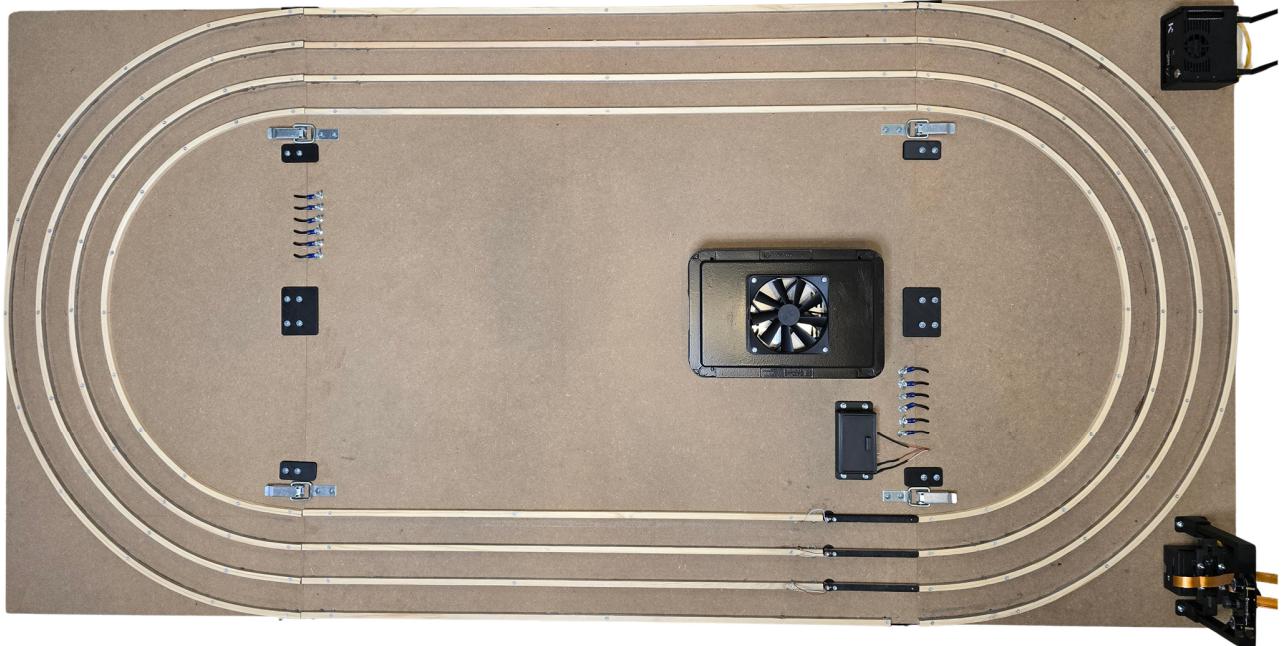




AI-Driven Traffic. Smarter Roads. Smoother Flow.

Teamname: Synapse Mobility

Projektname: LanePilot



Inhaltsverzeichnis

Teampräsentation	3
Darstellung der Projektidee	4
a) Von der ersten Idee zur finalen Vision.....	4
b) LanePilot – Intelligenter Verkehr durch KI	4
c) Unsere Lösung – innovativ und praxisnah	5
Präsentation einer Roboterlösung	7
a) Mechanik.....	7
b) Elektrik.....	12
c) Programmierung	14
Soziale Auswirkungen & Innovation	17
a) Direkte Auswirkungen auf Menschen in unserer Umgebung.....	17
b) Potenzielle Auswirkungen auf die globale Bevölkerung	17
c) Gesellschaftlicher Nutzen durch Technologieakzeptanz.....	18
d) Mögliche Risiken und ethische Fragen.....	18
e) Innovationsgrad und gesellschaftlicher Fortschritt.....	19
f) Ausblick: Ein Schritt Richtung Zukunft	19
Für weitere Details (Programmcode, Bilder, Making of):	19
Innovations- und Unternehmensaspekte.....	20
Quellenverzeichnis.....	21

Teampräsentation

Wir sind das Team **Synapse Mobility** und bestehen aus 2 Mitgliedern im Alter von 16 und 17 Jahren.

Wir besuchen die Klasse 11 der Waldschule Degerloch und interessieren uns besonders für Technik, Robotik und Künstliche Intelligenz. Darüber hinaus teilen wir uns auch eine gemeinsame Leidenschaft: deutsche Automobiltechnik. Egal ob Sportwagen, Klassiker oder moderne Elektromobilität – wir sind große Fans deutscher Automarken und ihrer Ingenieurskunst.

Diese Begeisterung hat uns auch bei der Entwicklung von LanePilot inspiriert. Denn wie in der Automobilbranche ging es uns um die Vereinigung von Präzision, Innovation und Zuverlässigkeit im Verkehrssystem.

- Kaan Gönüldinc (Konstruktion, Modellbau, Programmierung, Dokumentation)
- Ferdinand Helber (Konstruktion, Modellbau, Recherche, Dokumentation)
- Emil Jurich, Coach (Betreuung des Projektes)



(von links: Ferdinand Helber, Kaan Gönüldinc, Emil Jurich)

Darstellung der Projektidee

a) Von der ersten Idee zur finalen Vision

Zu Beginn unserer Projektarbeit beschäftigten wir uns mit verschiedenen Szenarien, in denen Robotiklösungen einen echten gesellschaftlichen Mehrwert bieten könnten. Eine der ersten Ideen, die in unserem Team aufkam, war die Entwicklung eines Hilfs-, Notfall- oder Bergungsroboters. Die Grundüberlegung war, Menschen in gefährlichen Situationen durch autonome oder ferngesteuerte Roboter zu unterstützen – sei es beim Zugang zu schwer erreichbaren Gebieten, der Ortung von Vermissten oder der Versorgung in Katastrophenzonen.

Im Rahmen einer umfangreichen Internetrecherche stellten wir jedoch fest, dass in diesem Bereich bereits zahlreiche Systeme existieren – sowohl im zivilen als auch im militärischen Kontext. Ob als Raupenfahrzeug zur Trümmerdurchsuchung, als Drohne mit Wärmebildkamera oder mit multifunktionalem Roboterarm: Die Vielfalt der vorhandenen Ansätze war groß. Insbesondere bei Naturkatastrophen, wie Erdbeben oder Überschwemmungen, aber auch in Krisengebieten oder für taktische Rettungseinsätze kommen solche Roboter bereits heute zum Einsatz.

Wir bewerteten die Idee daher kritisch: Zum einen war der Neuigkeitswert unserer Vision im Vergleich zu existierenden Lösungen gering. Zum anderen hätten wir in der Umsetzungsphase wohl auf fertige oder nachgebaute Systeme zurückgreifen müssen – was nicht unserem Anspruch entsprach, etwas Eigenständiges, Innovatives und durchgängig selbstentwickeltes zu realisieren.

Diese Erkenntnis war ein entscheidender Wendepunkt. Statt eine bereits etablierte Anwendung zu reproduzieren, entschieden wir uns dafür, ein gesellschaftlich hochrelevantes, aber bisher nur unzureichend gelöstes Problem mit einem eigenen Modell ganz neu zu denken – so entstand LanePilot.

b) LanePilot – Intelligenter Verkehr durch KI

Unser Projekt „LanePilot“ beschäftigt sich mit einem der drängendsten Probleme urbaner Mobilität: Staus, ungleichmäßige Spurenauslastung und ineffizienter Verkehrsfluss. Täglich verlieren Menschen weltweit wertvolle Zeit im Verkehr, verursachen durch unnötiges Stop-and-Go hohe CO₂-Emissionen und setzen sich einem erhöhten Unfallrisiko aus. Eine Vielzahl dieser Probleme resultiert nicht aus mangelnder Infrastruktur, sondern aus ineffizienter Nutzung vorhandener Spuren.

Oft werden Verkehrssysteme nur reaktiv angepasst (z. B. durch Baustellenumleitungen oder Ampelphasen), anstatt proaktiv intelligentes Verhalten der Verkehrsteilnehmer zu fördern.

Derzeitige Lösungen wie Navigations-Apps oder statische Anzeigetafeln greifen nur begrenzt ein. Sie empfehlen lediglich alternative Routen oder melden Staus – sie verändern aber nicht aktiv die Nutzung von Spuren in Echtzeit. Auch adaptive Ampelsysteme oder Baustellenanzeigen sind meist zentral programmiert und kaum individuell steuerbar.

Unsere Lösung setzt genau dort an. Mit Hilfe moderner KI-Technologien analysiert LanePilot in Echtzeit die Verkehrssituation und berechnet intelligente Spurzuweisungen für einzelne Fahrzeuge. Dies geschieht auf Basis von Bildern, die durch ein neuronales Netz (YOLOv11-Segmentierung) ausgewertet werden, sowie durch eine graphbasierte Entscheidungslogik (Graph Attention Network, GAT), die optimale Spurverteilungen berechnet. Unser Modell stellt somit das Herzstück eines Systems dar, das Fahrzeuge nicht nur erkennt, sondern ihre optimale Positionierung im Verkehrsfluss bestimmen kann.

Die Bedeutung dieses Projekts reicht weit über den klassischen Straßenverkehr hinaus. In Zeiten urbaner Verdichtung, wachsender Umweltbelastung und steigendem Automatisierungsgrad im Fahrzeugsektor (Stichwort: Autonomes Fahren), liefert LanePilot einen praktischen und skalierbaren Ansatz für Smart Cities, Behörden und Mobilitätsdienste. Das System reduziert Staus, verbessert die Luftqualität und erhöht die Sicherheit für alle Verkehrsteilnehmer.

c) Unsere Lösung – innovativ und praxisnah

Wir haben ein Modell entwickelt, das verschiedene Technologien miteinander kombiniert: eine Kameraeinheit zur Bilderfassung, ein YOLOv11-Modell zur Objekterkennung und ein Graph Attention Network zur Entscheidung, welche Spur für welches Fahrzeug optimal ist.

Statt auf vordefinierte Regeln oder starre Logik zu setzen, lernt unser System durch Trainingsdaten, welche Spur unter gegebenen Bedingungen (Verkehrsdichte, Abstand, Geschwindigkeit) optimal ist. Dadurch reagiert es flexibel auf verschiedene Verkehrssituationen und kann sich kontinuierlich verbessern.

Zusätzlich haben wir uns Gedanken zur Kommunikation mit den Fahrern gemacht. Die Spurzuweisungen können entweder über smarte Anzeigetafeln oder direkt per V2I-Kommunikation an Fahrzeuge übermittelt werden. Damit ist LanePilot sowohl für heutige als auch für künftige Fahrzeugtechnologien geeignet.

Die V2X (Vehicle-to-Everything)- bzw. V2I (Vehicle-to-Infrastructure)-Kommunikation wird bereits in mehreren deutschen Städten erfolgreich erprobt und umgesetzt. So wurden beispielsweise in Hamburg über 140 Ampelanlagen mit intelligenter Kommunikationstechnologie ausgestattet, um Fahrzeugen Informationen zu Ampelphasen und Verkehrsfluss bereitzustellen. Auch im saarländischen Merzig wurde eine Plattform geschaffen, auf der Anwendungen wie Ampelassistenten oder Baustellenwarnungen getestet werden. Diese Projekte zeigen, dass die nötige Infrastruktur für vernetzte Mobilität zunehmend Realität wird. Unser System LanePilot lässt sich nahtlos in solche V2I-Umgebungen integrieren und kann durch den bidirektionalen Datenaustausch mit der Infrastruktur nicht nur die Sicherheit, sondern auch die Effizienz im Straßenverkehr signifikant steigern.

Unsere Lösung ist nicht nur für Großstädte relevant. Sie kann auch auf Autobahnen, in Industrieparks oder bei Events mit hohem Verkehrsaufkommen eingesetzt werden. Überall dort, wo sich viele Fahrzeuge bewegen und ein effizienter Verkehrsfluss entscheidend ist, kann LanePilot einen echten Unterschied machen.

Präsentation einer Roboterlösung

a) Mechanik

Ziel unserer Konstruktion war es, eine anschauliche, aber handhabbare Simulationsumgebung für die Demonstration des LanePilot-Konzepts zu erschaffen. In einem Maßstab, der für den Wettbewerb sowie für Präsentationen praktikabel ist, haben wir eine eigene Modellanlage entworfen und umgesetzt, die einen mehrspurigen Straßenabschnitt mit kontinuierlichem Fahrzeugfluss und Spurwechsel-Funktionalität simuliert.

Das Ergebnis ist eine ovale, dreispurige Bahn mit integrierter Spurführung über Leitplanken, elektrischer Versorgung, fahrzeugähnlichen Modulen und intelligenter Steuerungseinheit. Dieses Modell erlaubt es, wesentliche Aspekte unserer KI-basierten Spurverteilung erlebbar und visuell nachvollziehbar darzustellen.

Zu Beginn wären die fahrzeugähnlichen Module bewusst ungünstig auf die Fahrbahnspuren verteilt worden – mit einer hohen Dichte auf der linken Spur, wenigen Fahrzeugen auf der mittleren und nahezu keiner Auslastung auf der rechten Spur. Das System hätte diese unausgeglichene Fahrbahnauslastung automatisch erkannt und darauf reagiert, indem es über mehrere Runden hinweg gezielt Weichenstellungen vorgenommen hätte. So wären die Fahrzeuge nach und nach gleichmäßig auf alle drei Spuren verteilt worden. Auf diese Weise hätte sich am Modell unmittelbar demonstrieren lassen, wie das LanePilot-System aktiv in die Spurverteilung eingreift und so zur Effizienzsteigerung des Verkehrs beitragen würde.

Die gesamte Modellfläche wurde auf eine maximal zulässige Grundfläche von 2x2 Metern beschränkt. Diese Fläche war von Beginn an die bauliche Begrenzung unseres Entwurfs, da sie den Wettbewerbsvorgaben und den Transportbedingungen gerecht werden musste. Die Bahn ist als durchgehendes Oval mit drei parallelen Fahrspuren konzipiert, um eine Rundstrecke und somit einen kontinuierlichen Verkehrsstrom zu simulieren.

Der Boden selbst wurde aus einer stabilen 12mm dicken Holzplatte gefertigt, dass hinsichtlich Biegefesteitigkeit und Bearbeitbarkeit ideal für unsere Anforderungen war. Die drei Spuren verlaufen gleichmäßig nebeneinander und sind durch fest montierte Leitplanken voneinander getrennt. Diese Leitplanken erfüllen nicht nur die optische Funktion der Spurbegrenzung, sondern tragen jeweils auch eine elektrisch leitende Bahn, über die die Fahrzeuge mit Strom versorgt werden.

Für die Fahrzeuge hatten wir ursprünglich fertige, batteriebetriebene Modellautos gesucht und schnell gemerkt, dass die Auswahl sehr stark eingeschränkt war. Darüber hinaus

wollten wir aus Umweltgründen keine 30 batteriebetriebene Modellautos in unser Projekt einbinden. Die Fahrzeuge in unserem Modell sind Motor-Getriebe-Einheiten, die um Komponenten, wie Räder und Stromabnehmer erweitert wurden. Ziel war eine minimalistische Auslegung der Fahrzeuge, dass sich nur auf die wesentlichen Funktionen beschränkt. Jede dieser Einheiten wird über Schleifkontakte von den Leiterbahnen mit Strom versorgt. Diese Bauweise erinnert stark an klassische Systeme wie Carrerabahnen oder Modelleisenbahnen – wurde aber technisch weiterentwickelt, um variable Geschwindigkeiten und Spurwechsel zu simulieren.

Zur Variation der Fahrzeuggeschwindigkeiten haben wir bei einigen Einheiten in der Stromversorgung gezielt Widerstände vorgeschaltet. Dadurch bewegen sich manche Fahrzeuge deutlich langsamer als andere. Dieses Prinzip der Geschwindigkeitsmodulation erlaubt es uns, im Modell typische Verkehrssituationen wie „Langsamfahrer auf der Überholspur“ zu simulieren – eine entscheidende Grundlage für die Logik unserer Spurwechseltechnologie.

Am Ende des geraden Streckenabschnitts wurde eine stabile Brückenkonstruktion installiert, auf der eine hochauflösende Kamera montiert ist. Diese Kamera erfasst die ankommenden Fahrzeuge auf allen drei Spuren gleichzeitig und analysiert deren Geschwindigkeit und Position. Auf Basis dieser Live-Daten werden in der Realität entsprechende Spurwechsel-Empfehlungen durch Anzeigetafeln oder V2I-Kommunikation übermittelt. In unserem Modell übernimmt diese Aufgabe eine Weichensteuerung am Ende des geraden Abschnitts.

Langsam fahrende Fahrzeuge auf der linken (schnellen) Spur werden automatisch auf die mittlere Spur umgeleitet, und langsam fahrende Fahrzeuge auf der mittleren Spur werden auf die rechte Spur verschoben. Dieses Spurwechselprinzip verdeutlicht, wie LanePilot unnötige Blockaden in schnelleren Spuren verhindern kann.

Die innere Spur des Ovals wurde bewusst als „schnelle Spur“ festgelegt, da sich bei umgekehrter Anordnung ein ungewollter Effekt ergeben könnte: Langsam fahrende Fahrzeuge auf der kurveninneren Spur hätten aufgrund des kürzeren Weges die schnelleren Fahrzeuge auf den äußeren Spuren potenziell überholt können. Dies hätte zu unrealistischen Abläufen im Modell geführt, die dem tatsächlichen Verkehrsverhalten widersprechen.

Um das Modell praktikabel transportieren zu können, wurde es modular aufgebaut. Es besteht aus drei Hauptteilen – einem Mittelteil mit geraden Strecken, sowie den beiden Endteilen mit gekrümmten Bahnen. Diese drei Segmente lassen sich mechanisch sauber

zusammenfügen und bei Bedarf wieder auseinanderbauen. Die größte Herausforderung bestand darin, die Spuren an den Übergängen der Module exakt bündig zu konstruieren, sodass Fahrzeuge nicht an Stoßkanten hängen bleiben. Die exakte Flucht war entscheidend für einen reibungslosen Betrieb des Systems.

Eine schnelle und kostengünstige Möglichkeit zur Herstellung der Leitplanken bestand darin, handelsübliche Holzleisten zu verwenden, die in verschiedenen Ausführungen im Baumarkt erhältlich waren. Für eine stabile Befestigung auf der Holzplatte war jedoch eine gewisse Dicke erforderlich. Während dies bei den geraden Streckenabschnitten problemlos umsetzbar war, stellten die gekrümmten Abschnitte eine besondere Herausforderung dar: Die dicken Leisten ließen sich nur schwer biegen und an die gewünschte Form anpassen.

Um dennoch eine saubere Kurvenführung zu erreichen, verwendeten wir für die gebogenen Abschnitte zwei schmalere Leisten, die sich leichter verformen ließen. Nach dem Biegen wurden diese miteinander verklebt, um die notwendige Breite für eine stabile Verschraubung mit der Holzplatte zu erreichen. Die Herstellung dieser gebogenen Elemente war allerdings sehr aufwändig: Während des Verleimens mussten die Leisten exakt im gewünschten Radius fixiert werden. Zu diesem Zweck fertigten wir eine spezielle Schablone an, die die Leisten während des Trocknungsprozesses in der finalen Geometrie hielt. Im Rückblick (Lessons Learned) hätten wir die Leitplanken für die gebogenen Abschnitte in Segmente unterteilt und mittels 3D-Druck gefertigt. Damit hätten wir den Aufwand erheblich reduziert und gleichzeitig die Formgenauigkeit verbessert.

Danach wurden auf die Holzleisten Leiterbahnen aufgebracht, um die Fahrzeuge mit Strom zu versorgen. Jede Spur hat dadurch ihre eigene Stromversorgung, die durch ein gemeinsames Netzteil geregelt wird. Die Fahrstromkreise sind bewusst getrennt, um unterschiedliche Fahrzeuggeschwindigkeiten und gezielte Steuerung einzelner Fahrbahnen zu ermöglichen.

Die Brückenkonstruktion am Ende des mittleren geraden Streckenabschnitts wurde demontierbar ausgeführt, um den Transport zu erleichtern. Sie musste ausreichend hoch sein, um den gesamten geraden Streckenabschnitt zu erfassen.

Auf der Brücke ist eine hochauflösende Kamera montiert, die mit einem Mini-Rechner verbunden ist. Dieser Rechner übernimmt die Bildauswertung mittels eines trainierten YOLOv11-Segmentierungsmodells. Die Kamera ist in der Lage, alle drei Spuren gleichzeitig zu erfassen, Fahrzeuge zu erkennen, deren Position und Geschwindigkeit zu bestimmen und diese Informationen an das Steuerungssystem weiterzugeben.

Im Sichtbereich der Kamera befinden sich die elektromechanischen Weichen, die die Fahrzeuge auf andere Spuren umlenken können. Diese Weichen sind kurze, schwenkbare Leitplanken, die über Servomotoren angetrieben werden.

Die ersten Testfahrten auf der fertig montierten Modellanlage verliefen ernüchternd. Trotz präziser Planung und sorgfältigem Zusammenbau war schnell klar: Theorie und Praxis lagen noch weit auseinander. Immer wieder blieben Fahrzeuge stehen oder entgleisten in den Kurvenbereichen. Besonders kritisch war dabei die kontinuierliche Stromversorgung. Viele Einheiten verloren in bestimmten Abschnitten kurzzeitig den Kontakt zu den Leiterbahnen.

Obwohl die Leitplanken im Kurvenbereich denselben Abstand aufwiesen wie auf den geraden Abschnitten, kam es dort regelmäßig zu physischem Klemmen. Die Ursache dafür war subtil, aber gravierend: Die Fahrzeuge waren auf eine gerade Ausrichtung ausgelegt. In den Kurven führte dies dazu, dass die Diagonale des Fahrzeugs mehr Platz beanspruchte. Das Resultat waren Blockaden und wiederholte Entgleisungen.

Ein weiteres Problem war der Grip: Die glatte Holzoberfläche bot zu wenig Haftung, so dass die Räder durchdrehten und sich die Fahrzeuge gar fortbewegten. Die gesamte Funktionalität des Systems basierte auf der Simulation fahrender Fahrzeuge auf drei Spuren mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Ohne dieses Kernelement wäre eine Darstellung der späteren Systemfunktionen nicht möglich gewesen.

Wir überarbeiteten die Geometrie der Räder und verabschiedeten uns von der anfänglichen, kostengünstigen Lösung mit großformatigen Unterlegscheiben und entschieden uns stattdessen für breitere, 3D-gedruckte Räder. Diese wurden hohl konstruiert. Zur Erhöhung der Traktion wurde der Hohlraum mit Unterlegscheiben aus Metall gefüllt, um das Gewicht auf der Antriebsachse zu erhöhen.

Trotz dieser Maßnahme reichte der Grip zunächst nicht aus. Daher wurde die Lauffläche der Räder zusätzlich mit Schleifpapier beklebt, um die Reibung zu erhöhen und die Traktion zu verbessern.

Um in den Kurvenbahnen mehr Platz zu bekommen, wurden die Räder nachträglich in ihrer Breite reduziert und die Kanten verrundet. So konnten sie besser an den Leitplanken entlanggleiten, ohne zu verkanten oder aus der Spur zu geraten. Kaum ein Bauteil wurde im Projektverlauf so häufig überarbeitet wie die Räder.

Für den Spurwechsel wurden zu Projektbeginn verschiedene Ansätze intensiv diskutiert. Zu den Überlegungen zählten unter anderem der Einsatz von Förderbändern mit variabler

Laufrichtung, wie sie beispielsweise in der Logistikbranche bei Paketdienstleistern Verwendung finden. Oder Linearschieber, die Fahrzeuge mechanisch auf eine andere Spur verschieben, sowie Luftströme, wie sie aus Sortieranlagen zur Mülltrennung bekannt sind.

Letztlich entschieden wir uns für ein Weichenkonzept, dass eine gezielte Umlenkung der Fahrzeuge ermöglicht. Im Vergleich zu einem gezielten Luftstrom oder einem mechanischen Stoß über einen „Stößel“ erschien uns diese Lösung eleganter, präziser und besser kontrollierbar.

Allerdings wurde dabei übersehen, dass die gestellten Weichen die Fahrbahnbreite reduzieren. Fahrzeuge, die auf der betroffenen Spur unterwegs waren, konnten die Engstellen nicht mehr passieren, was zu Blockaden führte.

Da im weiteren Projektverlauf keine Zeit mehr für eine Umstellung des Mechanismus zur Verfügung stand, wurde eine alternative Lösung implementiert: Ein Display, das analog zu realen Verkehrsanzeigetafeln genutzt wird. Über diese visuelle Schnittstelle konnten für alle drei Spuren situationsabhängige Anweisungen dargestellt werden. So ließ sich die Funktionsweise des Algorithmus dennoch demonstrieren – insbesondere das Zusammenspiel von Kameraerfassung, Bildauswertung und anschließender Befehlsausgabe an das System.

Für den Spurwechselmechanismus haben wir dennoch eine alternative und funktionsfähige Lösung entwickelt. Wir konzipierten eine Schiebeplatte, die in die Bodenstruktur integriert wird und Teile der Leitplanke, inkl. Leiterbahnen beinhaltet. Diese ermöglicht es, Fahrzeuge parallel zur Fahrbahn seitlich auf eine benachbarte Spur zu verschieben, ohne dabei die Fahrbahnbreite einzuschränken, wie es bei den Weichen der Fall ist.

Für diese Bauweise würden wir eine zusätzliche, vierte Spur vorsehen, die ausschließlich während des Verschiebevorgangs genutzt wird. Dies bietet den Vorteil, dass die Schiebeplatte nach dem Spurwechsel nicht unmittelbar wieder auf seine ursprüngliche Position zurückkehren muss, sondern auf der verschobenen Position verbleiben kann, bis eine geeignete Verkehrssituation eine Rückführung erlaubt. Auf diese Weise könnte sich die Verstellzeit des Mechanismus im Idealfall halbieren.

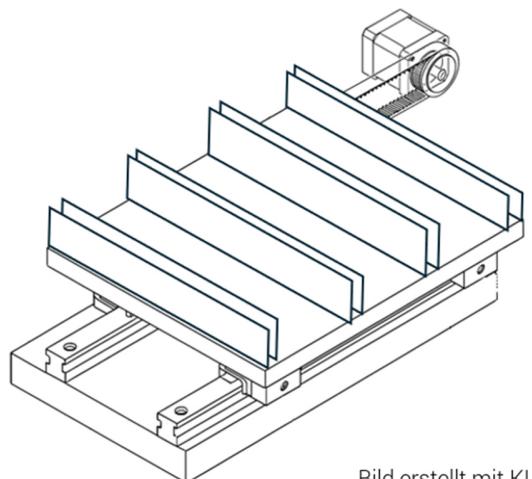


Bild erstellt mit KI

Dabei ist die Schiebeplatte auf zwei Linearschienen vom Typ MGN12 montiert, die mithilfe kugelgelagerter Wagen eine spielfreie und leichtgängige Querbewegung ermöglichen. Angetrieben wird das System über einen GT2-Zahnriemen, der fest mit der Schiebeplatte verbunden ist und entlang der Bewegungslinie gespannt verläuft. Dieser Zahnriemen wird von einem NEMA 23 Schrittmotor des Typs ACT 23HS6430 bewegt, der mit einem hohen Haltemoment von 110 Ncm für schnelle und kraftvolle Positionsänderungen sorgt. Die Zahnriemenscheibe auf der Motorwelle greift exakt in den Riemen ein, sodass die Bewegung ruckfrei und wiederholgenau erfolgt. Die Position der Schiebeplatte wird durch Endschalter oder Hall-Sensoren überwacht, sodass beim Start eine automatische Referenzfahrt möglich ist und Überfahrten verhindert werden. Die Steuerung der Bewegung erfolgt über einen Mikrocontroller wie Arduino oder Raspberry Pi, der abhängig von externen Informationen – zum Beispiel durch eine Kamera – entscheidet, wann ein Spurwechsel erfolgen soll. Sobald ein Fahrzeug im Zielbereich erkannt wird und die benachbarte Spur frei ist, aktiviert die Steuerung den Motor, der die Platte seitlich verschiebt und das Fahrzeug dabei physisch auf die neue Spur mitnimmt.

b) Elektrik

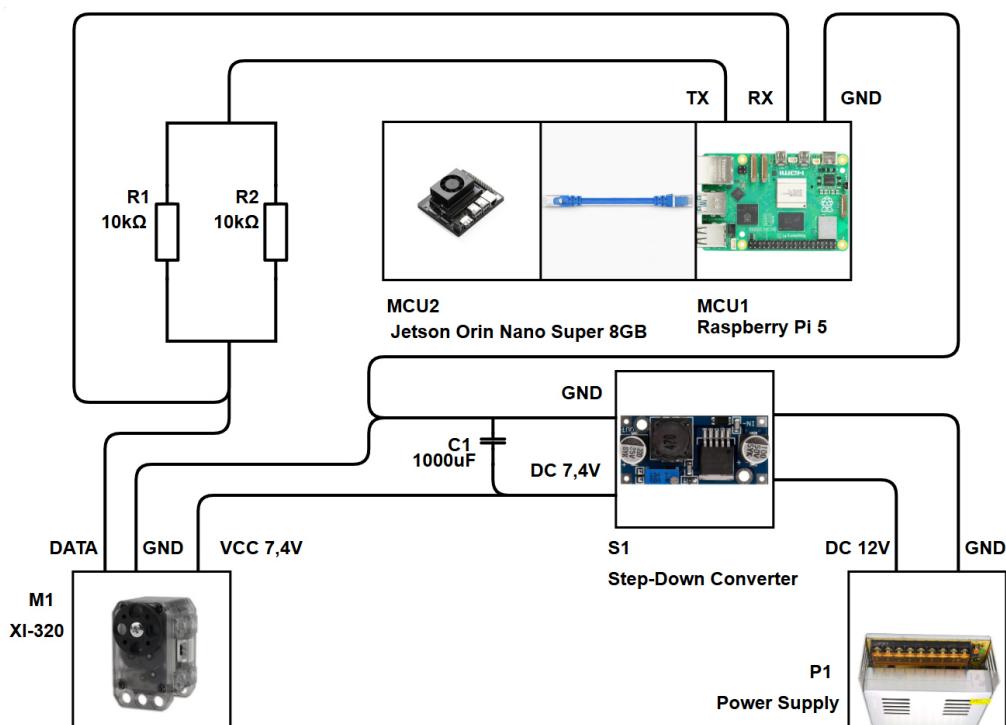
Die zentrale Steuerungseinheit des Systems bildet ein Raspberry Pi 5, der als Kommunikationshub fungiert und alle wesentlichen Komponenten miteinander verbindet. An den Raspberry Pi ist unter anderem eine IR-fähige Full-HD-Kamera angeschlossen, deren Videodaten in Echtzeit über eine Ethernet-Verbindung an den Jetson Orin Nano Super 8GB (KI-Recheneinheit) gestreamt werden. Neben der Bilderfassung übernimmt der Raspberry Pi auch die Ansteuerung der Servomotoren in Abhängigkeit von den ermittelten Kommandos.

Zusätzlich ist der Raspberry Pi für die Visualisierung der vom Jetson generierten Handlungsempfehlungen zuständig. Diese werden als einfache grafische Anweisungen (z. B. Richtungspfeile) in statische Bilddateien konvertiert und über einen integrierten Access Point (AP) – den der Raspberry Pi selbst bereitstellt – an einen Livestream-Server übermittelt. Dadurch können mobile Endgeräte wie Tablets direkt auf die aktuellen Systemzustände zugreifen.

Die eigentliche KI-Inferenz erfolgt auf dem Jetson Orin Nano Super 8GB, der als „Gehirn“ des Systems agiert. Die vom Raspberry Pi gelieferten Bilddaten werden mithilfe der leistungsstarken NVIDIA-GPU verarbeitet. Die neuronalen Netzwerke analysieren daraufhin die aktuelle Verkehrssituation und berechnen auf dieser Grundlage die optimale Spurzuweisung für die Fahrzeuge. Die entsprechenden Steueranweisungen (z. B. „Fahrzeug auf Spur 0 → Spur 1 verschieben“) werden zurück an den Raspberry Pi gesendet.

Zur Ansteuerung der Servos wurde eine eigene Kabelbox entwickelt, die mehrere Schaltkreise zur Umsetzung des Kommunikationsprotokolls enthält. Im Fokus steht hierbei die Übertragung über die UART-Schnittstelle des Raspberry Pi. Dabei wird der TX-Pin als Pull-up-Leitung genutzt und über zwei parallel geschaltete $10\text{ k}\Omega$ -Widerstände mit dem RX-Pin verbunden. Die daraus resultierende Datenleitung wird direkt in den DATA-Pin eines Dynamixel XL-320 Servos eingespeist. Diese selbst entwickelte Full-Duplex-zu-Half-Duplex-Schaltung ermöglichte eine kosteneffiziente Umsetzung und sparte gegenüber kommerziellen Lösungen rund 80 € ein.

Die Stromversorgung erfolgt zentral über ein gemeinsames 12V-Netzteil, dessen Ausgang über einen Step-Down-Konverter auf 7,4 V geregelt wird – passend zur Betriebsspannung der Dynamixel-Servos. Zur Spannungsstabilisierung wurde ein $1000\text{ }\mu\text{F}$ Elektrolytkondensator parallel zum Ausgang des Konverters geschaltet, um Spannungsspitzen zu glätten und Lastwechsel abzufangen. Der Spannungsabgriff erfolgt direkt am Ausgang des Konverters: Die 7,4 V versorgen die Servomotoren, während die gemeinsame Masse (GND) ebenfalls mit dem Raspberry Pi verbunden ist, um eine saubere gemeinsame Erdung (Common Ground) sicherzustellen. An den initialen XL-320 Servo wurden im Daisy-Chaining-Verfahren zwei weitere Servos desselben Typs angeschlossen, sodass mehrere Aktuatoren effizient über eine einzige Datenleitung angesprochen werden können.



c) Programmierung

LanePilot ist ein modular aufgebautes System zur KI-gestützten Verkehrsoptimierung, das von der Objekterkennung über die Datenaufbereitung bis hin zur Echtzeit-Inference auf Embedded-Geräten reicht. Ziel ist es, mittels moderner Deep-Learning-Modelle – insbesondere Graph Attention Networks (GATv2) – für jedes Fahrzeug die optimal geeignete Spur zu bestimmen. Im Folgenden wird beschrieben, wie der Quellcode organisiert ist, welche zentralen Module existieren und welche Herausforderungen während der Entwicklung gemeistert wurden.

Projektstruktur: Vom Root-Verzeichnis zum Subfolder

Im Root-Verzeichnis liegen grundlegende Metadaten und Konfigurationen:

- **project_config.yaml** enthält globale Settings für Datenpfade, Modellparameter und Docker-Umgebung.
- **README.md, LICENSE.md, .gitignore, .dockerignore** dokumentieren Nutzungshinweise und ausschlüsse.
- **entrypoint.sh** steuert den Start des Docker-Containers, und **requirements.txt** listet Python-Abhängigkeiten auf.

Die Ordnerstruktur gliedert sich in folgende Subfolders:

- **shared_src/**
 - data_preprocessing/ übernimmt das Parsen von YOLO-Detektionen (Roboflow-Annotierungen) und wandelt sie mittels box_to_polygon und create_vehicle in VehicleState-Instanzen um.
 - common/ enthält Config-Loader, Helper-Funktionen und Netzwerk-Utilities.
- **ai/**
 - Enthält alle KI-Module: Definition der GATv2-Architektur, Trainings- und Evaluierungsskripte.
- **firmware/<device_name>/**
 - Beinhaltet Docker-Entrypoints und Inferenz-Skripte für Jetson Orin Nano und Raspberry Pi 5, einschließlich TTL-Kommunikationsroutinen für Servos und ONNX-Inference.
- **assets/**
 - Speichert annotierte Bilddaten, synthetische Szenarien/Datensätze und vortrainierte Modelle.
- **config/**
 - Docker-Start-Skripte und Umgebungs-Konfigurationen.

- **opencv/**
 - Dockerfile und Build-Scripts für ein CUDA-optimiertes OpenCV-Image, um Lizenzkonflikte mit NVIDIA SDK zu umgehen.
- **scripts/**
 - Hilfsskripte für Entwickler-Workflows, z. B. Datengenerierung, Interactive-Tests.
- **tests/**
 - Unit- und Integrationstests (pytest), insbesondere zur Validierung von Datenvorverarbeitung, Feature-Engineering und KI-Modulen.

Datenvorverarbeitung und Feature-Engineering

Der erste Kernbestandteil ist die **Datenvorverarbeitung**, implementiert in shared_src/data_preprocessing. Aus Roboflow-annotierten .txt-Dateien werden Polygonkoordinaten extrahiert, und mittels create_vehicle entstehen VehicleState-Objekte. Diese Klasse trackt Bounding-Boxen über aufeinanderfolgende Frames, schätzt Geschwindigkeit und Position ab und stellt einen **Feature-Vektor** bereit, der folgende Werte enthält:

- Lane-ID, Geschwindigkeit, Beschleunigung
- Tiefe (Entfernung zur Kamera), normierte Box-Höhe, Seitenverhältnis
- Globale Spurenauslastung (LANE_UTILIZATION) aller drei Spuren

Mittels **Z-Score-Normalisierung** werden die Rohwerte skaliert. Anschließend schreibt ein Script die Tensorpaare x (Features) und y (optimal berechnete Zielpur via calculate_optimal_lane_id) in .pt-Dateien. Die Datensätze werden durch **synthetische Generierung** (SCALE_DATA-Faktor) auf das Mehrfache skaliert, indem zufällige Polygone auf realistischen Spurbereichen erzeugt und mit randomisierten Geschwindigkeiten und Fahrzeuganzahlen kombiniert werden.

Modellarchitektur und Trainingspipeline

Im Ordner ai/ befindet sich die **GATv2-Architektur**:

- **Input-Layer:** GATv2Conv(input_dim=7, hidden_dim=64, heads=8)
- **Hidden Layers:** Zwei weitere GATv2Conv(64×8, 64, heads=8) mit ReLU
- **Output-Layer:** Linear(64×8,3) für drei Zielpuren

Als **Baseline** wurde zudem ein **MLP** (zwei Dense-Layer mit ReLU) evaluiert, der bereits ~69 % Test-Accuracy erreicht. Die **Trainingspipeline** lädt Dataset-Splits (train, valid, test), berechnet **Klassengewichte** (25–42 %), definiert den **DataLoader** (BatchSize=512) und setzt AdamW(lr=0.003, weight_decay=0.001, eps=1e-6) ein. Ein

CosineAnnealingWarmRestarts-Scheduler ($T_0=2$, $T_mult=4$) regelt die Lernrate, während CrossEntropyLoss in Kombination mit **EarlyStopping** (Patience=20) das Training über bis zu 200 Epochen überwacht. Best-Model-Checkpoints werden auf Basis des Validierungsverlusts gespeichert, und schließlich wird das Modell sowohl als PyTorch- als auch als ONNX-Artefakt exportiert.

Inferenz, Deployment & Firmware

Für die **Echtzeit-Inference** wird das ONNX-Modell in Docker-Containern auf Jetson Orin Nano bzw. Raspberry Pi 5 ausgeführt. Der Graph-Berechner (build_edge_index) legt gerichtete Edges nur dann neu an, wenn sich Fahrzeug-IDs oder -Anzahl ändern; ansonsten wird eine gecachte Version wiederverwendet. Die Bildverarbeitung nutzt YOLOv11, während Servos mittels einer selbst entwickelten **Full-Duplex**→**Half-Duplex**-Schaltung (115250 Baud) angesteuert werden – ein Eigenbau statt des kostspieligen ROBOTIS-Moduls. Docker-Networking und ARM64-Cross-Compilation (QEMU-basiert in GitHub Actions) stellten besondere Herausforderungen dar. Die Container laufen getrennt auf den beiden verschiedenen Geräten und kommunizieren über Ethernet-Direktverbindung miteinander, wodurch der unmittelbare und schnelle Datenverkehr mit geringer Latenz ermöglicht wird. Zusätzlich läuft auf dem Raspberry Pi ein Hotspot, das es Geräten erlaubt, sich mit dem internen Server zu verbinden und die aktuellen Entscheidungen der KI abzurufen.

Besondere Herausforderungen & Learnings

- **Servo-Kommunikation:** Custom-Schaltung statt 80 €-Modul, Level-Shifting und Baudatenanpassung.
- **NVIDIA-Lizenz:** Verbot des Video Codec SDK → manueller OpenCV-CUDA-Build.
- **Docker Permissions:** Komplexe Konfiguration physischer und virtueller Interfaces zur Container-Kommunikation.
- **Daten-Unbalance:** Initial starke Klassenungleichgewichte beseitigt durch Class Weights und synthetische Szenarien.
- **GAT vs. MLP:** GAT erwies sich anfangs bei künstlicher Graphstruktur als weniger akkurat, MLP performte zu diesem Zeitpunkt deutlich besser. Zukünftig sind Reinforcement-Learning- und Transformer-Ansätze geplant.

Soziale Auswirkungen & Innovation

a) Direkte Auswirkungen auf Menschen in unserer Umgebung

In Städten und dicht besiedelten Regionen erleben wir täglich die Folgen eines ineffizienten Verkehrssystems: Staus, Lärm, Zeitverlust und Umweltbelastung. LanePilot adressiert diese Probleme direkt – indem es Fahrzeuge intelligent auf Fahrspuren verteilt und so den Verkehrsfluss optimiert.

Positive Auswirkungen im lokalen Umfeld:

- Zeitgewinn für Pendler: Weniger Staus bedeuten weniger verlorene Lebenszeit. Berufspendler, Handwerker, Pflegekräfte oder Familien auf dem Schulweg profitieren direkt.
- Geringerer Stress im Straßenverkehr: Gleichmäßige Auslastung der Spuren reduziert das aggressive Fahrverhalten, Drängeln oder unnötige Spurwechsel und somit Unfälle.
- Lärmminderung in Wohngebieten: Fließender Verkehr erzeugt weniger Lärm als ständiges Bremsen und Anfahren – ein Gewinn für die Lebensqualität in der Stadt.
- Förderung nachhaltiger Mobilität: Durch effizientere Verkehrsverteilung sinkt der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch, was auch im privaten Bereich Kosten spart.

Langfristig kann LanePilot auch Kommunen helfen, den Bedarf an neuen Straßen besser zu planen oder sogar ganz zu vermeiden. LanePilot kann auch als pädagogisches Beispielprojekt dienen, um Technikbegeisterung bei Jugendlichen zu fördern (z. B. an Schulen, MINT-Initiativen).

b) Potenzielle Auswirkungen auf die globale Bevölkerung

Auch weltweit ist Verkehr eines der zentralen Probleme des 21. Jahrhunderts. In Millionenmetropolen wie Jakarta, Lagos, São Paulo oder New Delhi sind tägliche Mega-Staus Alltag. Verkehrsstaus verursachen dort massive wirtschaftliche Schäden, beeinträchtigen die Gesundheit und gefährden die Sicherheit.

LanePilot hat das Potenzial, diese Herausforderungen global positiv zu beeinflussen:

- Reduktion von CO₂-Emissionen: Jedes Fahrzeug, das weniger im Stau steht, verbrennt weniger Kraftstoff. Weltweit summiert sich das auf Millionen Tonnen CO₂ jährlich.
- Höhere Sicherheit im Straßenverkehr: Durch die Vermeidung von plötzlichen Spurwechseln und stockendem Verkehr sinkt das Unfallrisiko. Besonders in Ländern mit schwacher Verkehrsinfrastruktur kann das Leben retten.

- Skalierbarkeit: Das System kann auf unterschiedlichste Straßeninfrastrukturen angepasst werden – ob in hochentwickelten Ländern mit V2I-Technologie oder in Entwicklungsregionen mit einfachen Anzeigetafeln.
- LanePilot passt perfekt in bestehende Smart-City-Strategien. Es ergänzt andere Systeme wie intelligente Ampeln, vernetzte Fahrzeuge und Verkehrsprognosemodelle.

c) Gesellschaftlicher Nutzen durch Technologieakzeptanz

Ein weiterer sozialer Aspekt ist die Akzeptanz und der verantwortungsvolle Einsatz von KI-Systemen. In vielen gesellschaftlichen Diskussionen wird Künstliche Intelligenz als unkontrollierbare, abstrakte Bedrohung wahrgenommen.

LanePilot zeigt, dass KI verständlich, nachvollziehbar und sinnvoll eingesetzt werden kann – nicht als Ersatz des Menschen, sondern als Werkzeug zur Verbesserung bestehender Systeme.

Beispiele für positive Effekte:

- Vertrauen in Technologie: Durch sichtbare Erfolge im Alltag (z. B. weniger Staus) wächst das Vertrauen in digitale Lösungen
- Barrierefreiheit im Verkehr: Gleichmäßiger Verkehrsfluss hilft auch älteren Menschen oder Menschen mit Mobilitätseinschränkungen, sich sicherer zu bewegen.
- Demonstration von Machbarkeit: LanePilot ist nicht nur ein Konzept, sondern ein funktionierendes Modell. Es macht Zukunftstechnologie greifbar.

d) Mögliche Risiken und ethische Fragen

Natürlich bringt jede neue Technologie auch Herausforderungen mit sich. Wir haben diese Aspekte frühzeitig reflektiert:

Risiken:

- Fehlinterpretationen durch KI: Wenn Bilddaten falsch analysiert werden, könnten Fahrzeuge auf ungeeignete Spuren gelenkt werden. Das wäre insbesondere im realen Verkehr kritisch.
- Ungleichheit bei der Umsetzung: Länder mit schlechter Infrastruktur könnten von solchen Systemen ausgeschlossen bleiben, während andere sie weiterentwickeln.
- Datenschutz bei V2I-Kommunikation: Die Erhebung von Fahrzeugdaten muss sicher und anonymisiert erfolgen, um keine Persönlichkeitsrechte zu verletzen.

Unser Umgang damit:

- Wir setzen auf Transparenz, erklären alle Systementscheidungen nachvollziehbar.

- Unser Modell ist modular, d. h. es kann auch ohne Internetanbindung oder sensiblen Daten funktionieren.
- Bei echter Anwendung muss die Verantwortung immer beim Menschen bleiben. Die KI liefert Empfehlungen, keine zwingenden Anweisungen.

e) Innovationsgrad und gesellschaftlicher Fortschritt

- LanePilot stellt eine technologische und gesellschaftliche Innovation dar:
- Technologisch, weil wir ein komplexes Zusammenspiel aus Objekterkennung, graphbasierter Logik und physischer Spursteuerung umgesetzt haben.
- Gesellschaftlich, weil wir zeigen, dass auch junge Teams mit begrenzten Ressourcen reale Probleme kreativ und lösungsorientiert angehen können.
- Pädagogisch, weil unser Projekt eine hervorragende Möglichkeit bietet, um technische Bildung und gesellschaftliches Bewusstsein zu verbinden.

f) Ausblick: Ein Schritt Richtung Zukunft

LanePilot ist mehr als ein Robotikmodell – es ist ein Konzept mit Vision. Es zeigt, dass ein intelligenter Umgang mit Technik Verkehrsprobleme nicht nur lindern, sondern grundlegend neu denken kann.

In einer Zeit, in der Klimawandel, Urbanisierung und Digitalisierung zusammenkommen, sind Projekte wie LanePilot nicht nur technisch spannend, sondern auch gesellschaftlich notwendig.

Für weitere Details (Programmcode, Bilder, Making of):



GitHub: AppSolves



Instagram: #appsolves.dev

The Business Model Canvas

Designed for:
LanePilot

Date: 22.05.2025
Version: 1

Innovations- und Unternehmensaspekte

Key Partners	Key Activities	Value Propositions	Customer Relationship	Customer Segments
<ul style="list-style-type: none"> Forschungseinrichtungen (z. B. für Verkehrssimulation, KI-Validierung) Stadtverwaltungen & Behörden für reale Tests Technologielieferanten für Sensorik, Kamera- und Netzwerktechnik Investoren & Förderggeber (z. B. mFUND, SmartCity-Programme) Start-up-Inkubatoren & Acceleratoren für Marktstrategie und Skalierung 	<ul style="list-style-type: none"> Weiterentwicklung und Training der KI-Modelle Integration in reale Verkehrsnetze (Pilotprojekte) Hardwareentwicklung & Tests für modulare Kamera-/Weicheneinheiten Datenanalyse & Feedback-Auswertung zur Optimierung der Algorithmen Akquise von Partnern & Finanzierung 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion von Staus durch KI-basierte Spurverteilung in Echtzeit Effizientere Nutzung vorhandener Infrastruktur ohne neue Straßen bauen zu müssen Verbesserung der Luftqualität durch weniger Stop-and-Go Steigerung der Verkehrssicherheit durch proaktive Spurwechselvorschläge Modular einsetzbares System, skalierbar von Pilotprojekten bis zu ganzen Städten V2I-fähig: bereit für Integration in autonome Fahrzeuge und Smart-City-Infrastrukturen 	<ul style="list-style-type: none"> Langfristige Partnerschaften mit Kommunen (z. B. im Rahmen mehrjähriger Smart-City-Initiativen) Support- und Wartungsservices für eingesetzte Hardware Beratung & Datenauswertung zur Verkehrsoptimierung Gemeinsame Entwicklung von Zusatzfunktionen mit Automobilherstellern 	<ul style="list-style-type: none"> Städte & Kommunen, die unter Verkehrsproblemen leiden und an Smart-City-Lösungen interessiert sind Verkehrsbehörden & Infrastrukturbetreiber, die Verkehrssicherheit und -effizienz steigern wollen Automobilhersteller & Zulieferer, die V2I-Kommunikation in ihre Fahrzeuge integrieren wollen Logistikunternehmen, die von optimierten Fahrzeiten auf städtischen Strecken profitieren könnten Autonome Mobilitätsanbieter, die eine intelligente Spursteuerung in ihre Algorithmen integrieren möchten
	Key Resources		Channels	
	<ul style="list-style-type: none"> KI-Modelle zur Objekterkennung und graphbasierten Spurentscheidung Hardwareplattform bestehend aus Kamera, Rechner, Weichensteuerung Technisches Know-how im Bereich Robotik, Verkehrstechnik und Embedded Systems Partnerschaften mit Forschungseinrichtungen und Pilotkommunen Datenschutz, Verkehrszulassung 	<ul style="list-style-type: none"> Direkte Pilotprojekte mit Städten (Kommunale Förderprogramme) Kooperationen mit Technologiepartnern (z. B. Anbieter für Verkehrstechnik, Cloudlösungen) Teilnahme an Messen und Wettbewerben für Smart Mobility und urbane Innovation Online-Präsentation, z. B. über Website, Social Media, Whitepapers für Fachpublikum Wissenschaftliche Publikationen in Bereichen Verkehr, KI, Automatisierung 	<ul style="list-style-type: none"> Lizenzerwerb der KI-Software an Kommunen oder Systemintegratoren Verkauf von Kamera- und Weicheneinheiten als Komplettsystem Datenanalyse & Verkehrsoptimierung als Dienstleistung (z. B. für Logistikunternehmen) Abonnement-Modell für kontinuierliche KI-Optimierung und Systemupdates Fördermittel & Innovationszuschüsse für die Markteinführung 	<ul style="list-style-type: none"> Reisekosten, Messen & Kommunikation mit Partnern

Quellenverzeichnis

- <https://www.zeit.de/mobilitaet/2025-02/adac-staubilanz-autobahnen-verkehr>, 08.02.2025
- <https://www.adac.de/verkehr/verkehrsinformationen/stauprognose/>, 08.02.2025
- <https://www.stern.de/panorama/staus-in-deutschland-nehmen-zu---aus-zwei-guten-gruenden-35443924.html>, 09.02.2025
- <https://www.spiegel.de/thema/verkehrsstau/>, 09.02.2025
- <https://github.com/>, 09.02.2025
- <https://www.bz-berlin.de/berlin/verkehr-an-himmelfahrt-in-und-um-berlin-stau-gefahr>, 09.02.2025
- <https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Smart-City-Navigator/Projekte/smartes-verkehrsleitsystem-zur-entlastung-der-innenstadt.html>, 15.02.2025
- <https://brandmaier.com/parken-verkehr/verkehrsleitsystem/>, 15.02.2025
- <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs>, 16.02.2025
- <https://www.hornbach.de/>, 17.02.2025
- <https://www.duh.de/informieren/klimaschutz/klimaschutz-im-strassenverkehr/>, 01.03.2025
- <https://www.industrystock.de/de/unternehmen/Automatisierungstechnik/Leitechnik/Verkehrsleitsystem>, 01.03.2025
- <https://www.centralbestellung.de/Baustellensicherung/Verkehrsleitsysteme/>, 02.03.2025
- <https://ebm-os.de/park-und-verkehrsleitsystem/>, 02.03.2025
- <https://stackfuel.com/de/blog/grundlagen-der-robotik-definition-arten-und-einsatz/>, 02.03.2025
- <https://www.hortitrade.com/de/katalog/mb0842048/forderband-potveer-457-x-50-cm-1>, 04.03.2025
- <https://www.dornerconveyors.com/europe/de/loesungen/zusammenfuehrungs-umlenk-und-sortierfoerderer>, 04.03.2025
- <https://stackoverflow.com/questions>, 05.03.2025
- <https://iwb.gmbh/foerderbaender/>, 08.03.2025
- <https://matco-international.com/de/forderband/>, 08.03.2025
- [https://de.wikipedia.org/wiki/Weiche_\(Verkehrstechnik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Weiche_(Verkehrstechnik)), 08.03.2025
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Schiebeb%C3%BChne>, 09.03.2025
- https://www.carrera4fun.de/8_itrack/i-prox.htm, 09.03.2025
- <https://www.youtube.com/watch?v=tcaak6fuK8I>, 09.03.2025
- <https://www.pollin.de/>, 09.03.2025
- <https://www.reichelt.de/>, 09.03.2025
- <https://www.voelkner.de/>, 09.03.2025
- <https://medium.com/>, 13.03.2025
- <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/ki-robotik.html>, 22.03.2025
- <https://automationspraxis.industrie.de/ki/ki-eine-grosse-chance-fuer-die-robotik/>, 22.03.2025
- <https://www.elektronikforschung.de/robotik>, 22.03.2025
- <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/archiv/genehmigungsbeschleunigung-2187452>, 23.03.2025
- <https://www.bmv.de/DE/Themen/Mobilitaet/Infrastrukturplanung-Investitionen/Planungsbeschleunigung/planungsbeschleunigung.html>, 23.03.2025
- <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2023/kw42-de-verkehrsnetz-971384>, 23.03.2025
- <https://sevdesk.de/blog/die-15-erfolgreichsten-startups-deutschlands/>, 12.04.2025
- https://www.db.com/what-we-do/focus-topics/Europe/UnternehmerTUM?language_id=1, 12.04.2025
- <https://www.unternehmertum.de/>, 12.04.2025