in Gleichstrom um und stellt diesen über einen Gleichspannungszwischenkreis stabil zur Verfügung. Darauf aufbauend erzeugt der Inverter aus diesem Gleichstrom eine frequenz- und spannungsvariable Wechselspannung, mit der Drehzahl, Drehmoment und Bewegungsrichtung des Motors gezielt beeinflusst werden können.

Die Vorgabe dieser Sollwerte sowie die Auswertung von Rückmeldungen erfolgen durch die zugeordnete Control Unit (CU) (siehe Abb. 3). Sie übernimmt die Koordination zwischen Steuerung, Motion-Control-Funktionen und Antrieb, berechnet die erforderlichen Sollgrößen und überträgt diese an den Umrichter. Gleichzeitig erfasst sie Zustands- und Istwerte des Antriebs und stellt diese der übergeordneten Steuerung zur Verfügung. Die SPS selbst übernimmt dabei keine direkten Leistungsfunktionen, sondern beschreibt die gewünschte Bewegung auf einer funktionalen Ebene.

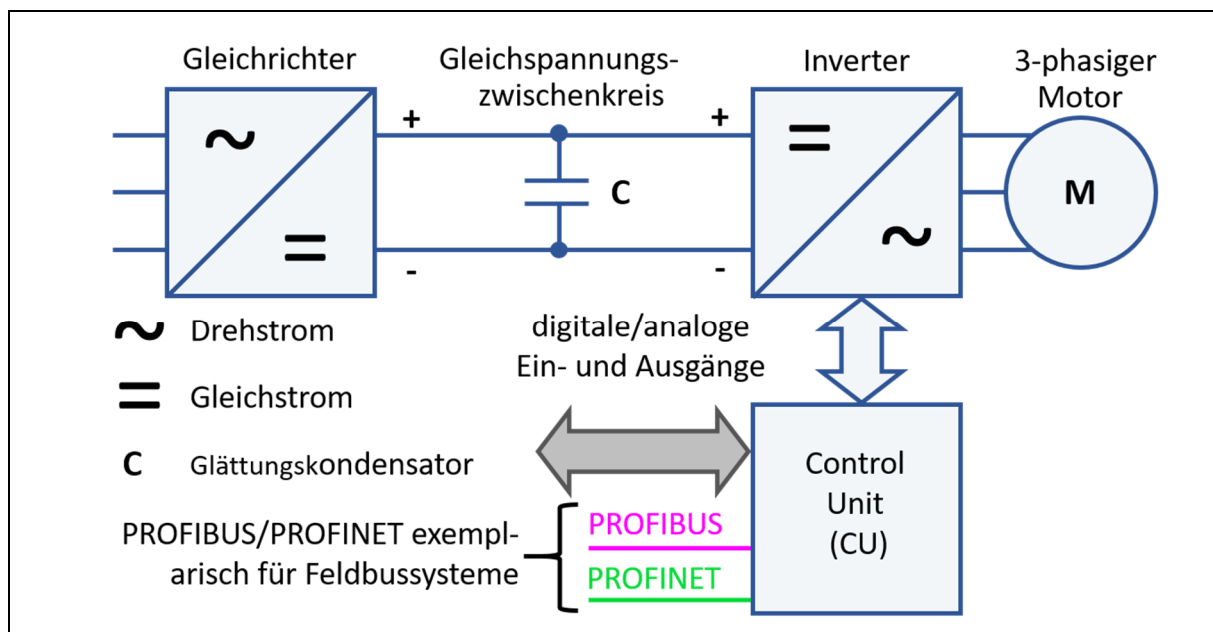


Abb. 3: Hauptkomponenten eines elektrischen Antriebs

2.5. Kommunikation über Telegrammtypen, Prozessdaten

Die Ausführung von Bewegungen elektrischer Achsen erfordert einen kontinuierlichen Austausch von Steuer- und Zustandsinformationen zwischen SPS, Control Unit (CU) und Umrichter. Dieser Datenaustausch erfolgt in der Automatisierungstechnik über standardisierte Prozessdaten, die zyklisch über ein Feldbussystem übertragen werden. Sie verbinden die funktionale Bewegungsbeschreibung auf Steuerungsebene mit der leistungsseitigen Umsetzung im Antrieb.

Ein etablierter Standard für diese Kommunikation ist PROFIdrive, der von der PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. (PNO) [8] entwickelt wurde. PROFIdrive basiert auf anerkannten Normen und Richtlinien der Automatisierungstechnik und definiert eine einheitliche, herstellerunabhängige Struktur für die Datenübertragung zwischen Steuerung und elektrischen Antrieben. Zentrale Elemente dieses Standards sind sogenannte Telegrammtypen, die den Aufbau und die Bedeutung der ausgetauschten Prozessdaten festlegen.

Für grundlegende Bewegungsaufgaben wird häufig Telegrammtyp 1 eingesetzt, der typischerweise für drehzahlgeregelte Anwendungen verwendet wird. Für positioniergeregelte Achsen werden erweiterte Telegrammtypen genutzt, etwa Telegrammtyp 3, die zusätzliche Prozessdaten für die Positionsregelung bereitstellen. In dieser Handreichung wird exemplarisch Telegrammtyp 1 betrachtet, da er sich besonders gut zur Veranschaulichung grundlegender Kommunikations- und Steuerungsprinzipien eignet.

Im Rahmen von Telegrammtyp 1 übermittelt die SPS über die CU ein Steuerwort (STW1) an den Umrichter, das unter anderem Befehle zur Betriebsfreigabe, zum Starten und Stoppen sowie zur Sollwertfreigabe enthält. Der Umrichter setzt diese Vorgaben um und sendet im Gegenzug ein Zustandswort (ZSW1) zurück, das Informationen

über den aktuellen Betriebszustand des Antriebs bereitstellt, etwa über Betriebsbereitschaft oder aktive Störungen.

Die CU übernimmt dabei eine vermittelnde Rolle zwischen Steuerung, Motion-Control-Funktionen und der Achse. Durch den zyklischen Austausch von STW1 und ZSW1 sowie die Vorgabe des Drehzahlsollwerts (N_SOLL) und die Rückmeldung des Drehzahl-Istwerts (N_IST) entsteht ein geschlossener Kommunikations- und Rückkopplungskreis, der eine sichere und nachvollziehbare Bewegungsführung ermöglicht. Tab. 2 zeigt exemplarisch den Aufbau und die Bedeutung der Prozessdaten des Telegrammtyps 1, sodass die Struktur dieses Datenaustauschs konkret nachvollzogen werden kann.

Bezeichnung	Bit	Bedeutung	Bemerkungen
STW1	0	ON/OFF1 (Betriebsbereitschalten)	1 = Betriebsbereit, 0 = Abschaltung
	1	OFF2 (Austrudeln des Antriebs)	1 = Nicht zum Stillstand auslaufen, 0 = Sofortige Impulslöschung
	2	OFF3 (Schnellhalt des Antriebs)	1 = Kein schneller Stillstand, 0 = Schneller Stillstand
	3	Impulsfreigabe (Antriebs-Start)	1 = Betrieb freigeben, 0 = Betrieb sperren
	4	Hochlaufgeber-Freigabe	1 = Hochlaufgeber-Freigabe möglich, 0 = Hochlaufgeberausgang auf 0
	5	Hochlaufgeber Start/Halt	1 = Hochlaufgeber-Freigabe möglich, 0 = Hochlaufgeber „einfrieren“
	6	Sollwert-Freigabe	1 = Sollwert freigeben, 0 = Sollwert sperren
	7	Fehler-Quittierung	1 = Fehler quittieren, 0 = Keine Bedeutung
	8	JOG rechts (Tippen rechts)	1 = Antrieb läuft zum Sollwert, 0 = Antrieb bremst
	9	JOG links (Tippen links)	1 = Antrieb läuft zum Sollwert, 0 = Antrieb bremst
	10	Steuerung durch PLC	1 = Steuerung durch PLC, 0 = Keine Steuerung durch PLC
ZSW1	0	Einschaltbereit	1 = Einschaltbereit, 0 = Nicht einschaltbereit
	1	Betriebsbereit	1 = Betriebsbereit, 0 = Nicht betriebsbereit
	2	Betrieb	1 = Betrieb freigegeben, 0 = Betrieb gesperrt
	3	Fehler aktiv	1 = Störung wirksam, 0 = Keine Störung
	4	Austrudeln aktiv	1 = Kein OFF2 aktiv, 0 = Austrudeln aktiv
	5	Schnellhalt aktiv	1 = Kein OFF3 aktiv, 0 = Schnellhalt aktiv
	6	Einschaltsperr	1 = Einschaltsperr aktiv, 0 = Einschalten möglich
	7	Warnung aktiv	1 = Warnung wirksam, 0 = Keine Warnung
	8	Abweichung Soll-/Istwert	1 = Soll-Ist-Abweichung innerhalb Toleranz, 0 = Außerhalb Toleranz
	9	Steuerung durch PLC angefordert	1 = Steuerung angefordert, 0 = Betrieb vor Ort
	10	Maximalfrequenz erreicht	1 = Frequenz erreicht, 0 = Frequenz nicht erreicht

Tab. 2: Prozessdaten ZSW1 und STW1 [8, 89, 93; eigene Übersetzung]

2.6. Digitaler Zwilling

Simulation bezeichnet das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um Erkenntnisse zu gewinnen, die auf reale Systeme übertragbar sind (VDI 2815 Blatt 1) [9]. Im technischen Kontext dient sie der Untersuchung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen unter kontrollierten Randbedingungen, ohne in das reale System einzugreifen.

Auf dieser Grundlage beschreibt der digitale Zwilling ein virtuelles Abbild einer elektrischen Achse, in dem Steuerung, Kommunikation und dynamisches Systemverhalten zu einem gekoppelten Modell zusammengeführt werden. Die für die Inbetriebnahme relevanten Schritte werden zunächst in dieser virtuellen Umgebung durchgeführt und anschließend auf die reale Achse übertragen. Der digitale Zwilling fungiert dabei als Referenzsystem, das das erwartete Verhalten der realen Anlage vorab abbildet.

2.6.1. Virtuelle speicherprogrammierbare Steuerung

Die virtuelle speicherprogrammierbare Steuerung bildet das Verhalten einer realen SPS innerhalb des digitalen Zwillings ab. In ihr wird das originale Anwenderprogramm ausgeführt, einschließlich der zyklischen Programmbearbeitung, der verwendeten Technologieobjekte sowie der eingesetzten Motion-Control-Funktionen. Aus Sicht des Steuerungsprogramms besteht kein funktionaler Unterschied zwischen virtueller und realer Ausführung.

Die virtuelle Steuerung verarbeitet Eingangsdaten, berechnet Bewegungs- und Steuergrößen und überträgt diese über die definierten Kommunikationsschnittstellen an die

angebundene virtuelle Achse. Gleichzeitig wertet sie Zustands- und Rückmeldedaten aus und reagiert auf Betriebs- oder Fehlersituationen. Änderungen an Programm oder Parametern können so unter realitätsnahen Bedingungen überprüft werden.

2.6.2. Virtuelle elektrische Achse

Die virtuelle elektrische Achse repräsentiert das reale antriebstechnische und mechanische System in modellierter Form. Sie bildet das dynamische Verhalten der Achse ab und reagiert auf die von der virtuellen Steuerung vorgegebenen Sollwerte. Dazu gehören insbesondere Beschleunigungs- und Bremsvorgänge, Grenzwerte sowie grundlegende physikalische Zusammenhänge.

Neben der Bewegungsdynamik wird auch das funktionale Verhalten des Antriebssystems abgebildet. Steuer- und Zustandsinformationen werden entsprechend der verwendeten Telegrammtypen verarbeitet, sodass die Kommunikation zwischen Steuerung und Achse dem realen Betrieb entspricht. Die virtuelle Achse stellt damit nicht nur Bewegungen dar, sondern auch typische Reaktionen auf Freigaben, Sollwertänderungen oder Störungen.

2.6.3. Kopplung von virtueller Steuerung und virtueller Achse

Der digitale Zwilling entsteht durch die Kopplung der virtuellen speicherprogrammierbaren Steuerung mit der virtuellen elektrischen Achse über den Arbeitsspeicher des Computers. Wie in Abb. 4, S. 18 dargestellt, sind beide Systeme über dieselben Kommunikationsmechanismen (z.B. PROFIdrive-Telegram) verbunden, die auch im realen

Betrieb eingesetzt werden. Steuer- und Zustandsdaten werden zyklisch ausgetauscht und bilden einen geschlossenen Regel- und Kommunikationskreis.

Durch diese Kopplung lassen sich Bewegungsabläufe, Freigabesequenzen und Systemreaktionen realitätsnah nachvollziehen. Der digitale Zwilling verhält sich funktional wie das reale System und ermöglicht es, Inbetriebnahmeprozesse vollständig virtuell durchzuführen und zu überprüfen, bevor sie auf die reale Anlage übertragen werden.

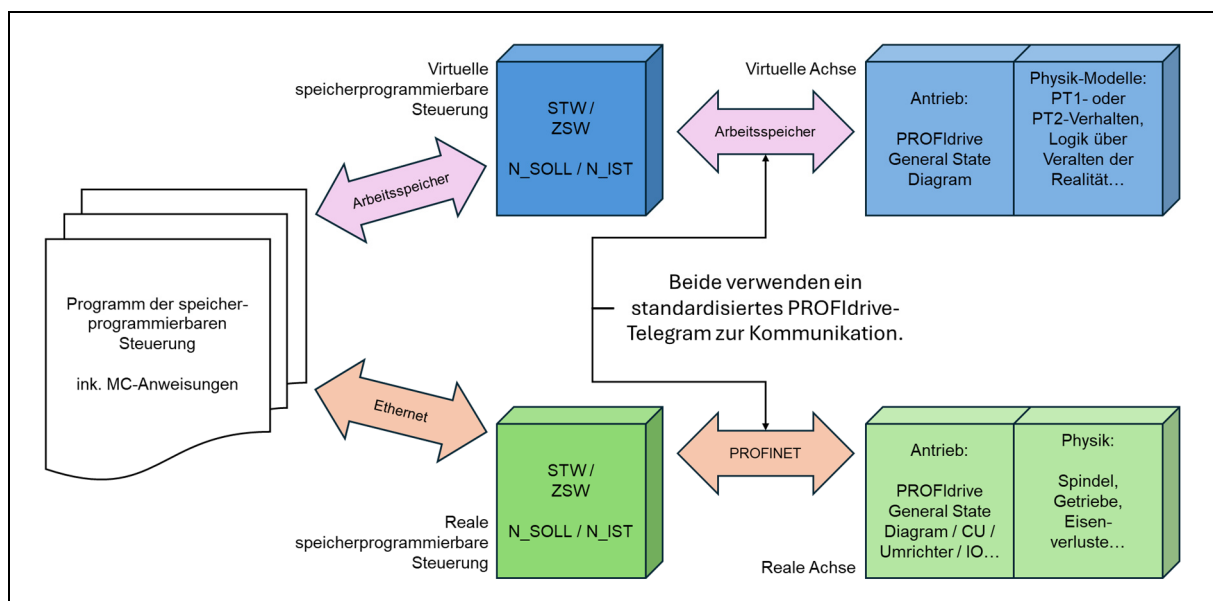


Abb. 4: Gegenüberstellung: Virtuelle Steuerung/Achse vs. reale Steuerung/Achse

2.6.4. Technische Voraussetzungen und Grenzen des Modells

Der Einsatz eines digitalen Zwillings erfordert eine Rechnerumgebung, die sowohl die Ausführung der virtuellen Steuerung als auch die Simulation des Anlagenverhaltens zuverlässig unterstützt. Für einen flüssigen Arbeitsablauf im Unterricht haben sich folgende Mindestanforderungen bewährt [vgl. 10]:

- Prozessor: Mehrkern-CPU der Mittelklasse (z. B. Intel Core i7 oder vergleichbar), um Steuerungssimulation und Anlagenmodell parallel auszuführen.
- Arbeitsspeicher: mindestens 16 GB RAM, da mehrere Engineering- und Simulationstools gleichzeitig betrieben werden.
- Grafikkarte: dedizierte oder leistungsfähige integrierte Grafikeinheit ab 4 GB Grafikspeicher, insbesondere bei 3D- oder verhaltensorientierten Visualisierungen wird mehr Grafikspeicher benötigt.
- Anzeige: optional ein Dual-Monitor-Setup (z. B. zwei 24-Zoll-Monitore), um Programmierumgebung und Simulation gleichzeitig im Blick zu behalten; alternativ ist auch der Betrieb an einem Einzelmonitor mit entsprechender Fensterorganisation möglich.

Diese Ausstattung ermöglicht es, virtuelle Steuerung und virtuelle elektrische Achse in Echtzeit zu koppeln und Bewegungs- sowie Kommunikationsabläufe flüssig darzustellen.

Trotz dieser Möglichkeiten besitzt der digitale Zwilling modellbedingte Grenzen, die im Unterricht bewusst thematisiert werden sollten. Aus der Perspektive der Lehrkraft ergeben sich insbesondere folgende Aspekte:

1. Vereinfachtes physikalisches Verhalten:

Reale Effekte wie Bauteiltoleranzen, Verschleiß, Temperaturdrift oder nichtlineare Reibung werden nur näherungsweise abgebildet. Schülerinnen und Schüler müssen darauf vorbereitet werden, dass sich die reale Achse in Details anders verhält als das virtuelle Modell.

2. Keine vollständige Abbildung realer Fehlerbilder:

Installations-, Verdrahtungs- oder Hardwarefehler treten im reinen Simulationsbetrieb nicht oder nur modelliert auf. Diese Aspekte müssen im Unterricht gezielt ergänzt oder bei der realen Inbetriebnahme thematisiert werden.

3. Gefahr einer Überschätzung der Simulation:

Lernende können den Eindruck gewinnen, dass korrektes Verhalten im digitalen Zwilling automatisch zu fehlerfreiem Verhalten an der realen Anlage führt. Hier ist eine bewusste Reflexion über Unterschiede zwischen Modell und Realität erforderlich.

4. Verfügbarkeit und Beschaffung von Softwarelizenzen:

Für die virtuelle speicherprogrammierbare Steuerung und die virtuelle elektrische Achse müssen die erforderlichen Softwarelizenzen installiert sein. Dies betrifft nicht nur die technische Nutzbarkeit der Werkzeuge, sondern umfasst auch den organisatorischen Beschaffungsprozess, welcher mit dem Sachaufwandsträger der jeweiligen Schule abzustimmen ist.

3. Lernformate und Aufgaben mit dem Digitale Zwilling

Die Bearbeitung der nachfolgenden Aufgaben erfolgt innerhalb des Engineering-Systems durch die Lernenden. Dies ist die zentrale Softwareumgebung, die zur Projektierung der Hardware, zur Konfiguration der Technologieobjekte sowie zur Programmierung der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) dient.

Damit die Simulationssoftware den digitalen Zwilling korrekt abbilden kann, müssen die Rahmenbedingungen (z.B. Adressbereiche der Prozessdaten oder der verwendete Telegrammtyp) definiert sein. Hierzu ist es erforderlich, die Hardwarekonfiguration der SPS und der elektrischen Achse in die virtuelle Umgebung zu überführen. Dieser vorbereitende Schritt wird seitens der Lehrkraft durchgeführt, indem ein funktionsfähiges reales Projekt als Basis für die virtuelle Welt herangezogen wird. Auf dieser Grundlage lassen sich die folgenden Projekte und Aufgaben durchführen.

3.1. Projektierung und Parametrierung der digitalen Systemumgebung

3.1.1. Netzwerktechnik

1. Pädagogische Erläuterung

Dieses Lernformat zielt darauf ab, den Lernenden die Bedeutung der industriellen Kommunikation als Bindeglied zwischen Steuerungsebene und Antriebsebene zu vermitteln. Aus pädagogischer Sicht steht das Verständnis für die Systemarchitektur im Vordergrund: Die Lernenden sollen lernen, dass eine elektrische Achse nur dann kontrolliert werden kann, wenn eine konsistente logische und physikalische Vernetzung zur SPS besteht.

2. Einleitung für Schülerinnen und Schüler

Innerhalb des Engineering-Systems ist die Netzsicht das zentrale Werkzeug, um die Kommunikation zwischen den verschiedenen Komponenten zu projektieren. Damit die SPS Steuerbefehle wie Start, Stopp oder Drehzahlsollwerte an die elektrische Achse übertragen kann, müssen beide Teilnehmer eindeutig miteinander vernetzt sein. Diese Verbindung stellt sicher, dass die Geräte logisch demselben Netzwerk zugeordnet sind und eine gültige Kommunikationsbeziehung besitzen. Ohne diese korrekte Vernetzung kann kein zyklischer Austausch von Prozessdaten stattfinden, was zu Kommunikationsfehlern und nicht ansprechbaren Antrieben führen würde.

3. Handlungsauftrag für Schülerinnen und Schüler

- Öffnen Sie im Engineering-System die Netzsicht und überprüfen Sie, ob die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) und die elektrische Achse demselben Netzwerk zugeordnet sind.
- Kontrollieren Sie, ob eine grafische Verbindungslinie zwischen den Geräten dargestellt wird und ob beide Teilnehmer über eine gültige Schnittstelle im selben Subnetz verfügen.
- Falls keine Verbindung besteht, weisen Sie der elektrischen Achse die entsprechende Schnittstelle der SPS zu.
- Überprüfen Sie in den Eigenschaften der elektrischen Achse, ob die Adressen für den Datenaustausch korrekt vergeben wurden und speichern sowie übersetzen Sie die Konfiguration fehlerfrei.

3.1.2. Konfiguration des Technologieobjekts inklusive PROFIdrive-Schnittstelle

1. Pädagogische Erläuterung

Das Lernformat zur Konfiguration des Technologieobjekts vermittelt die notwendige Abstraktionsebene zwischen Software und Hardware. Die Lernenden sollen verstehen, dass eine elektrische Achse (bestehend aus Umrichter, Motor und Mechanik) im Steuerungsprogramm durch ein logisches Abbild repräsentiert wird. Das pädagogische Ziel ist die Einsicht, dass technische Parameter (wie Getriebeübersetzungen oder Drehzahlgrenzen) einmalig konfiguriert werden müssen, um später komplexe Bewegungen über standardisierte Befehle ausführen zu können, ohne die zugrunde liegende Hardware jedes Mal neu programmieren zu müssen.

2. Einleitung für Schülerinnen und Schüler

Bei der Arbeit mit einer elektrischen Achse reicht es nicht aus, diese lediglich ein- oder auszuschalten. Vielmehr müssen physikalische Größen wie Drehzahlen, Beschleunigungen und mechanische Grenzen berücksichtigt werden. Hierzu nutzen Sie in der SPS ein Technologieobjekt. Dieses Objekt bildet die elektrische Achse als logische Einheit in der SPS ab. Es kapselt die Antriebsfunktionalität und übernimmt die strukturierte Kommunikation über Telegrammtypen (z.B. PROFIdrive). Das Technologieobjekt sorgt dafür, dass die physikalischen Eigenschaften des Motors und der Mechanik konsistent mit den Bewegungsfunktionen der Steuerung verknüpft sind.

3. Handlungsauftrag für Schülerinnen und Schüler

- Legen Sie in der SPS ein neues Technologieobjekt für eine geschwindigkeitsgeregelte Achse an.
- Ordnen Sie diesem Technologieobjekt die zuvor vernetzte elektrische Achse zu und wählen Sie den passenden Telegrammtyp für die Datenübertragung aus.

- Parametrieren Sie die Bezugsdrehzahl sowie die maximale Drehzahl entsprechend der technischen Vorgaben des Motors.
- Stellen Sie die Grenzwerte für Beschleunigung und Verzögerung ein und definieren Sie das Verhalten für einen Stopp.
- Speichern und übersetzen Sie die Konfiguration und verifizieren Sie, dass das Technologieobjekt im Engineering-System betriebsbereit angelegt wurde.

3.2. Ansteuerung durch PLCopen Motion-Control-Bausteine

1. Pädagogische Erläuterung

Dieses Modul stellt den Übergang von der Konfiguration der Achse (siehe Abschnitt 3.1) zur funktionalen Programmierung dar. Das primäre pädagogische Ziel ist die Vermittlung von Kompetenzen im Bereich der standardisierten Softwarearchitektur. Die Lernenden sollen verstehen, dass durch den Einsatz von PLCopen-Bausteinen eine Abstraktionsebene geschaffen wird, die komplexe Antriebsfunktionen in handhabbare, modulare Einheiten kapselt.

2. Einleitung für Schülerinnen und Schüler

Um elektrische Achsen herstellerübergreifend und effizient anzusteuern, nutzen wir die Spezifikationen der PLCopen (einer herstellerneutralen Organisation zur Standardisierung von Software für die industrielle Automatisierung; siehe www.plcopen.org). Der große Vorteil für Sie als Programmierer liegt in der Abstraktion: Sie müssen sich nicht mehr um die manuelle Manipulation einzelner Bits im Steuerwort (STW) oder Zustandswort (ZSW) kümmern. Diese Aufgabe übernehmen die sogenannten Motion-Control-Funktionsbausteine. Während diese Bausteine intern den gesamten zyklischen Datenaustausch und die Einhaltung der korrekten PROFIdrive-Zustandsfolgen triggern,

bietet die Schnittstelle für Sie lediglich eine überschaubare Anzahl an Ein- und Ausgängen (siehe Tab. 1, S. 11).

3. Handlungsauftrag für Schülerinnen und Schüler

- Öffnen Sie Ihr Projekt im Engineering-System und rufen Sie aus der Bibliothek für „Motion Control“ die Bausteine MC_Power, MC_Jog und MC_MoveVelocity auf.
- Verknüpfen Sie den Eingang „Axis“ jedes Bausteins mit dem von Ihnen zuvor angelegten Technologieobjekt der elektrischen Achse (siehe Abschnitt 3.1.2., S. 23).
- Beschalten Sie den Eingang Enable bei MC_Power mit einer Variable, um die Achse freizuschalten.
- Vergeben Sie für MC_Jog und MC_MoveVelocity sinnvolle Testwerte für Geschwindigkeit und Dynamik (Beschleunigung/Verzögerung), die innerhalb der Grenzen Ihres Technologieobjekts liegen.
- Inbetriebnahme am Digitalen Zwilling:
 - Laden Sie das Programm in die virtuelle Steuerung.
 - Schalten Sie die Achse über MC_Power frei und beobachten Sie den Ausgang Status sowie den virtuellen Antrieb.
 - Testen Sie die Bewegungsfunktionen (Jog oder MoveVelocity) und prüfen Sie, ob die virtuelle Achse wie erwartet reagiert.

3.3. Beobachten und Dokumentieren

1. Pädagogische Erläuterung

Dieses Modul dient der Vertiefung des Verständnisses für die interne Datenkommunikation. Die Lernenden sollen theoretischen Konzepte der Prozessdaten (STW1 und ZSW1) in der Praxis anwenden. Pädagogisches Ziel ist die Befähigung zur systematischen Fehlerdiagnose und Prozessanalyse, indem die Lernenden den Bit-Verkehr interpretieren und in ein logisches Zustandsmodell überführen.

2. Einleitung für Schülerinnen und Schüler

Die Steuerung einer elektrischen Achse basiert auf einem kontinuierlichen Austausch von Steuerworten (STW1) und Zustandsworten (ZSW1). Das Zustandswort beschreibt, in welchem Betriebszustand sich die Achse gerade befindet (z.B. „Einschaltbereit“ oder „Betrieb freigegeben“), während das Steuerwort die Kommandos für Zustandswechsel liefert (siehe Abb. 5, S. 27). In dieser Aufgabe dokumentieren Sie das Zustandsverhalten nach dem PROFIdrive-Standard. Indem Sie den Bit-Verkehr mitloggen, rekonstruieren Sie ein Zustandsdiagramm, das die logischen Abläufe zwischen der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) und der elektrischen Achse sichtbar macht.

3. Handlungsauftrag für Schülerinnen und Schüler

- Erstellen Sie ein Protokoll über das Hochlauf- und Bremsverhalten der Achse unter Angabe Ihrer gewählten Parameter (Drehzahl, Rampen).
- Loggen Sie den Bit-Verkehr von STW1 und ZSW1 während der unter Kapitel 3.2 durchgeführten Bedienhandlungen mit.
- Leiten Sie aus diesen Daten ein Zustandsdiagramm ab und kennzeichnen Sie die jeweiligen Bits, die zu einem Zustandswechsel geführt haben.

- Dokumentieren Sie charakteristische Merkmale in den Zustandsworten, die eine erfolgreiche Inbetriebnahme oder eine Störung signalisieren.

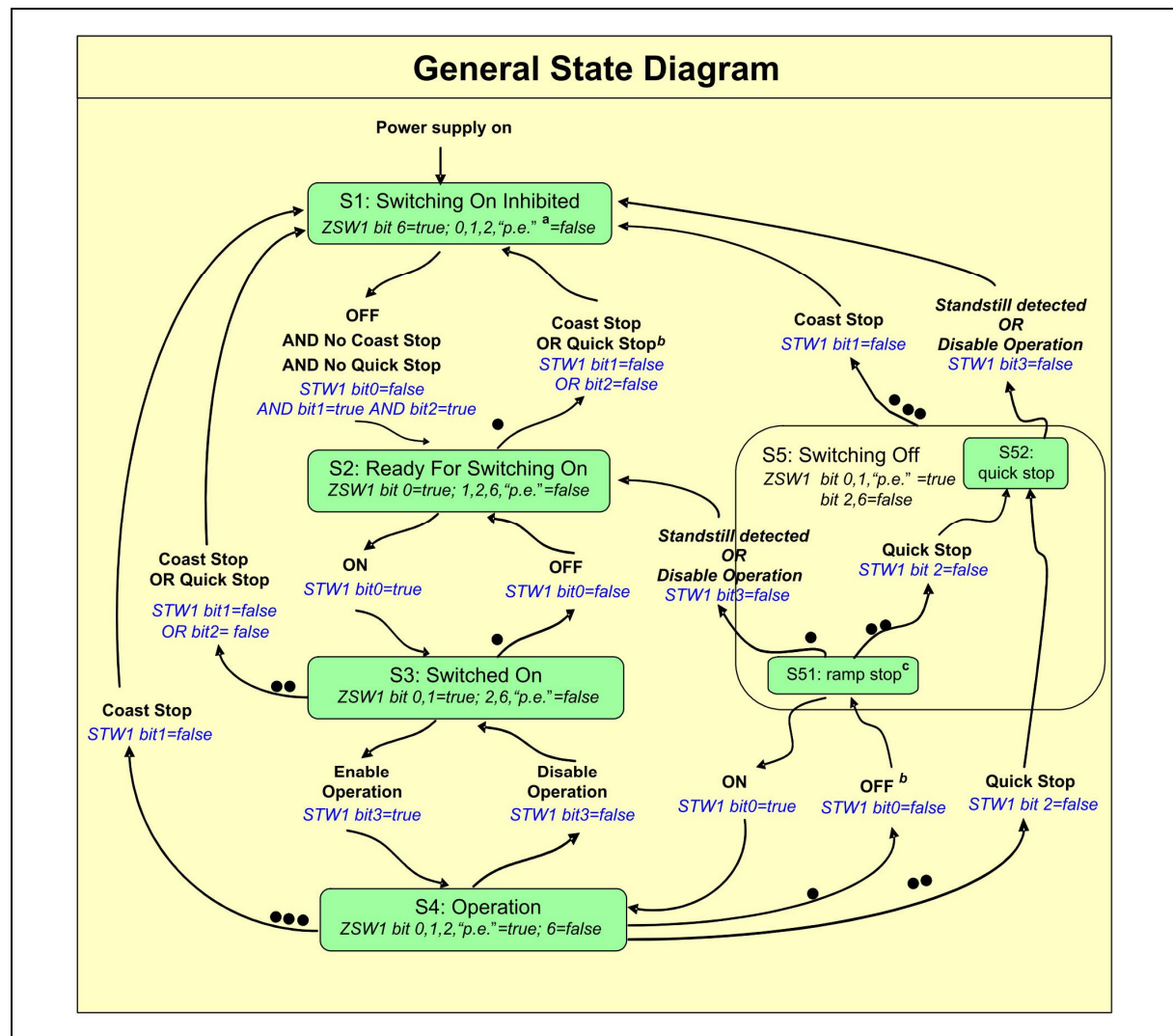


Abb. 5: PROFIdrive General State Diagram [9, S. 98]

3.4. Lösungserwartung zu den vorangegangenen Handlungsaufträgen

Folgende Abbildung stellt das Verhalten bei einem Hochfahren und Abbremsen dar, dazu wurden folgende Dynamikvoreinstellungen getroffen:

- Hochlaufzeit: 4,0 s / Rücklaufzeit: 4,0 s
- Beschleunigung: $3,33 \text{ 1/s}^2$ / Verzögerung: $3,33 \text{ 1/s}^2$
- Ruck: $3,33 \text{ 1/s}^3$
- Max Drehzahl: 600 1/min (entspricht 10 1/s)

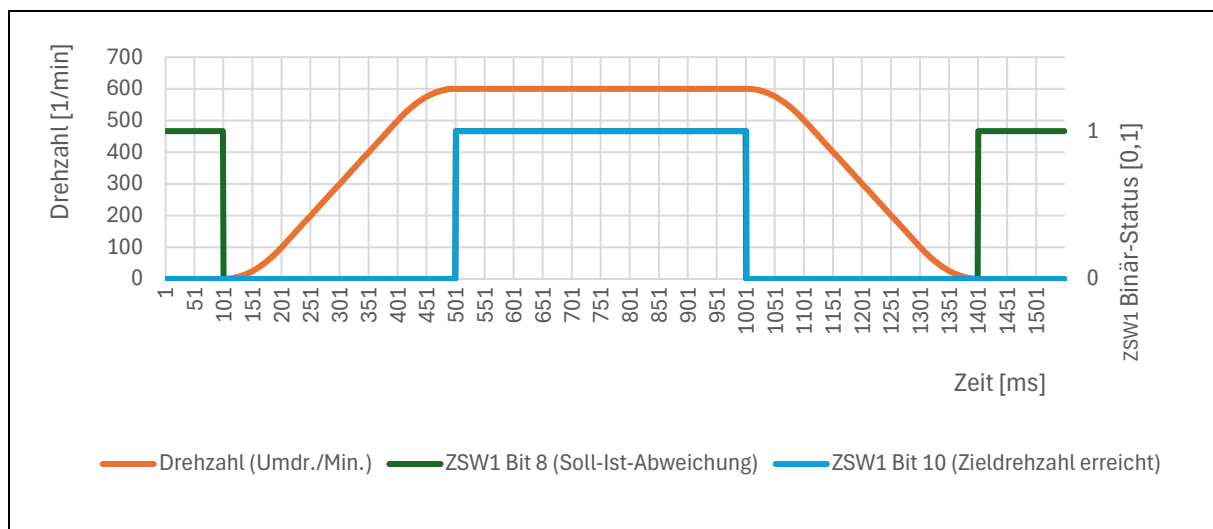


Abb. 6: Dynamisches Fahrprofil inkl. relevanter PROFIdrive-Zustandsbits (ZSW1)

3.5. Online-Training

1. Pädagogische Erläuterung

Das Online-Training fungiert als Transferaufgabe, die alle bisherigen Lerninhalte integriert. Aus pädagogischer Sicht fördert dieses Format das selbstorganisierte Lernen und die Dokumentationsfähigkeit. Die Lernenden müssen den gesamten Prozess der Inbetriebnahme selbstständig strukturieren und fachsprachlich präzise aufbereiten. Die

Ortsunabhängigkeit des Trainings betont zudem die Flexibilität moderner Arbeits- und Lernmethoden im Kontext der Digitalisierung.

2. Einleitung für Schülerinnen und Schüler

Im Online-Training setzen Sie eine vollständige Kette der Inbetriebnahme eigenständig über den Browser in Betrieb. Sie nutzen hierfür das virtuelle Labor, um den digitalen Zwilling ortsunabhängig zu steuern. Dieser Prozess umfasst alle Schritte: von der Vernetzung über die Einrichtung des Technologieobjekts bis hin zur Ansteuerung mittels Funktionsbausteinen. Ziel ist es, den gesamten Ablauf lückenlos zu beherrschen und Ihre methodischen Entscheidungen fachlich fundiert zu begründen.

3. Handlungsauftrag für Schülerinnen und Schüler

- Führen Sie eine vollständige Inbetriebnahme der elektrischen Achse im virtuellen Labor durch.
- Dokumentieren Sie jeden Schritt in fachlich korrekten, ganzen Sätzen und erläutern Sie Ihre Parametrierungen im Engineering-System.
- Sichern Sie Ihre Ergebnisse durch Screenshots oder Exporte der Diagnose- und Signaldaten.
- Erstellen Sie einen abschließenden Bericht, der so strukturiert ist, dass eine dritte Person Ihre Vorgehensweise nachvollziehen und die Ergebnisse am digitalen Zwilling reproduzieren kann.

4. Literatur-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

- [1] Akademie für Lehrerfortbildung und Personalführung, *Digitaler Zwilling/Virtuelle Inbetriebnahme: Einführung – Modul T 3.1*. Dillingen, 2022.
- [2] P. Dr. Schwaiger, *Profilschule für Informatik und Zukunftstechnologien (PIZ): Säulen von PIZ*. [Online]. Verfügbar unter: <https://mebis.bycs.de/kategorien/menedienerziehung/piz-profilschule-fuer-informatik-und-zukunftstechnologien> (Zugriff am: 5. März 2026).
- [3] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung (ISB), *Lehrplanrichtlinien für die Berufsschule: Fachklassen Mechatroniker / Mechatronikerin*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.isb.bayern.de/fileadmin/user_upload/Berufliche_Schulen/Berufsschule/Lehrplan/bs_lpr_mechatroniker.pdf
- [4] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung (ISB), *Lehrplanrichtlinien für die Berufsschule: Fachklassen Elektroniker für Betriebstechnik Elektronikerin für Betriebstechnik*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.isb.bayern.de/fileadmin/user_upload/Berufliche_Schulen/Berufsschule/Lehrplan/bs_lpr_elektroniker_fuer_betriebstechnik.pdf
- [5] M. Braun und W. Horn, *Objektorientiertes Programmieren mit SIMOTION: Grundlagen, Programmbeispiele und Softwarekonzepte nach IEC 61131-3*, 1. Aufl. Erlangen: Publicis Publishing, 2016.
- [6] PLCopen, *PLCopen Motion Control: Part 3 version 2.0*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.plcopen.org/downloads/> (Zugriff am: 4. März 2026).
- [7] PLCopen, *PLCopen Motion Control: Part 1 version 2.0*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.plcopen.org/downloads/> (Zugriff am: 26. Februar 2026).
- [8] PROFIBUS Nutzerorganisation e.V., *PROFIdrive Profil für Antriebstechnik*, 2015.
- [9] VDI Fachbereich Fabrikplanung und -betrieb: *Digitale Fabrik*, 4499, VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, Düsseldorf.

- [10] Akademie für Lehrerfortbildung und Personalführung, *Digitaler Zwilling/Virtuelle Inbetriebnahme: Modul Simit – Modul T 3.1*. Dillingen, 2024.
- [11] Übersicht der Fachgruppen Digitale-Transformation. [Online]. Verfügbar unter: https://alp.dillingen.de/fileadmin/user_upload/Themen/Industrie/Digitale-Transformation_Module-Grafik_05_2024.pdf (Zugriff am: 28. März 2026).

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Lernen am digitalen Zwilling, danach Transfer zur realen Anlage (Bildhintergrund)	1
Abb. 2: Komponenten einer elektrischen Achse	12
Abb. 3: Hauptkomponenten eines elektrischen Antriebs	13
Abb. 4: Gegenüberstellung: Virtuelle Steuerung/Achse vs. reale Steuerung/Achse ...	18
Abb. 5: PROFIdrive General State Diagram [9, S. 98]	27
Abb. 6: Dynamisches Fahrprofil inkl. relevanter PROFIdrive-Zustandsbits (ZSW1)	28
Abb. 7: Digitale-Transformation - Automatisierungstechnik und Fertigungstechnik [12]	32

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Auszug relevanter Systembausteine für Motion Control [vgl. 7, S. 17, vgl. 8, 29,31,45]	11
Tab. 2: Prozessdaten ZSW1 und STW1 [9, 89, 93; eigene Übersetzung]	15

Fachgruppenarbeit und Qualifizierungsmodule an der ALP

Die Akademie für Lehrerfortbildung und Personalführung (ALP) ist die zentrale Einrichtung für die Fort- u. Weiterbildung bayerischer Lehrkräfte. Im Bereich der Digitalen Transformation gliedert sich diese in Fachgruppen des industriellen Umfelds sowie des Umfelds Elektro-Handwerk SHK, Fahrzeugtechnik und Bautechnik (siehe Abb. 7). Die inhaltliche Fachgruppenarbeit erfolgt dabei in Redaktionssitzungen: Hier entwickeln Lehrkräfte – teils unterstützt durch externe Impulsgeber – nach dem Prinzip „von Lehrkräften für Lehrkräfte“ praxisnahe Qualifizierungsmodule, die anschließend in verschiedenen Formaten wie Präsenz- und Onlineveranstaltungen angeboten werden.

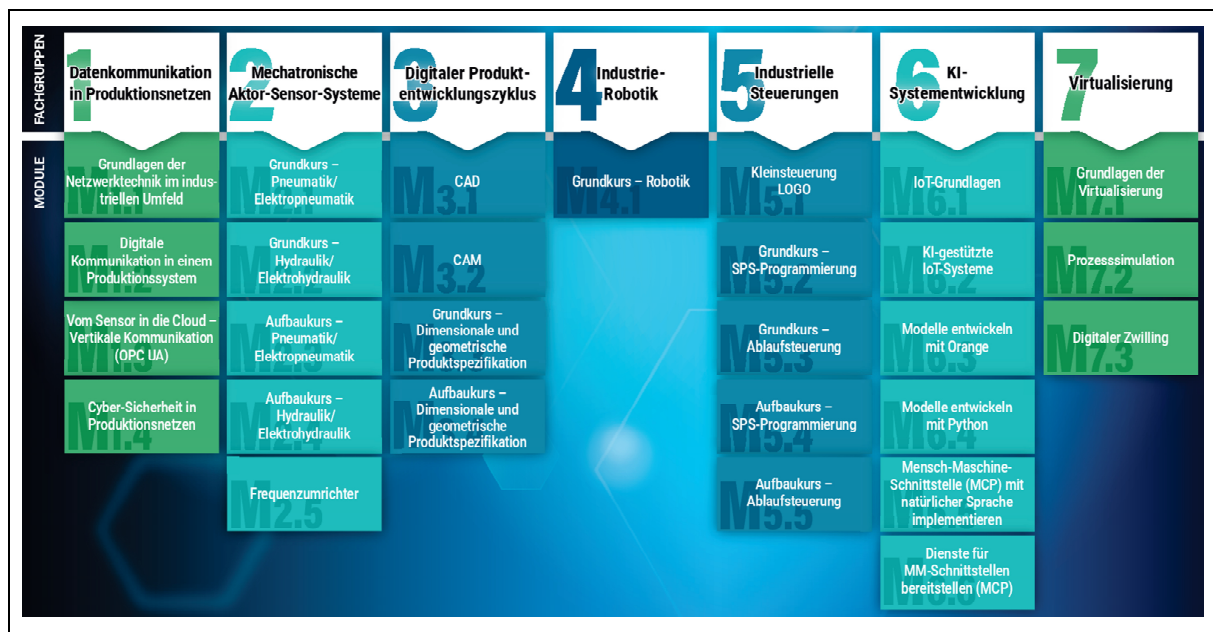


Abb. 7: Digitale-Transformation - Automatisierungstechnik und Fertigungstechnik [11]

Die dieser Handreichung zugeordneten Module befinden sich in der Fachgruppe 7 Virtualisierung. Mehr Informationen befinden sich unter:

M7.1 Grundlagen der Virtualisierung	M7.2 Prozesssimulation
 https://moodle-files.alp.dillingen.de/LFO_BS/DT/Laborhefte/Laborbuch_MT3.1.pdf	 https://moodle-files.alp.dillingen.de/LFO_BS/DT/Laborhefte/Laborbuch_MT3.2.pdf