

Fahrerloses Transport- fahrzeug 1-4

Sicher unterwegs im Parcours



LEITFRAGEN:

- Welche Sensoren und Steuerungsarten eignen sich für ein fahrerloses Transportfahrzeug (FTF) im Parcours? *(Kommunikation)*
- Wie koordiniert man verschiedene Sensorwerte (IR-Sensor, Ultraschallsensor, USB-Kamera) für eine sichere Navigation? *(Kollaboration)*
- Welche Kompromisse sind zwischen Geschwindigkeit, Präzision und Sicherheit sinnvoll? *(kritisches Denken)*
- Wie lässt sich das Verhalten des FTF von einer regelbasierten zu einer KI-gestützten Steuerung weiterentwickeln? *(Kreativität)*

DIE UNTERRICHTSIDEE AUF EINEN BLICK

Klassenstufe: 11–13

Zeitaufwand: 2–3 Doppelstunden pro Lerneinheit (erweiterbar bis zu 13 DS)

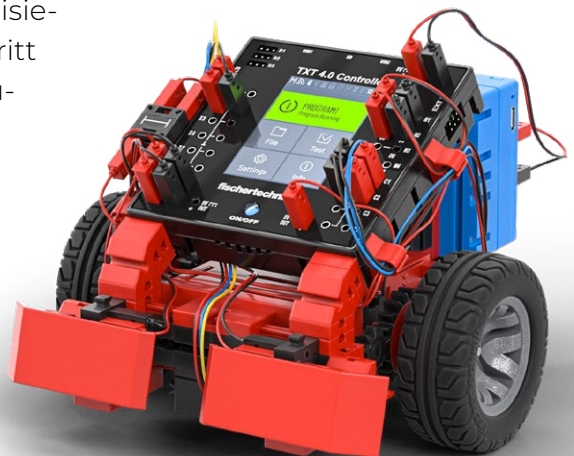
Schwierigkeitsgrad: Modell 

Programmierung  bis 

Modellart: Tischmodelle für fahrerlose Transportfahrzeuge

MODELLBESCHREIBUNG / AUFGABE

Die Schülerinnen und Schüler (SuS) planen und realisieren fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF), die sie Schritt für Schritt mit weiterer Sensorik und intelligenter Steuerung versehen. Ausgehend von einem Grundfahrzeug mit Encodermotoren, das definierte Strecken und Drehungen ausführt sowie erstes Linienfolgen mithilfe eines Spursensors bewältigt, über ein FTF mit Ultraschallsensor zur Kollisionsvermeidung sowie USB-Kamera zur Interaktion mit Farbflächen bis hin zum Regelkreis gesteuerten oder sogar KI-gestützten Linienfolgen entwickeln sich die Modelle fort – und damit auch die Ansprüche an Aufbau, Verdrahtung und Programmierung.



Hinderniserkenner

Die SuS lernen Zustandsübergangsdiagramme für Fahrzustände zu erstellen und Sensordaten gezielt zu lesen und zu verwenden. Aus den Eigenschaften und Messwerten der Sensoren ermitteln sie passende Fahr- und Lenkgruppen, definieren Variablen für Weg- und Winkelsteuerung sowie Reaktionszeiten für sichere Kurskorrekturen.

Aus den so festgelegten Zuständen und Parametern entwickeln die SuS zunächst regelbasierte Steuerprogramme mit Variablen, Unterprogrammen und Zustandslogik; anschließend konfigurieren und trainieren sie ein neuronales Netz für ein Regressionsproblem, das aus Sensoreingängen geeignete Motorgeschwindigkeiten vorhersagt und als Differenzierung um den Abstandssensor erweitert wird. Die Tauglichkeit prüfen die SuS in Fahrversuchen auf dem Parcours – Geradeauslauf, Spurhalten, Ausweichen und Farbflächen-Reaktionen – und verbessern ihre Lösungen durch systematische Fehlersuche und Geschwindigkeitsoptimierung.

○ ALLTAGSBEZUG

Die sensorbasierte Steuerung eines Fahrzeugs ist den SuS aus dem Technik- oder Informatikunterricht und ihrem Alltag vertraut. Bekannte Anwendungen sind Tempomat und Spurhalteassistent im Auto, E-Scooter mit Sensorik sowie Saugroboter, die Linien folgen und Hindernisse meiden.

Die Einbettung in einen realitätsnahen Mobilitätskontext schafft hohe Motivationalität, weil die SuS Parallelen zu Stadtverkehr und Lagerlogistik unmittelbar erkennen.

Eine Integration der Thematik in die vorberufliche Orientierung bietet sich in Fahrzeugtechnik, Elektrotechnik und Robotik/Automatisierung an, wo sensorgetriebene Regelung und das automatisierte Ansteuern von Aktoren zentrale Kompetenzen sind.

Die Verbindung aus Sensorik und KI-gestützter Steuerung begegnet den SuS nicht nur in Industrie und Verkehr, sondern auch im häuslichen Umfeld, z. B. bei Smart-Home-Anwendungen, intelligenten Heizungen oder automatischer Beleuchtung – überall dort, wo Messwerte Entscheidungen auslösen und Bewegungen zuverlässig ausgeführt werden.

○ FÄCHERBEZUG

Informatik:	Fortgeschrittene Programmierung, Bedingungsschleifen, Funktionen, Zustandsautomaten, Ereignissteuerung, Kameraeinbindung, P- und PD-Regler, neuronale Netze, Training eines neuronalen Netzes
Physik:	Bewegung (Weg, Zeit, Geschwindigkeit), Signalverarbeitung, Ultraschall-Laufzeitmessung und Schallausbreitung, Trägheit und Bremsweg, Farberkennung, Regelungstechnik
Technik:	Stabiles Bauen, Konstruktionstechnik
Mathematik:	Berechnung von Termen, Skalierung, Proportionalität und lineare Funktionen, Einheitenumrechnung, Normierung, Regression

UNTERRICHTSVERLAUF

Einführungsphase



Unterrichtsgespräch

- Bekanntgeben des Themas, ggf. Video „Fahrerloses Transportsystem“ zeigen.
→ www.youtube.com/watch?v=cJjz3NxiKh4
- Abfragen, was die wesentlichen Merkmale für die Steuerung von Fahrerlosen Transportfahrzeugen sind.
- Szenarien abfragen, in denen Fahrerlose Transportfahrzeuge vorkommen.
- Einsatzmöglichkeiten diskutieren.
- Anforderungen an den Aufbau der Modelle ermitteln.



ggf. Hilfestellung

- Sensoren, Aktoren und Bauteile aus dem Baukasten zeigen, wenn nötig, Präsentationsmedien einsetzen.

Planungsphase



Unterrichtsgespräch

- Die Vorgehensweise zum Bau des Modells und die zu erzielende Funktion werden gemeinsam erarbeitet.
- Die Arbeitsschritte der App werden vorgegeben bzw. besprochen.



Partner- oder Einzelarbeit

- Die SuS machen sich mit der App vertraut und laden die entsprechende Aufgabe.
- Die SuS definieren sinnvolle Funktionen zur Steuerung eines FTFs mithilfe des TXT 4.0 Controllers.
- Die SuS erstellen mithilfe der App die Sensorliste für den aktuellen Anwendungsfall.
- Die SuS bereiten den Parcours vor. Die Fahrfläche sollte so glatt wie möglich sein.

Hinweis: Die Fahrexperimente sollten wahlweise auf dem Boden oder auf einer Fläche mit Randbegrenzung stattfinden, um ein Herunterfallen der Fahrzeugmodelle zu vermeiden.



Optional:
Partner- oder Gruppenarbeit

- Die SuS diskutieren die einsetzbare Sensorik und skizzieren mögliche Aufbauten.
- Die SuS diskutieren ihre Erfahrungen mit automatisiertem bzw. autonomen Fahren in der Gruppe.

Konstruktionsphase für das Fahrtraining (FTF 1)



Partner- oder Einzelarbeit

- Die SuS nutzen die App zum Bau des Hinderniserkenners. Die App führt kleinschrittig durchs Programm.
- Die SuS prüfen mithilfe des Schnittstellentests die Verkabelung der Sensoren.

Programmierphase für das Fahrtraining (FTF 1)



Partner- oder Einzelarbeit

- Die SuS entwickeln ein Programm für eine einfache Geradeausfahrt sowie für gezielte Drehungen mit dem FTF.
- Die SuS berechnen die dafür notwendigen Encoderimpulse und nehmen individuelle Anpassungen der Umrechnungsfaktoren „*Impulse pro cm*“ und „*Impulse pro Grad*“ an die Gegebenheiten des FTF vor.
- Die SuS erweitern das FTF um eine einfache Hinderniserkennung und erstellen ein einfaches Zustandsübergangsdiagramm zur Analyse der Programmieraufgabe.
- Die SuS entwickeln ein Programm zum einfachen Linienfolgen mithilfe einer digitalen Steuerung.
- Die App führt in aufeinander aufbauenden Stufen mit offenen Fragestellungen durch die Programmieraufgabe.
- Hilfe wird in der App angeboten.
- Das Programm wird nach jedem Differenzierungsschritt auf den TXT 4.0 Controller übertragen.

Experimentier- und Testphase für das Fahrtraining (FTF 1)



Partner- oder Gruppenarbeit

- Der Hinderniserkenner wird in Betrieb genommen.
- Mögliche Störungen im Funktionsablauf müssen gefunden und eliminiert werden.
- Eventuelle Fehlersuche ist anhand von Vorschlägen in der App möglich.
- Eventuelle Optimierungen bei der Hardware und der Programmierung, z. B. Anpassungen der Fahrgeschwindigkeit und Anpassungen des Geschwindigkeitsunterschieds der Motoren bei Drehungen, können vorgenommen werden.

Abschluss-/Anschlussphase für das Fahrtraining (FTF 1)



Optional:
Vorstellung und Zuteilung der Differenzierungen

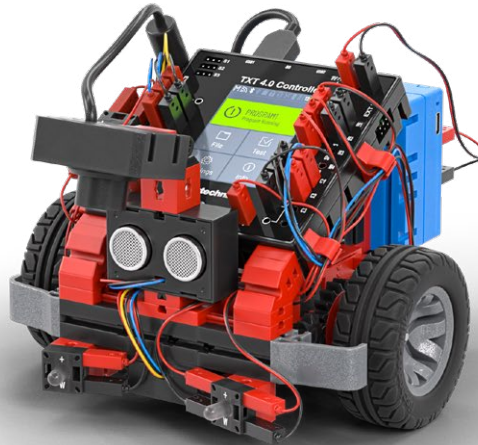
- Für die Differenzierung infrage kommende SuS (oder die gesamte Gruppe) werden ggf. durch die Lehrperson angesprochen. Dabei werden Möglichkeiten für das Umfahren von Hindernissen diskutiert.
- Die Integration der USB-Kamera unter Verwendung unterschiedlicher Farbräume wird vorgestellt.

Konstruktionsphase für den digitalen Spurfolger (FTF 2)



Partner- oder Einzelarbeit

- Die SuS nutzen die App zum Bau des digitalen Spurfolgers. Die App führt kleinschrittig durchs Programm.
- Die SuS prüfen mithilfe des Schnittstellentests die Verkabelung der Sensoren.



Digitaler Spurfolger

Programmierphase für den digitalen Spurfolger (FTF 2)



Partner- oder Einzelarbeit

- Die SuS skizzieren ein Zustandsübergangsdiagramm zur Planung der Programmieraufgabe für das Umfahren von Hindernissen mithilfe des digitalen Spurfolgers.
- Die SuS erweitern das Programm zum Linienfolgen aus FTF 1 um die Erkennung und das Umfahren eines Hindernisses.
- Die SuS planen die Integration der USB-Kamera, sodass das FTF auf Farbflächen rechts oder links der Spur reagieren kann.
- Die SuS konfigurieren die Farberkennung im HSV-Farbraum.
- Die SuS definieren die Aktionen für jede Farbfläche und integrieren sie in das Programm aus FTF 1, sodass das FTF beim Linienfolgen nun auch auf die erkannten Farbflächen reagiert.
- Die App führt in aufeinander aufbauenden Stufen mit offenen Fragestellungen durch die Programmieraufgabe.
- Hilfe wird in der App angeboten.
- Das Programm wird nach jedem Differenzierungsschritt auf den TXT 4.0 Controller übertragen.

Experimentier- und Testphase für den digitalen Spurfolger (FTF 2)



Partner- oder Gruppenarbeit

- Der digitale Spurfolger wird in Betrieb genommen.
- Die SuS testen die Reaktionen des FTF auf die Farbflächen entlang des Parcours.
- Mögliche Störungen im Funktionsablauf müssen gefunden und eliminiert werden.
- Eventuelle Fehlersuche ist anhand von Vorschlägen in der App möglich.

Abschluss-/Anschlussphase für den digitalen Spurfolger (FTF 2)



Optional:

Vorstellung und Zuteilung weiterer Differenzierungen

- Für die Differenzierung infrage kommende SuS (oder die gesamte Gruppe) werden ggf. durch die Lehrperson angesprochen. Dabei wird das Konzept des Regelkreises in der Steuerungstechnik vorgestellt.

Konstruktionsphase für den analogen Spurfolger (FTF 3)



Partner- oder Gruppenarbeit

- Die SuS nutzen die App zum Bau des analogen Spurfolgers. Die App führt kleinschrittig durchs Programm.



Analoger Spurfolger

Programmierphase für den analogen Spurfolger (FTF 3)



Partner- oder Gruppenarbeit

- Die SuS planen die Integration der USB-Kamera, sodass das FTF in diesem Fall über die Linienerkennung mithilfe der Kamera einer Spur folgen kann.
- Die SuS konfigurieren die Linienerkennung mithilfe der Kamera im RGB-Farbraum.
- Die SuS planen und implementieren einen P-Regler.
- Die SuS erweitern die Programmierung zu einem PD-Regler.
- Die App führt in aufeinander aufbauenden Stufen mit offenen Fragestellungen durch die Programmieraufgabe.
- Hilfe wird in der App angeboten.
- Das Programm wird nach jedem Differenzierungsschritt auf den TXT 4.0 Controller übertragen.

Experimentier- und Testphase für den analogen Spurfolger (FTF 3)



Partner- oder Gruppenarbeit

- Der analoge Spurfolger wird in Betrieb genommen.
- Mögliche Störungen im Funktionsablauf müssen gefunden und eliminiert werden.
- Eventuelle Fehlersuche ist anhand von Vorschlägen in der App möglich.
- Die SuS testen verschiedene Einstellungen für den Proportionalitätsfaktor des P-Reglers.
- Die SuS vergleichen das Fahrverhalten des FTFs bei Steuerung mit einem P- bzw. PD-Regler.

Abschlussphase für den analogen Spurfolger (FTF 3)



Optional:
Vorstellung und Zuteilung weiterer Differenzierungen

- Für die Differenzierung infrage kommende SuS (oder die gesamte Gruppe) werden ggf. durch die Lehrperson angesprochen. Dabei sollen die Konzepte der neuronalen Netze und der KI vorgestellt werden.

Konstruktionsphase des KI-Linienfolgers (FTF 4)



Partner- oder Einzelarbeit

- Die SuS nutzen die App zum Bau des digitalen Spurfolgers. Die App führt kleinschrittig durchs Programm.
- Die SuS prüfen mithilfe des Schnittstellentests die Verkabelung der Sensoren.
- Falls der digitale Spurfolger in FTF 2 bereits gebaut wurde, entfällt die Konstruktionsphase.

Programmierphase des KI-Linienfolgers (FTF 4)



Partner- oder Einzelarbeit

- Die SuS machen sich mit dem Aufbau eines einfachen neuronalen Netzes vertraut.
- Die SuS konfigurieren mithilfe der App ein neuronales Netz, das aus den Sensordaten des Spursensors Motordrehzahlen berechnet und geben Trainingsdaten vor.
- Die SuS erweitern ggf. die Programmierung aus FTF 1 so, dass die Drehzahlen der beiden Motoren nun durch das neuronale Netz bestimmt werden.
- Die SuS trainieren das neuronale Netz.
- Die SuS ergänzen das Programm um die Abfrage des Abstandssensors.
- Die SuS erweitern das neuronale Netz um ein Eingangsneuron, das die Sensordaten des Abstandssensors aufnimmt.

Experimentier- und Testphase des KI-Linienfolgers (FTF 4)



Partner- oder Gruppenarbeit

- Die SuS beobachten das Fahrverhalten des FTFs und testen, wie sich Anpassungen der Tabelle mit den Trainingsdaten, unterschiedliche Einstellungen für das Training und unterschiedliche Konfigurationen des neuronalen Netzes auf das Fahrverhalten auswirken.
- Die SuS testen das Bremsverhalten des FTFs.
- Die SuS optimieren das Fahr- und Bremsverhalten des FTFs.

Abschlussphase des KI-Linienfolgers (FTF 4)



Optional:
Vorstellung und Zuteilung weiterer Differenzierungen

- Besonders effizient arbeitenden SuS oder Gruppen kann die Erweiterungsaufgabe gestellt werden, eigene Anwendungsfälle für das Fahrverhalten des FTFs zu entwickeln und die dazu notwendige Sensorik auszuwählen.
- Die SuS können die im Verlauf der Lerneinheiten erworbenen Programmierkenntnisse und Regeltechniken kombinieren, um ein FTF mit möglichst gleichmäßigem Fahrverhalten und vielfältigen Reaktionsmöglichkeiten zu entwickeln.
- Verschiedene Gruppen können gegeneinander antreten: Welches FTF absolviert den Parcours am schnellsten? Welches FTF ist am stabilsten gegenüber Störungen? Hier ist selbstständiges Arbeiten ohne Lernkarten vorgesehen.



Diskussion im Plenum

- Nachbesprechung des Projekts im Klassenverbund
- Klärung von zukünftigen Einsatzmöglichkeiten im Alltag



METHODISCH-DIDAKTISCHE HINWEISE

Differenzierungsmöglichkeiten

Je nach Dauer der Unterrichtsreihe und der Stärke der SuS kann

- die Komplexität der Aufgabe durch Einbeziehung mehrerer Sensoren gesteigert werden.
- eine Erweiterung der Fähigkeiten des FTFs durch komplexere Strategien für das Umfahren von Hindernissen oder die Aufnahme und Reaktion auf farbliche Reize aus der Umgebung erfolgen.
- das Fahrverhalten des FTFs durch Anwendung von P- und PD-Reglern gleichmäßiger gestaltet werden.
- die Motorsteuerung beim Linienfolgen oder Abbremsen durch ein neuronales Netz übernommen werden.

Motivationale Aspekte

Das Arbeiten mit fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) knüpft unmittelbar an Alltagserfahrungen der SuS an. Schon beim **Fahrtraining** erleben sie, wie bereits wenige Programmzeilen ein Fahrzeug zuverlässig in Bewegung setzen – eine direkte Rückmeldung, die eine hohe Motivationalität aufweist und Neugier weckt.

Beim **digitalen Spurfolger** verstärkt sich der Alltagsbezug durch Parallelen zu Saugrobotern, Rasenmärobotern oder Fahrerassistenzsystemen, die Linien erkennen und Hindernisse selbstständig vermeiden. Die Vorstellung, dass das FTF nun wie ein Roboter „sehen“ und reagieren kann, fördert die Identifikation mit der Aufgabe und steigert das Interesse am praktischen Testen.

Der **analoge Spurfolger** eröffnet mit Kamera- und Regelungstechnik spannende Einblicke in moderne Fahrzeugtechnologien wie Spurhalteassistenten. Hier wird deutlich, wie Parameterveränderungen oder die Hinzunahme eines Differentialanteils das Fahrverhalten beeinflussen – ein motivierendes Experimentierfeld.

Mit dem **KI-Linienfolger** schließlich rückt Künstliche Intelligenz in den Mittelpunkt: SuS erleben, wie das Training eines neuronalen Netzes das Fahrverhalten verbessert. Dies schlägt die Brücke zu aktuellen Diskussionen über KI im Alltag und gibt den SuS die Möglichkeit, Zukunftstechnologien selbst verstehen und anwenden zu können.

GRUNDLAGEN REGELUNGSTECHNIK

Ein P-Regler ist die einfachste Form einer **Rückkopplungsregelung**: Er vergleicht fortlaufend einen gewünschten Zielwert (Soll) mit dem aktuellen Messwert (Ist) und wandelt die dabei entstehende Abweichung – den Fehler – direkt in eine Korrektur um, deren Größe **proportional** zum Fehler ist. Je größer der Fehler, desto kräftiger die Gegensteuerung; die „Empfindlichkeit“ des Systems bestimmt der Proportionalfaktor k_P . Ist k_P zu klein, reagiert das System träge und kommt nur langsam auf Kurs; ist er zu groß, reagiert es über, beginnt zu schwingen und wird unruhig. Im Unterrichtskontext des analogen Spurfolgers bedeutet das: Die Kamera misst die seitliche Abweichung von der Spur, der P-Regler passt die linke und rechte Motorgeschwindigkeit gegensinnig an und bringt das Fahrzeug zurück in die Spurmitte. Der P-Regler ist damit die Basis jeder weiteren Verfeinerung (z. B. durch einen D-Anteil) und eignet sich hervorragend, um mit wenig Programmieraufwand das Grundprinzip automatischer, stabilisierender Steuerungen anschaulich zu machen.

Die zentrale Regelgröße beim Spurfolgen ist die seitliche Abweichung der Spurmitte von der Bildmitte der Kamera. Wir bezeichnen diese Abweichung als Fehler e in **Pixeln** (positiv, wenn die Spur rechts der Bildmitte liegt; negativ, wenn sie links liegt). Der Regler bildet aus diesem Fehler eine Stellgröße u , mit der die linke und die rechte Motorgeschwindigkeit gegensinnig angepasst wird. Mit einer Basisgeschwindigkeit v_0 und der Begrenzung auf den zulässigen Bereich $[0, v_{\max}]$ ergibt sich

$$v_{\text{links}} = \text{clip}(v_0 + u, 0, v_{\max}), \quad v_{\text{rechts}} = \text{clip}(v_0 - u, 0, v_{\max}).$$

Dabei begrenzt („sättigt“) die clip-Funktion den Wert der Geschwindigkeit auf den zulässigen Bereich. Liegt die Spur rechts der Mitte, soll das FTF nach rechts abbiegen, um die Spur wiederzufinden. Dazu muss das rechte Rad langsamer und das linke Rad schneller drehen. Liegt die Spur links der Mitte, muss das FTF eine Linkskurve fahren, d.h. das linke Rad muss nun langsamer und das rechte Rad schneller drehen.

Beim **Proportional-Regler (P-Regler)** ist die Stellgröße proportional zum momentanen Fehler

$$u = k_P \cdot e,$$

wobei k_P die Einheit „Geschwindigkeit pro Pixel“ hat.

Beispiel 1: $v_0 = 320$, $v_{\max} = 500$, $k_P = 1,2$, Spur bei $+40$ px, rechts der Bildmitte, also $e = +40$ px. Damit ergibt sich $u = 1,20 \cdot 40 = 48$, $v_{\text{links}} = 368$, $v_{\text{rechts}} = 272$ (keine Sättigung nötig).

Beispiel 2: $v_0 = 320$, $v_{\max} = 500$, $k_P = 1,2$, Spur bei -35 px, links der Bildmitte, also $e = -35$ px. Damit ergibt sich $u = 1,20 \cdot (-35) = -42$, $v_{\text{links}} = 278$, $v_{\text{rechts}} = 362$ (keine Sättigung nötig).

Falls eine Geschwindigkeit die Grenzen $[0, v_{\max}]$ überschreitet, wird sie durch die clip-Funktion begrenzt. Dauerhaftes Clipping sollte man jedoch durch etwas kleinere Werte für k_P oder v_0 vermeiden.

Der **Proportional-Differential-Regler (PD-Regler)** ergänzt den P-Regler um einen vorausschauenden D-Anteil, der die Änderungsgeschwindigkeit des Fehlers berücksichtigt. Mit der Diskretisierung i formuliert, ergibt sich bei einer Abtastzeit Δt von für die Stellgröße $u[i]$

$$u[i] = k_P \cdot e[i] + k_D \frac{e[i] - e[i-1]}{\Delta t}.$$

Hier hat k_D die Einheit „Geschwindigkeit je Pixel pro Sekunde“. Nähert sich das FTF bereits der Spurmitte, wirkt der D-Anteil bremsend und reduziert Überspringen. Wächst der Fehler, d.h. kommt das FTF immer stärker von der Spur ab, verstärkt der D-Anteil die Korrektur und hilft so, schneller zur Spur zurückzukehren.

Beispiel 3 (Spur rechts, Annäherung an die Mitte):

$v_0 = 320$, $v_{\max} = 500$, $k_P = 1,2$, $k_D = 0,03$ (Geschwindigkeit je Pixel pro Sekunde),

$\Delta t = 0,02$ s (Abtastzeit), $e[i] = +45$ px, $e[i-1] = +60$ px.

Für den P-Anteil gilt dann $k_P \cdot e = 1,20 \cdot 45 = 54$.

Die Änderungsrate beträgt $(45-60)/0,02 = -750 \text{ px/s}$. Der D-Anteil liefert also $0,03 \cdot (-750) = -22,5$. Insgesamt ergibt sich $u = 54 - 22,5 = 31,5$. Damit werden die Motorgeschwindigkeiten zu $v_{\text{links}} = 320 + 31,5 = 351,5$, $v_{\text{rechts}} = 320 - 31,5 = 288,5$. Ohne D-Anteil ergäbe ein reiner P-Regler $u = 54$, also $v_{\text{links}} = 374$, $v_{\text{rechts}} = 266$; der PD-Anteil dämpft die Korrektur sichtbar, weil sich das Fahrzeug der Spurmitte bereits nähert.

Beispiel 4 (Spur links, Fehler wächst):

$v_0 = 320$, $v_{\text{max}} = 500$, $k_P = 1,2$, $k_D = 0,03$ (Geschwindigkeit je Pixel pro Sekunde),

$\Delta t = 0,02 \text{ s}$ (Abtastrate), $e[i] = -45 \text{ px}$, $e[i-1] = -20 \text{ px}$.

Für den P-Anteil gilt dann $k_P \cdot e = 1,20 \cdot (-45) = -54$.

Die Änderungsrate beträgt $(-45-(-20))/0,02 = -1250 \text{ px/s}$. Der D-Anteil liefert also $0,03 \cdot (-1250) = -37,5$. Insgesamt ergibt sich $u = -54 - 37,5 = -91,5$. Damit werden die Motorgeschwindigkeiten zu $v_{\text{links}} = 320 - 91,5 = 228,5$, $v_{\text{rechts}} = 320 - (-91,5) = 411,5$; der PD-Anteil verstärkt die Korrektur deutlich, weil sich das Fahrzeug weiter von der Spurmitte entfernt.

Wenn das Programm für unterschiedliche Bildbreiten W funktionieren soll, wäre es sinnvoll, mit einem normierten Fehler zu arbeiten, d. h. $e_n = x/W \in [-1, 1]$.

PROGRAMMIERKENNTNISSE

- Programmstart
- Dauerschleife **wiederhole dauerhaft (repeat forever)**
- Kamerakonfiguration
- Schleife **wiederhole solange (repeat while)**
- Befehl **warte bis (wait until)**
- Bedingung **falls – mache (if – do)**
- Nutzen von Variablen und deren Veränderung
- Rechnen mit Variablen
- Arbeit mit Unterprogrammen
- Programmierung Neuronaler Netze
- Eingabe von KI-Trainingsdaten

Zum Download optional:

- Stromlaufplan
- Bauanleitung

ZUSATZMATERIALIEN

- Falls vorhanden, könnte für die Einführungsphase in das Thema ein Video genutzt werden.
- Zeichenmedien (Papier, Whiteboard oder Projektionsfläche).

—○ FUNKTIONEN DES MODELLS UND DEREN TECHNISCHE LÖSUNGEN

Funktion der Sensoren/Aktoren	Technische Lösung
Drehung der Encodermotoren	Geschwindigkeitsanpassung zur Fahrzeugsteuerung
Mini-Taster	Erkennen von Hindernissen (FTF 1)
Messung von Helligkeitsunterschieden	Erkennen der Fahrspur (FTF 1–2, FTF 4)
Messung von Abständen	Kollisionsvermeidung (FTF 2, FTF 4)
FTF 2: Farberkennung durch USB-Kamera	Reaktion auf Farbflächen
FTF 3: Spurerkennung durch USB-Kamera	Spurhalten mithilfe eines P-Reglers und eines PD-Reglers
FTF 4: Spurerkennung durch Spursensor	• Aufbau eines neuronalen Netzes • Eingabe von Trainingsdaten • Umsetzung eines Regressionsproblems mithilfe von KI
Weitere Differenzierungsmöglichkeiten	Optimierung der Geschwindigkeitssteuerung, Optimierung der Strategien für das Umfahren von Hindernissen, Optimierung der Strategie für das Wiederfinden der Spur bei komplettem Spurverlust, Konzeption eines eigenen Fahrzeugs mit selbst gewählter Sensorausstattung



MATERIALLISTE

Sensoren	Funktion
1 On/Off-Taster am TXT 4.0 Controller	Einschalten des FTF
2 Mini-Taster	Hinderniserkennung (FTF 1)
1 Spursensor (mit 2 IR-Sensoren)	Spurerkennung (FTF 1–2, FTF 4)
1 Ultraschallsensor	Abstandsmessung (FTF 2, FTF 4)
1 USB-Kamera	Farberkennung (FTF 2) Spurerkennung (FTF 3)
Aktoren	Funktion
2 Encodermotoren	Antrieb der Fahrzeuge
2 LEDs (2 × weiß)	Scheinwerfer (FTF 2–4)